

03060

1

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA



Aplicación de la ondeleta de Paul en los hidrometeoros de impacto en el cultivo de maíz, para el estado de Veracruz bajo las fases del ENSO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS (Física de la Atmósfera)

P R E S E N T A

ANA DELIA CONTRERAS HERNANDEZ

Director: Dr. Tomás Morales Acoltzi

Ciudad Universitaria

Agosto, 2003

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

A



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Agradecimientos

A mis padres y hermanos, con amor por la ayuda que siempre me han brindado.

A mi esposo Oscar y a mis hijas Susy y Cristy, con amor por su gran comprensión para culminar este trabajo.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo excepcional.

NOMBRE: Ana Delta Cuatrecasas H.

FECHA: 12 agosto 2003

FIRMA: Ana Delta Cuatrecasas H.

TESIS CON
FALLA DE CUBIERTA

Con especial agradecimiento al Dr. Tomás Morales Acoltzi, por haber dirigido esta tesis con elevado profesionalismo, así también por la hospitalidad que me brindó junto con su muy respetable familia en Apizaco, Tlax. durante cada revisión y asesoría.

Al Dr. Carlos Gay García, Director del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM, le expreso mi respeto y gratitud por las atinadas sugerencias que realizó desde el primer manuscrito de la tesis.

Al Fis. Ángel Barrientos Santiago, M.I. Domitilo Pereyra Díaz, Dr. Adalberto Tejeda Martínez y Dr. Juan Cervantes Pérez, académicos de la Facultad de Instrumentación Electrónica y Ciencias Atmosféricas de la UV, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

A la Honorable Comisión Revisora, que con sus valiosas observaciones hicieron posible la conclusión de este documento.

Dra. Elba Villanueva Urrutia

Dr. Ernesto Jáuregui Ostos

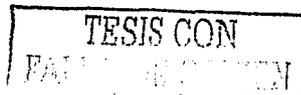
Dr. Adalberto Tejeda Martínez

Dr. Carlos Gay García

M. en C. René Garduño López

Dr. Artemio Gallegos García

Dr. Tomás Morales Acoltzi



Índice

Pág.

1. Introducción

§ 1.1 Propósito	2
§ 1.2 Alcance	2
§ 1.3 Antecedentes generales	3
§ 1.4 El territorio veracruzano	9
§ 1.5 Síntesis del clima de Veracruz	9
§ 1.6 Anomalías del Golfo de México	15

2. Datos y Metodología

§ 2.1 Algoritmo de dilatación de Mellin (ADM)	18
§ 2.2 Datos de lluvia	18
§ 2.2.1 Serie temporal	20
§ 2.2.2 Representatividad	20
§ 2.2.3 Anomalia media mensual	20
§ 2.2.4 Análisis espacial	21
§ 2.2.5 Análisis temporal	22
§ 2.3 Serie tiempo de temperatura mínima	24
§ 2.4 Serie tiempo de granizo	29
§ 2.5 Función de rendimiento del cultivo	29
§ 2.6 Síntesis de la metodología	30

3. Resultados

§ 3.1 Lluvia y tormentas eléctricas	36
§ 3.2 Heladas	73
§ 3.3 Granizo	85
§ 3.4 Síntesis de resultados	89

0

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4. Conclusiones

§ 4.1 Conclusiones generales	93
§ 4.2 Problemas por resolver	97

Anexo A: Abreviaturas	99
-----------------------	----

Anexo B: Símbolos y Variables	101
-------------------------------	-----

Anexo C: Algoritmo de la Transformada de Mellin	103
---	-----

Anexo D: Algoritmo numérico de la ondeleta de Paul	110
--	-----

5. Referencias	115
----------------	-----

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

RESUMEN

Se presenta una evaluación estadística del impacto de los hidrometeoros lluvia, granizo y helada sobre el rendimiento del cultivo del maíz de temporal, en el estado de Veracruz y bajo las fases de *El Niño* y la *Oscilación del Sur* (ENSO). Se investiga también la posible conexión entre la *temperatura superficial del océano* (TSO) en el Golfo de México y el rendimiento del maíz. El análisis se centra en las *series de tiempo* de información climatológica convencional del Servicio Meteorológico Nacional, el *Índice de Oscilación del Sur* (SOI) calculado por la Agencia Japonesa de Meteorología, y las *tablas de siniestros* de la Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Pesquero, calculados sobre doce "Distritos de Desarrollo Rural". La metodología plantea una depuración previa de la información climatológica disponible (36 años) dada la discontinuidad producida por vacíos de información y otras anomalías halladas en los datos. Se aplica el *algoritmo numérico de la ondeleta de Paul* (ANOP) para descubrir patrones de comportamiento periódico en los hidrometeoros. Los procesos de variabilidad climática son vinculados con propiedades estadísticas relevantes, como espectros de *potencia* y valores críticos de la *varianza*. Se encontró que el impacto de la lluvia, el granizo y las heladas, está asociado con la modulación de la *actividad convectiva severa* (tormentas eléctricas) y *no severa* (convección de cúmulos) por las fases del ENSO y las anomalías de la TSO del Golfo de México. El análisis efectuado (42 estaciones) muestra que el hidrometeoro más limitante para el rendimiento del maíz es la lluvia. Esto tanto por el exceso como por la ausencia del hidrometeoro. Se muestra evidencia de que la *oscilación cuasibienal* es un agente de la estratosfera que tiende a aminorar la lluvia. Esto en cuatro zonas (seis distritos agrícolas) de Veracruz, siendo el impacto significativo para el rendimiento sólo durante años de *El Niño*. Asimismo, se halló impacto por las fluctuaciones del periodo sobre el cual se presenta la *canícula*. El ANOP reveló tres tipos de comportamiento de la *canícula*: (1) anticipada con "interrupción húmeda", (2) de ingreso paulatino y (3) de régimen prolongado. Los distritos más *siniestrados* por la *anomalía negativa* de lluvia durante *El Niño* son *Pánuco, Tuxpan, Huayacocotla* y *Martínez de la Torre*. El distrito menos siniestrado por *El Niño* es *Las Choapas*. Los periodos recurrentes de sequía descubiertos son de tres, cinco y 20 años; encontrándose un impacto no uniforme en los ciclos primavera-verano y otoño-invierno. El impacto agrícola de la lluvia durante *La Niña* es relativamente menor al de *El Niño*, pero abarca más distritos: *Tuxpan, Martínez de la Torre, Coatepec, Ciudad Alemán, Jáltipan* y *Las Choapas*. En los primeros cuatro por *anomalías positivas* y, en los dos últimos por *anomalías negativas*. *La Antigua* es el distrito con *siniestro* menor, en años de *La Niña*. En cuanto a la influencia de la TSO sobre la lluvia, se propone, con base en *computos de reanálisis*, que las anomalías asociadas con el vórtice anticiclónico [94° W, 22° N] del Golfo de México inhiben la formación de nubes cumuliformes. Se encontró que para el rendimiento del maíz, *La Niña* es desfavorable sólo en el ciclo primavera-verano. Con respecto a las heladas (33 estaciones) se encontró modulación por la TSO del Golfo de México y por la transición entre *El Niño* y *La Niña*. El impacto en el maíz durante *El Niño* es inducido por anomalías de *radiación de onda larga* (*heladas radiativas*) y durante *La Niña*, por la *advección* de "aire frío". Se halló que las "condiciones neutrales" $|SOI| < 5$, son aquellas que se asocian con más bajos rendimientos del cultivo. Los distritos afectados por las heladas son *Huayacocotla, Martínez de la Torre, Coatepec* y *Fortín*. Finalmente, el granizo (40 estaciones) resultó ser el hidrometeoro que menos impacta el rendimiento del maíz. Esto porque se restringe a zonas elevadas (altitud mayor a 1800 msnm) de los distritos *Coatepec, Fortín* y *Huayacocotla*. Se halló que los años con *siniestros* por granizo estuvieron asociados con *La Niña*. El ANOP no reveló correlación entre la anomalía de TSO en el Golfo de México y el granizo.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

§ 1.1 Propósito

El propósito de la presente tesis, es determinar qué condiciones de variabilidad climática están asociadas con rendimientos mínimos y máximos del cultivo del maíz¹ de temporal, en el Estado de Veracruz. Se pretende alcanzar esta meta a través del análisis estadístico de los hidrometeoros lluvia (L), granizo (G) y helada (H). Se aplican métodos estadísticos para revelar aspectos esenciales asociados con la agricultura del maíz, como son los niveles de impacto de *El Niño*, *La Niña* y estados intermedios. La meta no es absoluta, pero se considera suficiente para fundamentar una posterior modelación numérica del impacto climático.

Se parte de datos históricos de precipitación, granizo y temperatura mínima. La información meteorológica procede de observatorios y estaciones de superficie del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Se complementa con datos históricos de *Temperatura de la Superficie del Océano* (TSO) del Golfo de México, extraídos de imágenes de satélite.

Los datos de "producción" del maíz provienen de *Tablas de Siniestros* del Sistema de Información Agropecuaria (SIA) del Gobierno del Estado de Veracruz. Las superficies agrícolas afectadas están referidas a doce "Distritos de Desarrollo Rural" (DDR) en los que se divide actualmente el territorio del Estado.

El análisis se centra en los impactos del fenómeno global de *El Niño y la Oscilación del Sur* (ENOS²) y una condición de mesoescala: anomalías de la TSO del Golfo de México. Se busca explicar las correlaciones encontradas en términos físicos, a fin de entender mejor la influencia del clima sobre la agricultura de Veracruz.

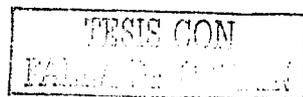
La distribución en capítulos es la siguiente: en el *Capítulo 1* se presentan el propósito, alcance y antecedentes generales. En el *Capítulo 2* se detalla la metodología. En el *Capítulo 3* se muestran los resultados y finalmente, en el *Capítulo 4* se encuentran las conclusiones y problemas por resolver.

§ 1.2 Alcance

Este trabajo está orientado a contribuir técnicamente en el proceso de toma de decisiones relativa a la programación de los ciclos agrícolas del maíz, a nivel regional y local. Desde el plano científico, se busca el conocimiento detallado del impacto

¹ Variedades criollas (*Zea Mays*): *indurata*, *saccharata* y *everta*.

² ENOS o ENSO, por su siglas en inglés.



climático, asociándolo con condiciones de variabilidad interanual; dado que la variabilidad climática se traduce en un importante factor de riesgo para la actividad agrícola, en términos económicos. En la actualidad, se ha logrado un avance significativo en las técnicas de predicción estacional e interanual, básicamente en función de un nuevo nivel de entendimiento de las *teleconexiones* entre la circulación del océano y los procesos de la atmósfera.

§ 1.3 Antecedentes Generales

Los hidrometeoros son fenómenos atmosféricos que forman parte del *ciclo hidrológico*. Por definición, se considera como *hidrometeoro* a todo conjunto de partículas de agua en fase sólida o líquida dentro de la atmósfera. Las partículas de agua se pueden encontrar suspendidas (nubes, nieblas), cayendo (lluvia, nieve, granizo), ascendiendo por efecto del viento (espuma, ventisca) o en deposición sobre la superficie de la Tierra (rocío, heladas, escarchas). Las fluctuaciones en frecuencia (mes^{-1}) e intensidad (L : $\text{mm}\cdot\text{mes}^{-1}$, G : $\text{días}\cdot\text{mes}^{-1}$, H : $\text{días}\cdot\text{mes}^{-1}$) observada de los hidrometeoros, son procesos no bien entendidos en la actualidad.

La lluvia tropical es un hidrometeoro potencialmente limitante para los cultivos, particularmente los de temporal. La duración (min.) e intensidad ($\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$) desarrollada por las nubes de tormenta, sobrepasa a menudo la capacidad de absorción del suelo agrícola. Esto puede llevar a inundaciones pluviales y a la pronta extinción de la planta del maíz: ocurre tanto en el crecimiento, como durante la *etapa de producción del ciclo vegetativo*. Sobre escalas de tiempo mayores, el déficit de lluvia, o de hecho la sequía prolongada, impactan en la calidad y destino final del producto: de consumo humano a forraje. En el extremo, la pérdida total del cultivo.

En cuanto al granizo, éste se considera un hidrometeoro con alto potencial destructivo (Klimowski *et al.*, 1998). Se observa en los DDR próximos a zonas montañosas (5 de 12) en ambos ciclos (primavera-verano: PV; otoño-invierno: OI). Está probado que la lluvia y el granizo están modulados por la convección. La convección sobre la vertiente oriental de México se desarrolla dentro de una *capa límite* afectada por el régimen de los *alisios*. La *inestabilidad convectiva* (Tomas y Webster, 1997) en la escala sinóptica, es generada a su vez por la *advección* del aire húmedo (Hendon y Woodberry, 1993) asociada al Golfo de México y Golfo de Tehuantepec.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El congelamiento en superficie, es un proceso que puede resultar en una variedad de hidrometeoros. Esto se revela en los datos de la temperatura del aire³ al aproximarse a cero grados centígrados. Esta condición conocida como *helada meteorológica* (Miller *et al.*, 1983) limita la eficiencia de los cultivos agrícolas, en particular a la planta del maíz, cuyo rango mínimo de tolerancia es 10° a 20° C (De Fina, 1973). Temperaturas menores a este rango pueden afectar el crecimiento de la planta, calidad de grano o llevar a la extinción.

Según Sánchez (1998) los mecanismos atmosféricos que inducen heladas están asociados, tanto con la energía de movimiento de las masas de aire de los frentes fríos, como con el balance de radiación. Estos resultados llevan a que las heladas puedan presentarse en cualquier estación del año. En particular, su aparición intempestiva en el verano afecta a la agricultura. Las heladas en la época húmeda son cruciales debido a que los *siniestros* se suman a los del periodo otoño-invierno, considerados como sistemáticos.

El fenómeno del ENOS consiste básicamente en una anomalía de la TSO del Pacífico. El fenómeno implica tanto fluctuaciones de la TSO en el Pacífico ecuatorial oriental, como variaciones de la presión a nivel del mar. Esto en periodos de tiempo de 3 y 7 años, aproximadamente (Wang y Wang, 1996). La influencia del fenómeno de *El Niño* sobre el continente americano es bien conocida. Fuentes de información de todo el mundo, han descrito sus impactos y discutido sus posibles causas (Quinn *et al.*, 1987).

El concepto de Índice de Oscilación del Sur (*Southern Oscillation Index*, SOI) fue desarrollado (Kiladis y Van Loon, 1988) hace más de una década. La definición de la Agencia Japonesa de Meteorología (*Japan Meteorological Agency*, JMA) se refiere a una región específica denominada *Niño 3* (4°N - 4°S, 90° - 150° W) sobre el Pacífico ecuatorial. El SOI se define como:

$$SOI = 10 \cdot \frac{\Delta P_{SL} - \langle \Delta P_{SL} \rangle_{LT}}{SD[\Delta P_{SL}]} \quad 1.1$$

Donde ΔP_{SL} es la diferencia de la presión atmosférica a nivel del mar entre *Tabiti* [Lon: 149°36' W, Lat: 17°34' S] y *Darwin* [Lon: 130°51' E, Lat: 12°28' S]. Esto es: $\Delta P_{SL} = P_{\text{Tabiti}} - P_{\text{Darwin}}$. Los términos $\langle \Delta P_{SL} \rangle_{LT}$ y $SD[\Delta P_{SL}]$ representan respectivamente, el promedio de largo plazo y la *desviación estándar* asociada con ΔP_{SL} durante el periodo de tiempo Δt . El factor de diez es puramente convencional. Así, las observaciones de la presión atmosférica conducen al índice definido en I.1 a una fluctuación entre -35 y +35,

³ Termómetro a 1.5 m de la superficie y dentro del abrigo meteorológico.

aproximadamente. El periodo Δt sobre el cual se calcula el SOI es por lo común de un mes, aunque en principio pudiera establecerse sobre periodos menores, tal como semanas o días.

Los valores negativos del SOI sostenidos durante algunos meses indican episodios de *El Niño*. Estos valores negativos normalmente se asocian con una disminución en la intensidad de los vientos *alisios*, así como por una elevación de la TSO del Pacífico central y oriental. Los valores positivos del SOI indican la condición opuesta, es decir *La Niña*. El SOI de la JMA ha sido utilizado con anterioridad para estudiar los impactos de *El Niño* en varios países, incluyendo México (Green, 1996; Sittel, 1994; Magaña *et al.*, 1997).

A partir de modelos de circulación, se ha logrado pronosticar las anomalías de TSO hasta con un año de anticipación, y con un nivel de exactitud del 80% (Latif *et al.*, 1994). De este modo, los fenómenos asociados con el clima, pueden predecirse con cierto grado de confianza. Dado el fuerte vínculo entre el crecimiento de los cultivos y el clima, esta predictabilidad conduce a implicaciones significativas, dirigidas hacia el mejoramiento de la eficiencia de la producción agrícola (Adams *et al.*, 1995; Sonka *et al.*, 1986).

En algunas regiones del mundo, como el sureste de Estados Unidos, África oriental y Sudamérica (Hansen *et al.*, 1999; Indeje *et al.*, 2000; Messina *et al.*, 1999; Magaña, 1999) las conexiones entre el clima y la fase del ENOS se han establecido acertadamente. Mientras que en otras zonas, como el sudeste asiático, Indonesia, Filipinas, Kalimantan (Borneo), Australia, Centroamérica y Sudáfrica, se encuentran escasamente entendidas. Factores tales como la calidad y continuidad de la información disponible (Trenberth y Paolino, 1980) así como la predictabilidad climática (Torrence y Webster, 1995) contribuyen a este hecho.

En cuanto a su *volumen de producción*, el maíz de temporal es uno de los cultivos más importantes en México (Flores, 1986). Según Negrete (2002) los requerimientos óptimos de agua (lluvia acumulada) y temperatura ambiente durante el *ciclo vegetativo* de esta planta⁴ son 550 mm y de 20 a 30°C. Asimismo, el *ciclo vegetativo* (siembra a cosecha) es variable, oscila entre 80 a 200 días.

El periodo de máxima *vulnerabilidad fenológica* (Post y Stenseth, 1999) con respecto a la lluvia, coincide con la fase de "espigamento", aunque también la fase de "llenado de grano" presenta vulnerabilidad, debido a los requerimientos de agua asociados. La fase de "llenado de grano" es crítica para el rendimiento de los cultivos, dado que el rendimiento

⁴ Aunque ligado al rendimiento del maíz, el factor edáfico se mantendrá al margen dada la insuficiencia de datos y observaciones de campo.

se determina comúnmente por el peso del grano recolectado en la unidad de área. Para el ciclo agrícola PV⁵, el periodo de máxima vulnerabilidad fenológica abarca el bimestre agosto-septiembre.

El régimen de lluvia sobre Veracruz es desigual, como lo muestra la Tabla I.1. En esta tabla aparecen las precipitaciones medias mensuales en siete zonas colindantes (A a G) del Estado de Veracruz, ordenadas latitudinalmente. La interpolación de las normales climatológicas de 162 estaciones sobre una malla regular (New et al., 1999) sugiere fuerte heterogeneidad en la distribución espacial de este hidrometeoro.

Como podrá verificarse en el siguiente apartado tocante a la fisiografía, la heterogeneidad espacial de la lluvia no se da únicamente en función de la altitud del terreno, puesto que zonas dentro de un mismo rango de elevación, como (1) A y F y (2) C y D tienen niveles pluviométricos no semejantes (Tabla I.1). En el caso (1) el terreno está integrado por lomeríos y llanuras costeras, mientras que en (2) esta formado por montañas.

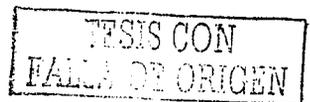
Según se ha reportado (Dorenbos, 1986) un régimen desigual semejante al que se presenta en Veracruz, conduce a un rendimiento promedio entre 2 y 3 ton·ha⁻¹. El área promedio sembrada por ciclo agrícola es del orden de 190, 000 hectáreas (SIA, 1999).

El sector agrícola de Veracruz reconoce que las lluvias convectivas del verano son insuficientes para satisfacer las necesidades de agua de los cultivos de temporal. De igual forma resulta en otoño e invierno, dado que dominan lluvias de menor intensidad, asociadas con nubosidad estratiforme (Cotton y Anthes, 1989). La mayor parte de la lluvia (mm) captada en las regiones costeras del Golfo de México, son consecuencia de las tormentas y ciclones tropicales (Gómez, 1992).

Aunque se ha reportado que la actividad de ciclones tropicales está influenciada por el ENOS en el Pacífico occidental (Hastings, 1990) aún existen incertidumbres en el pronóstico de ciclones durante *El Niño* y *La Niña*. Estas incertidumbres están en las variables temperatura superficial del océano, punto de rocío, vorticidad y divergencia del viento (Zhang y Krishnamurti, 1997).

La helada es un hidrometeoro que consiste en el congelamiento de la superficie inducido por un repentino descenso de la temperatura. Este congelamiento puede ser concurrente a la formación de escarcha. El fenómeno suele presentarse asociado a la advección de aire "frío" o a la liberación de radiación térmica por cielos despejados. El impacto del ENOS

⁵ En Veracruz se siembra maíz en los dos ciclos y en todos los DDR.



Zonas	Localización	Puntos de malla (P_M) y Número de Estaciones (N_E)		Abril (Primavera)	Julio (Verano)	Octubre (Otoño)	Enero (Invierno)
A	22.0 a 20.8 N y 98.1 a 97.7 W	$P_M = 33$ $N_E = 15$	\mathcal{L} (mm)	55.1	198.4	166.4	41.5
			SD	14.6	31.9	13.4	5.4
B	20.8 a 20.3 N y 97.6 a 97.2 W	$P_M = 20$ $N_E = 7$	\mathcal{L} (mm)	63.8	218.6	185.7	46.6
			SD	7.4	44.8	16.0	4.7
C	20.3 a 19.3 N y 97.1 a 96.8 W	$P_M = 27$ $N_E = 15$	\mathcal{L} (mm)	70.7	213.4	193.2	59.3
			SD	9.5	32.0	21.2	9.2
D	19.3 a 18.7 N y 97.1 a 96.3 W	$P_M = 42$ $N_E = 44$	\mathcal{L} (mm)	49.5	323.9	159.0	34.2
			SD	9.7	67.4	27.5	5.8
E	18.7 a 18.2 N y 96.2 a 95.2 W	$P_M = 36$ $N_E = 28$	\mathcal{L} (mm)	30.3	345.5	220.6	38.4
			SD	3.7	46.5	21.5	5.6
F	18.2 a 17.7 N y 95.8 a 94.6 W	$P_M = 55$ $N_E = 24$	\mathcal{L} (mm)	31.7	349.7	224.9	49.4
			SD	1.6	38.2	41.3	12.8
G	17.7 a 17.2 N y 94.9 a 93.8 W	$P_M = 40$ $N_E = 29$	\mathcal{L} (mm)	35.9	328.1	251.3	72.0
			SD	3.0	46.6	47.0	18.5

Tabla 1.1 Régimen climatológico de lluvia media mensual (mm) en siete zonas de Veracruz y desviación estándar (SD) asociada. Malla longitud-latitud de interpolación: $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. Fuente: Climatología East Anglia (New et al., 1999).

sobre las heladas aún es un problema abierto (Conde et al., 1998). En Veracruz, se le atribuye mayor conexión con *La Niña* (GEV, 1999).

El granizo es un producto de las corrientes ascendentes y descendentes del interior de las nubes de tormenta. La partícula de hielo es reconocida como *granizo* si el diámetro en superficie es de al menos 5.0 mm, además de presentar una densidad entre 700 a 900 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Geer, 1996). Es considerada como *granizo pequeño* (*small hail*) toda aquella partícula de granizo cuyo diámetro se encuentra entre 5.0 y 13.0 mm.

Si el diámetro de la partícula de hielo es inferior a 5.0 mm y su densidad está entre 50 y 890 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, entonces se considerará como *graupel* (Schneider, 1996). El aspecto del *graupel* es de una partícula opaca, mientras que el *granizo* es semitransparente, dado que en su interior se encuentra agua líquida, confinada por una capa externa congelada (USDC, 1995).

Se ha observado que el hidrometeoro se presenta durante las tormentas en forma combinada: *granizo* y *graupel*. Así, actualmente se entiende el término "granizo" como una categoría asociada a la *convección profunda* (Gilmore et al., 2002). Si el diámetro promedio de las partículas de hielo en superficie rebasa los 19.0 mm, entonces el fenómeno es considerado como *severo* o de impacto. (Branick, 1993).

El granizo se caracteriza por ser un hidrometeoro observado durante episodios de tiempo relativamente cortos, en vez de un régimen estacionario, como la lluvia. En principio, el granizo puede presentarse en cualquier sitio del mundo. Exceptuando las zonas montañosas, la partícula de *granizo* es poco común dentro de las regiones tropicales (Bardsley, 1990).

El granizo es una forma de precipitación que se desarrolla a través de una o más columnas o *chimeneas* (*hailshafts*). Estas *chimeneas* se trasladan a una velocidad entre 48 y 56 $\text{km}\cdot\text{hr}^{-1}$ con respecto a un observador fijo en superficie. El área barrida es conocida como *vena*⁶ (Changnon, 1970). Las dimensiones de una *vena* son típicamente 0.03 – 3 km de ancho y 8 – 300 km de largo. El conjunto de *venas* forman *andanas* (*hailswatch*).

Se ha encontrado fuerte correlación entre las tormentas de granizo y la serie del SOI (McMaster, 1997). Esto ha impulsado a fundamentar pronósticos regionales y locales (Kuhnel, 1998). Según lo reportado, en los casos estudiados el daño infringido por el granizo es ligeramente superior para un $|\text{SOI}|$ elevado durante *La Niña* (Yeo et al., 1999) aunque se han presentado años de *El Niño* con daños por granizo.

⁶ *Hailstreak*, en inglés.

Ha sido recientemente abordado bajo un enfoque regional el análisis de las fluctuaciones de largo plazo en el granizo, a partir de series temporales con datos convencionales (Changnon y Changnon, 2000). Así, se reportó una disminución relativa del 65 % en el número de días con granizo en los últimos veinte años, sobre el territorio de los Estados Unidos.

§ 1.4 El territorio veracruzano

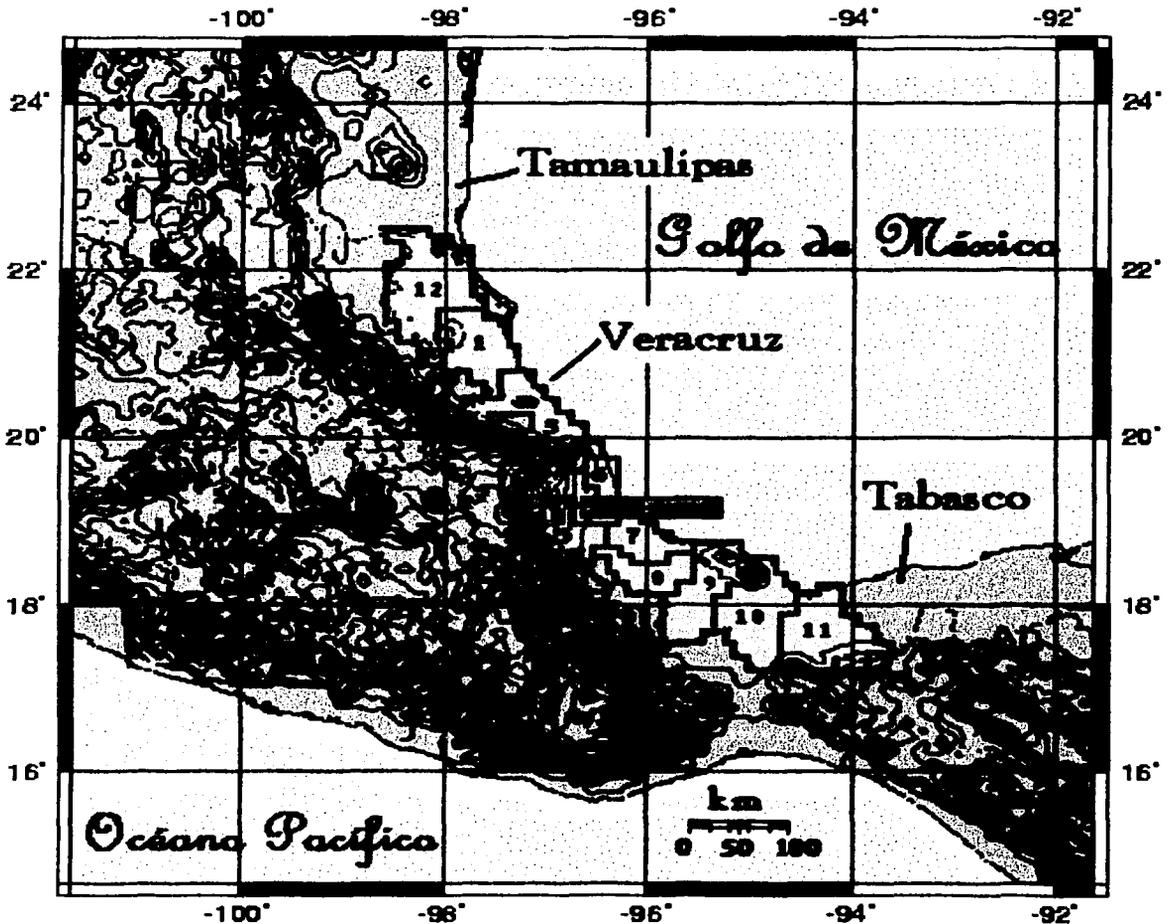
El territorio que ocupa el Estado de Veracruz representa aproximadamente el 3.7 % de la extensión del territorio nacional. Se encuentra ubicado en la vertiente oriental de la República Mexicana (Figura 1.1). Colinda al este con el Golfo de México, al norte con Tamaulipas, al oeste con San Luis Potosí, Hidalgo y Puebla, al sur y suroeste con Oaxaca y al sureste con Chiapas y Tabasco. Su extensión abarca siete de las regiones fisiográficas de México: (1) *Llanura Costera del Golfo Norte*, (2) *Sierra Madre Oriental*, (3) *Eje Neo-volcánico*, (4) *Sierra Madre del Sur*, (5) *Llanura Costera del Golfo Sur*, (6) *Cordillera Centroamericana* y (7) *Sierra de Chiapas y Guatemala*.

En cuanto a la hidrografía (Figura 1.2) se tiene que casi todo su territorio pertenece a la vertiente del Golfo de México, aunque existen algunos pequeños arroyos en la ladera occidental del *Cofre de Perote* que confluyen hacia otra vertiente. Las regiones hidrológicas en las que la federación ha optado por dividir el territorio veracruzano son cinco: *Río Pánuco*, *Tuxpan – Nautla*, *Río Papaloapan*, *Coatzacoalcos* y *Río Balsas*. Asimismo, se encuentran perfectamente determinadas nueve cuencas: *Tamesí*, *Pánuco*, *Tecolutla*, *Nautla*, *Colipa*, *Jamapa*, *Papaloapan*, *San Juan* y *Coatzacoalcos*.

§ 1.5 Síntesis del clima de Veracruz

Es generalmente reconocida la existencia de al menos cinco variedades climáticas (Figura 1.3) sobre el territorio veracruzano: (1) *Cálido húmedo y sub-húmedo*, (2) *Semicálido húmedo*, (3) *Templado*, (4) *Frío y muy frío* y (5) *Semiseco templado*. En cuanto al suelo; cerca del 31% lo cubren zonas selváticas, 30% está destinado a la agricultura de temporal, 1.5% a la agricultura de riego y aproximadamente el 28% a pastizales. Las zonas boscosas apenas sobrepasan el 4% (SIA, 1999). La proporción que guardan los cuerpos de agua superficial, con respecto al suelo agrícola (Figura 1.4) es elevada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



- | | | | |
|---------------------|---------------|----------------------|-----------------|
| 1) Tuxpan | 4) Coatepec | 7) Veracruz | 10) Jáltipan |
| 2) Huayacocotla | 5) Fortín | 8) Cd. Alemán | 11) Las Choapas |
| 3) Mtz. de la Torre | 6) La Antigua | 9) Sa. Andrés Tuxtla | 12) Pánuco |

Figura 1.1 Ubicación geográfica y topografía del territorio veracruzano. Se muestran los límites de los 12 Distritos de Desarrollo Rural. Fuente: Centro Nacional de Datos Geofísicos (NGDC) y Gobierno del Estado de Veracruz (GEV).

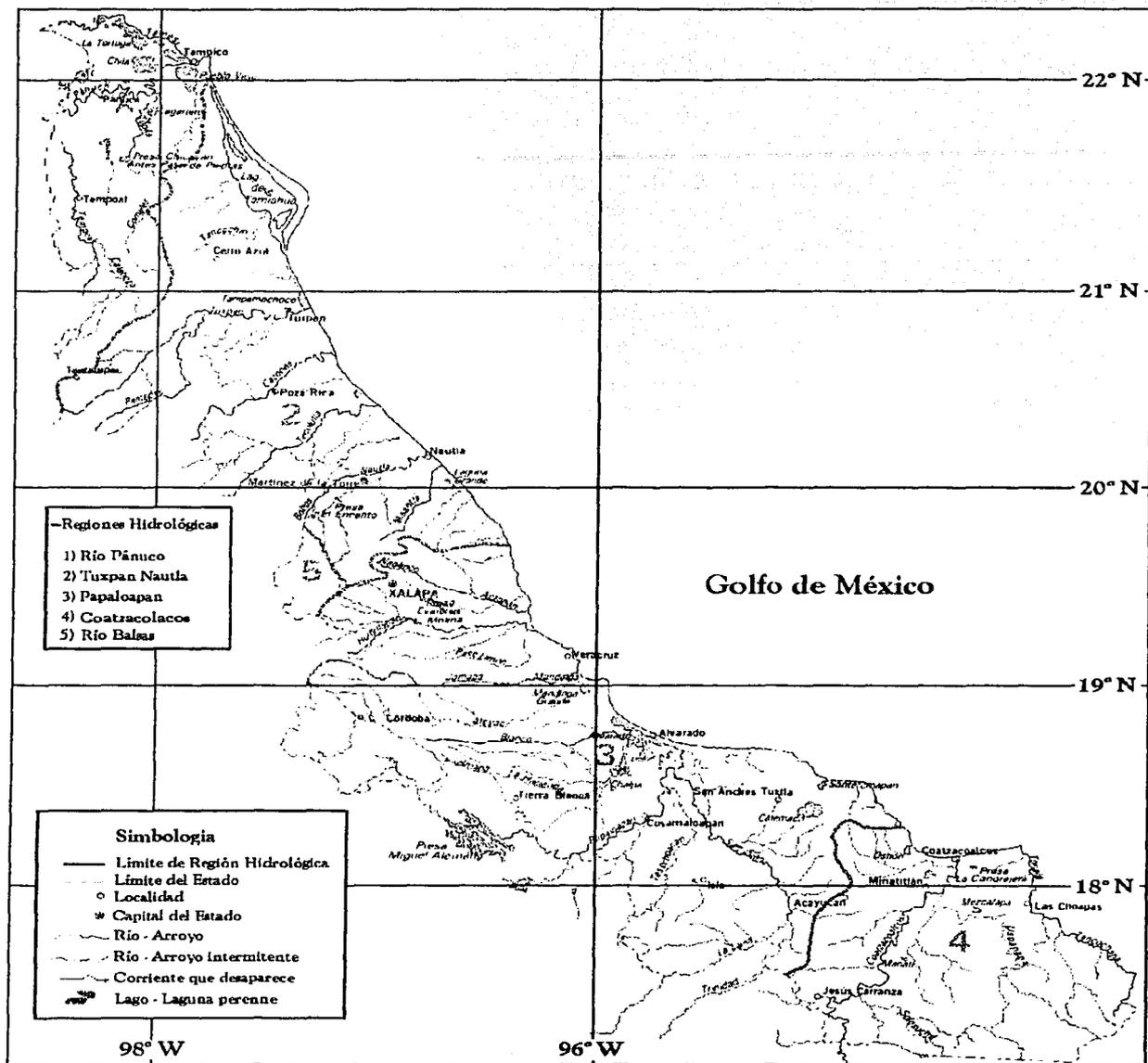


Figura 1.2 Hidrografía de Veracruz. Fuente: GEV, 1992.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Durante el verano se presentan importantes *sistemas tropicales*, como son las *ondas del este*, tormentas y huracanes. La proximidad con el Mar Caribe y Golfo de México, le confiere una alta incidencia de tormentas (Jáuregui, 1995; Jáuregui y Zitácuaro, 1995). En el invierno se presenta alta incidencia de *frentes fríos* que impactan con vientos máximos la costa suroeste del Golfo de México (Jáuregui, 1975).

Usando un modelo de regresión simple e información de 47 estaciones convencionales, Tejeda y Maruri (1991) mostraron que la *canícula* es un fenómeno climático que impacta al territorio veracruzano de forma irregular, ubicando sobre la región norte (latitud $> 21^{\circ}$ N) los máximos de sequía relativa.

Con 65 años de información climatológica convencional y a partir de métodos exclusivamente gráficos, Tejeda *et al.* (1993) demostraron que el incremento de la temperatura media anual de Xalapa [Lat: $19^{\circ}32'$ N, Lon: $96^{\circ}55'$ W, Alt: 1420 m] siguió el comportamiento de la *anomalía de temperatura global*. En cuanto a la precipitación acumulada anual, se reportó una tendencia hacia la disminución, a partir de la década de los setentas. Con base en la serie del SOI, se sugirió que durante años de *El Niño* "moderado", la tendencia climática del sitio apuntó hacia la disminución de la temperatura media anual, mientras que en las precipitaciones resultó en una tendencia hacia el incremento en el promedio anual.

Ojeda *et al.* (1993) analizaron tendencias en series largas (seis décadas) de temperatura y precipitación anual, en tres estaciones convencionales del centro del Estado de Veracruz, localizando un máximo de lluvia en la década de los cincuentas. Se reportó también que el crecimiento del número de perturbaciones tropicales del Pacífico, está ligado al efecto del aumento en la concentración global de CO_2 , dado que así lo reflejó el análisis de *correlación canónica* entre estas variables y la coincidencia en fase.

Hace una década fue confirmado (Pereyra y Tejeda, 1993) mediante observaciones directas de temperatura en superficie (altura del sensor: 0.1 m) que el *Valle de Perote* [Lat: $19^{\circ}50'$ N, Lon: $97^{\circ}40'$ W ; Lat: $19^{\circ}20'$ N, Lon: $97^{\circ}5'$ W] es una zona con alta frecuencia de heladas (40 año⁻¹). El impacto a la agricultura de este valle (altitud: 2,400 m) conduce ordinariamente a pérdidas en diversos cultivos de temporal: maíz, frijol, trigo y papa.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

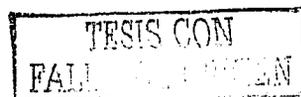
§ 1.6 Anomalías del Golfo de México

El Golfo de México forma un recinto semicerrado. La corriente principal es la *Corriente de Lazo*. Esta corriente ingresa al golfo por el canal de Yucatán y sale por el estrecho de Florida: forma parte de la corriente conocida como la *Corriente del Golfo* (*Gulf Stream*, en inglés). La *Corriente de Lazo* contribuyen significativamente al balance de *calor y salinidad* en todo el Golfo de México, particularmente por el eventual desprendimiento de *anillos cálidos* (*hot rings*, en inglés). La TSO promedio del Golfo de México es de aproximadamente 27°C. El mínimo de TSO se presenta generalmente en febrero y el máximo en agosto (Monreal y Salas, 1997).

Sobre el Golfo de México y durante el periodo 1961–1991 los reanálisis (Kalnay *et al.*, 1996) indican que las *anomalías* de la TSO media anual tienen una extensión variable. La localización y extensión de las anomalías son fluctuantes (Houghton y Tourre, 1992). Algunos modos peculiares son (Figura 1.5) :

- a) Anomalía positiva de TSO. Esto resulta en 1962, 1972, 1978, 1980, 1981, 1982, 1983, 1985, 1986, 1989, 1990 y 1991.
- b) Anomalía negativa de TSO. Como en 1970, 1976, 1984 y 1988.
- c) Anomalía positiva de TSO en la región norte ($\text{Lat} > 26^\circ \text{N}$) y negativa en el sur ($\text{Lat} < 26^\circ \text{N}$). Este modo resultó en 1965, 1967, 1971, 1973, 1974, 1975.
- d) Anomalía positiva de TSO al este ($\text{Lon} > 258^\circ \text{E}$) y negativa en el oeste ($\text{Lon} < 258^\circ \text{E}$). Esto en 1961, 1963, 1964, 1969 y 1979.
- e) Anomalía indistinta de TSO. Como en 1966, 1968, 1977 y 1987.

Esto nos dice que dentro del periodo analizado (31 años) el signo de las anomalías medias anuales de la *temperatura superficial del océano* $\text{sgn}[\langle \text{TSO} \rangle_{\text{anom}}] = \text{sgn}[\langle \text{TSO} \rangle_{\text{anual}} - \langle \text{TSO} \rangle_{\text{LT}}]$ permite identificar (1) una amplia región dominante o (2) un par de zonas colindantes con signos opuestos. La excepción a este hecho estadístico es (3) una anomalía indistinta poco frecuente (4 años = 13% del periodo). Así, la *temperatura superficial del océano* muestra cambios en la mesoescala vinculados a una dinámica de mezclado en el océano, cuya eficiencia es variable.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

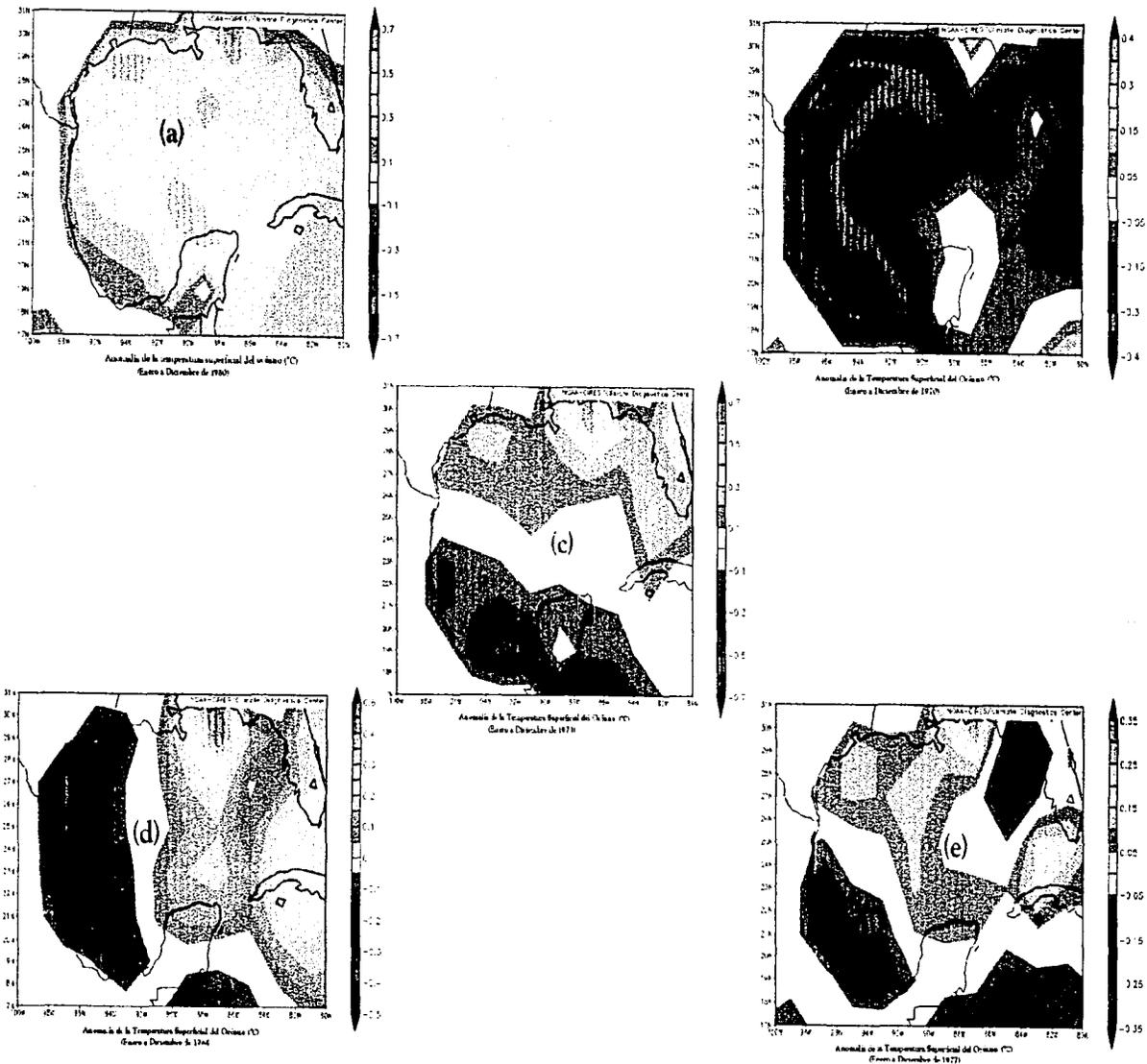


Figura 1.5 Anomalías medias anuales de la TSO sobre el Golfo de México en (a) 1980 (b) 1970 (c) 1973 (d) 1964 y (e) 1977. Fuente: Reanálisis NCEP/ NCAR (Kalnay *et al.*, 1996).

Capítulo 2

DATOS y METODOLOGÍA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

§ 2.1 Algoritmo de dilatación de Mellin (ADM)

La transformada de Mellin es una transformación integral comúnmente usada en análisis de incertidumbres de series de tiempo en hidrología (Tung, 1990). En la tesis, la transformada de Mellin (Gradshteyn y Ryzhik, 1980) es aplicada como método de interpolación. Este método de interpolación en el tiempo es de tipo espectral. Un mapeo de la señal transformada (Figura 2.1) es utilizado como *dilatación funcional*. Este método es conveniente, dado que el análisis requerido involucra tendencias de comportamiento y patrones específicos en la frecuencia de los hidrometeoros.

La aplicación sistemática del algoritmo sobre las series constituye un proceso numérico. Este proceso resultó ser altamente eficiente. Como etapa previa al procesamiento de datos reales con el ADM, se probó que la eficiencia atañe tanto a la bondad de ajuste, como a la memoria y velocidad del cálculo numérico (Anexo C).

§ 2.2 Datos de Lluvia

Para determinar las condiciones de impacto de la lluvia sobre el maíz, se analizó el comportamiento temporal del hidrometeoro con la información disponible. En cuanto a la resolución mínima, se convino en tomar un mes. Esto debido a que resulta un intervalo de tiempo suficientemente pequeño para captar rasgos de variabilidad del clima tropical. Se tomó la lluvia acumulada (mm) en un mes como la variable en cuestión.

La fuente de información utilizada fue el banco de datos del SMN¹, que contiene información meteorológica histórica y de tipo convencional. Se proyectó una etapa inicial de evaluación de calidad, justificada por la ausencia de referencias sobre la confiabilidad de estos datos.

Se encontró como falla recurrente la falta de información (Easterling y Peterson, 1995). Este tipo de falla es común en los bancos de observaciones meteorológicas convencionales de todo el mundo (Karl *et al.*, 1989; Karl *et al.*, 1993). Este hecho representa una restricción sobre el tipo de análisis de la variable (Gandin, 1992). También resulta en una fuente de incertidumbre de los resultados.

¹ Esto en consecuencia de la insuficiencia de datos y estaciones termopluviométricas dedicadas a planeación agrícola y a validación de modelos climáticos.

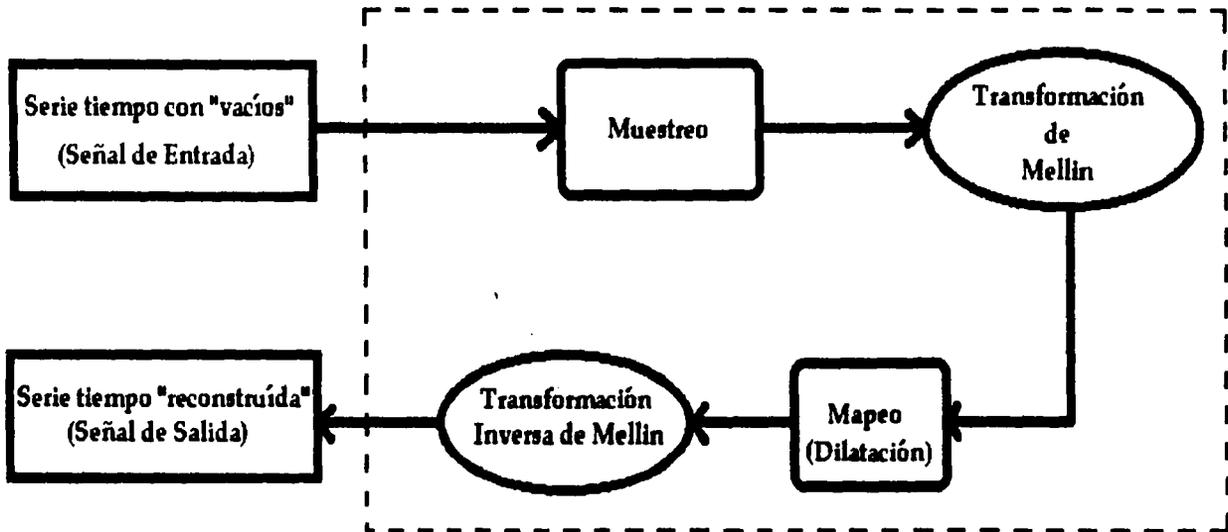


Figura 2.1 Diagrama de flujo utilizado en la reconstrucción numérica de las series de tiempo. La línea punteada encierra la etapa del Algoritmo de Dilatación de Mellin.

MEMO DE VALOR
 PAGA DE ORIGEN
 CON
 NO. 11111

§ 2.2.1 Serie temporal

La lluvia al igual que todos los hidrometeoros, es un fenómeno complejo: fluctúa en el tiempo y en el espacio. Con respecto al tiempo, los vacíos en el banco de datos de lluvia llevan a una intermitencia. Si la longitud del periodo no registrado es del orden de algunos días, la intermitencia de la serie tiempo de lluvia puede indeterminar el inicio de un régimen pluviométrico o la duración de la *canícula*. En estaciones con periodos de datos faltantes mayores a un mes, pueden surgir incertidumbres sobre sequías.

En principio, una serie temporal puede ser corregida mediante interpolación. La incertidumbre de una serie interpolada, es siempre menor a la incertidumbre resultante de operar sobre el conjunto de series cortas (McLowery, 1973).

§ 2.2.2 Representatividad

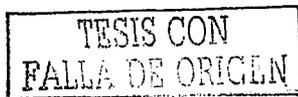
Los datos de lluvia procesados, en la mayoría de los casos (98 %) abarcan un periodo de 37 a 40 años. La selección de las estaciones, resultó en la ponderación de la longitud del periodo de tiempo y en la distribución espacial de los sitios. Se buscó la representatividad de la ubicación sobre el territorio veracruzano. En cuanto al tiempo, es comúnmente aceptado que esta longitud de periodo conduzca a una interpretación climatológica.

Concerniente a la confiabilidad de las observaciones, se adopta el criterio avalado por la Organización Meteorológica Mundial (Abbott, 1986): las estaciones climatológicas de referencia, a que se refiere la norma de calidad (WMO, 1988) son los observatorios meteorológicos del SMN². Aún más, el nivel de calidad de los datos, corresponde al utilizado en aplicaciones de planeación agrícola y validación de modelos climáticos (Bengtsson y Shukla, 1988).

§ 2.2.3 Anomalía media mensual

Se parte de la serie $P_t = \{P_1^{id}, P_2^{id}, \dots, P_k^{id}, \dots, P_n^{id}\}$. Cada término P_k^{id} representa la lluvia acumulada (mm) diaria en la estación "id". Luego entonces, la lluvia acumulada durante un intervalo mayor o igual a un mes resulta en:

² Para el caso de México, la base de datos más difundida es el "ERIC".



$$L_m^{id} = \sum_{k=1}^N P_k^{id} \quad 2.1$$

Aquí N representa el número de días correspondientes a m meses, donde $m = 1, 2, 3, \dots, M$; siendo M el número de meses con datos de lluvia de la estación "id". Así por ejemplo, L_{28}^{200} representa la lluvia acumulada en la estación $id = 200$ (p. Ej. *Atzalan*) hasta el mes de abril (mes = 4) inclusive, del tercer año de datos [$m = 2$ años \times 12 meses/años + 1 año \times 4 mes/año = 28 meses]. En una serie tiempo con μ -días de datos perdidos ($P_{q_i}^{id}$) al mes, adoptamos la representación:

$$L_m^{id} = (L_m^{id})' + P_{q_1}^{id} + P_{q_2}^{id} + \dots + P_{q_\mu}^{id} \quad 2.2$$

Donde la variable primada representa a la magnitud calculada sumando datos reales.

La anomalía media mensual de la lluvia, es la diferencia con respecto al promedio de largo plazo o normal climatológica de la estación $\langle L_m^{id} \rangle_c$:

$$[L_m^{id}]_{anom} = L_m^{id} - \langle L_m^{id} \rangle_c \quad 2.3$$

§ 2.2.4 Análisis espacial

El análisis de lluvia utilizado se basó en un cálculo numérico sobre mallas regulares. Se adoptó el algoritmo de interpolación del Método de Kriging (Oliver y Webster, 1990) sobre mallas localmente cartesianas λ, ϕ (longitud, latitud).

Se mantuvieron dos niveles de resolución espacial: $6'33'' \times 6'33''$ y $30' \times 30'$. Esto como resultado de diferenciar dos entornos: rural y urbano, respectivamente. Aunque se seleccionaron para el análisis estaciones sobre entornos rurales, y aún considerando la escasa proporción de localidades típicamente urbanas e industriales (2%) del Estado de Veracruz (GEV, 1999) se aplicó la menor resolución espacial ($30' \times 30'$) centrada en las regiones aledañas a *Coatzacoalcos* [Lon: $18^\circ 8'$, Lat: $94^\circ 28'$], *Minatitlán* [Lon: $17^\circ 57'$, Lat: $94^\circ 33'$], *Orizaba* [Lon: $18^\circ 52'$, Lat: $97^\circ 4'$] y *Poza Rica*

[Lon:20°33', Lat:97°28']. Esta medida, a la que se llegó mediante iteraciones sucesivas, resultó suficiente para evadir la influencia de la urbanización en la distribución media de isoyetas, al menos sobre las mencionadas regiones.

La influencia de la urbanización sobre la lluvia se deriva del forzamiento en la circulación local de los vientos asociado a la "isla de calor" sobre las ciudades. La elevada *capacidad calorífica* del entorno urbano (suelo y edificios) tiende a incrementar positivamente la *buoyancia* en la capa de aire sobre el centro de la ciudad. La baja presión asociada induce, por continuidad, convergencia de aire húmedo proveniente de la periferia (pasto y árboles) creando una eventual "isla de lluvia" (Jáuregui, 1974).

En cuanto a los reanálisis asociados a la lluvia, se tomaron compuestos de anomalías medias mensuales y anuales, a partir del protocolo de consulta remota del *Centro Nacional de Predicción Ambiental* de los Estados Unidos, NCEP. Conocidas las limitaciones de calidad de los reanálisis dentro de las regiones tropicales (Trenberth *et al.*, 2000) debido a la insuficiencia de datos, se limitó el uso de los compuestos al diagnóstico climático.

§ 2.2.5 Análisis temporal

El análisis temporal de la lluvia se basó en la descomposición espectral de las series de tiempo. Dado que se buscó tipificar impactos de la sequía e inundaciones ubicándolos con precisión en el tiempo, no se recurrió al análisis espectral simple: los diagramas de densidad y periodo (Figura 2.2) no contienen ese detalle. En reemplazo, se optó por aplicar el análisis de ondeletas³ (Pinsky, 2003; Percival y Walden, 2000).

Las ondeletas (*wavelets*, en inglés) son funciones matemáticas para el análisis de procesos dinámicos no-lineales (Ghil y Yiou, 1996) con perfiles de variabilidad sobre diversas escalas (Lin *et al.*, 1999). Las ondeletas se han aplicado al análisis del entorno físico del maíz (Brunet y Collineau, 1994) y recientemente, sobre series de tiempo del SOI (Kulkarni, 2000).

³ *Ondeletas* u *ondículas* son posibles traducciones del término en inglés *Wavelets*

MEMORIO DE VITAL
FALLA DE ORDEN
NOU EISEL

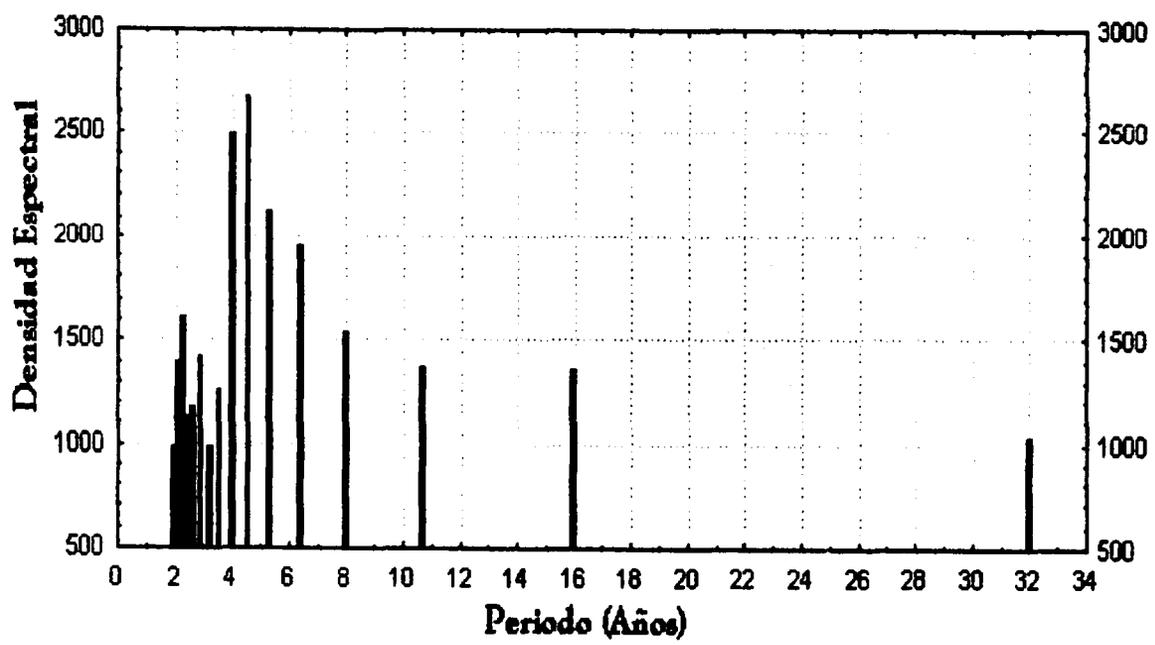


Figura 2.2 Densidad espectral de la lluvia diaria en la estación El Cardón [Lon: 98° 29' W, Lat: 21° 24' N] en el periodo 1961-1995. Cálculo numérico con STATISTICA (Statsoft, 1998). Fuente de Datos: SMN.

El análisis que resulta de la descomposición de una serie con ondeletas, es una técnica espectral que permite reconocer patrones propios de fluctuaciones climáticas, asociándoles tanto periodo como varianza (Figuras 2.3 y 2.4).

Después de aplicar el algoritmo numérico (ver Anexo D) en una etapa previa al análisis, se determinó que la ondeleta de Paul (Chabalko, 2001) resultó ser la más apropiada para mostrar patrones de periodicidad de la lluvia en la escala interanual. Usando el algoritmo numérico de la ondeleta de Paul, fueron procesadas 42 estaciones sobre Veracruz.

En una segunda etapa, la ubicación de las estaciones (Figura 2.5) permitió llegar a una regionalización de los periodos, para los máximos y mínimos de la varianza. Esto con el ya citado método de interpolación de Kriging. La regionalización de los periodos se encuentra en la Figura 3.14 del apartado 3.1. El primer apartado del capítulo tres, está dedicado en su totalidad a exponer los resultados asociados con el hidrometeoro lluvia (L).

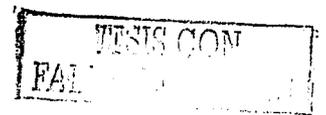
§ 2.3 Serie tiempo de temperatura mínima

La variable temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$) está definida como la temperatura mínima observada dentro del *abrigo meteorológico*. La lectura del termómetro de máxima y mínima se realiza una vez cada día en estaciones climatológicas convencionales.

Similar a lo enunciado en el apartado 2.2.2, los datos de temperatura mínima considerados como una serie tiempo, comprenden un periodo de aproximadamente 40 años, por lo que las medidas estadísticas condujeron a un significado climático.

Las fallas encontradas en la etapa de evaluación de calidad de los datos fueron: (1) Pérdida de información y (2) Cambio intempestivo de la fase con respecto al tiempo.

En cuanto a la pérdida de información, ésta se consideró nuevamente como un problema previo al análisis. Las dimensiones del problema con los datos de temperatura mínima, coincide con lo antes expuesto sobre los bancos de datos convencionales. La solución consistió en la aplicación del algoritmo de dilatación de Mellin, referido en el apartado 2.1.



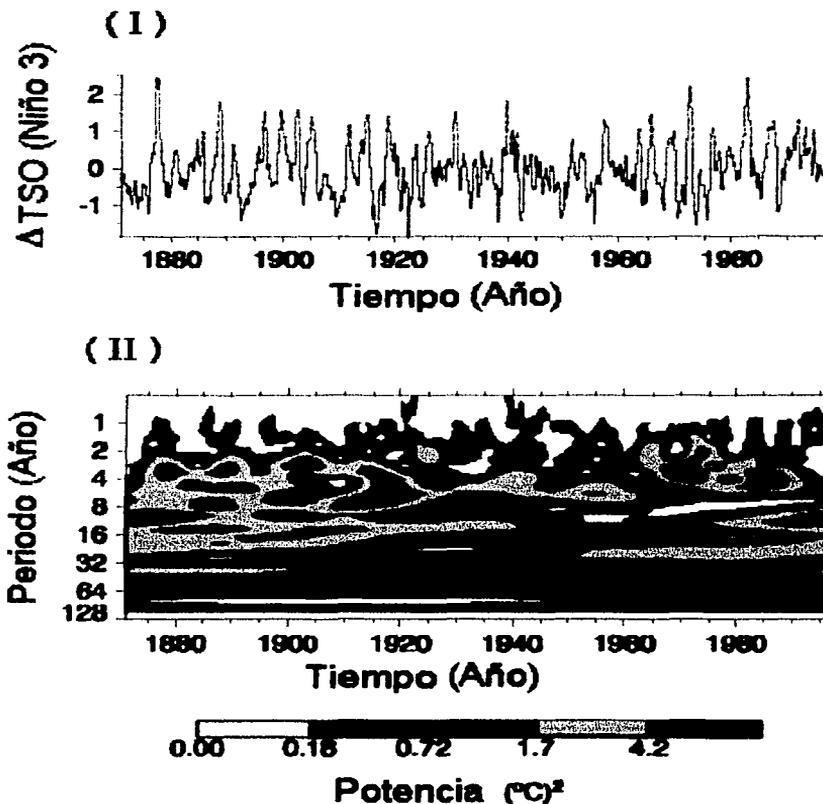
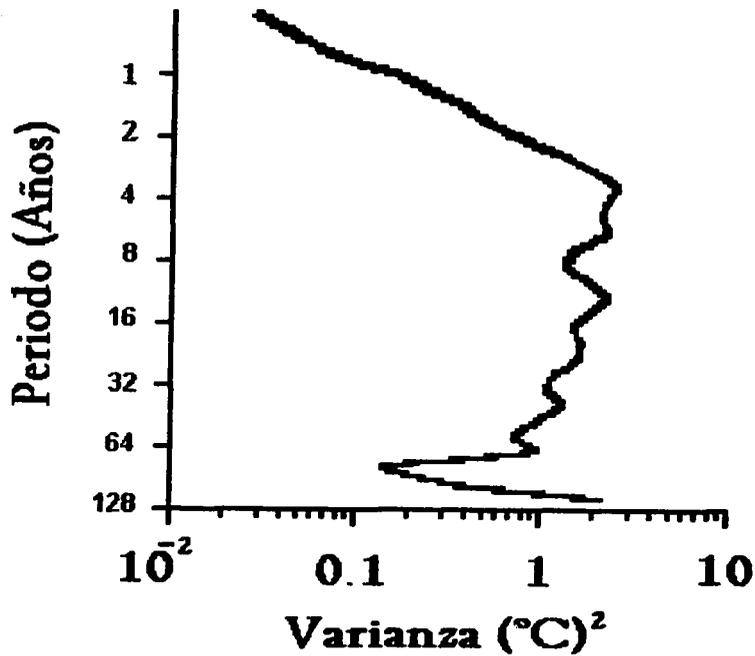
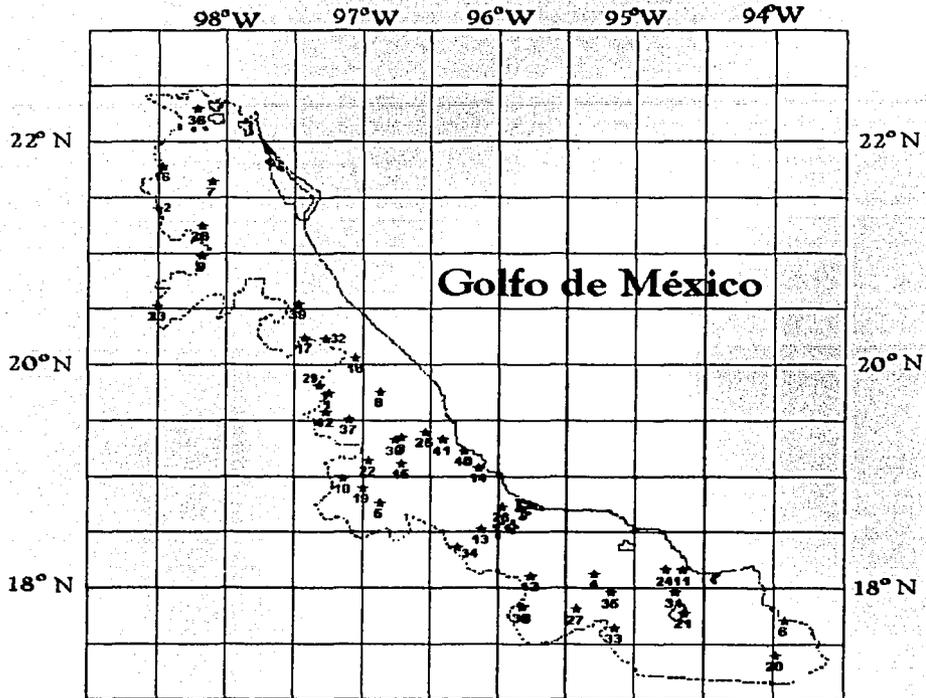


Figura 2.3 Serie temporal 1750–1985 de la anomalía de la temperatura superficial del océano (I) en la región *Niño 3*. Patrones de fluctuación generados por la *ondeleta* de Morlet (II). Fuente: Agencia Japonesa de Meteorología, JMA.



TESIS CON
FALLA DE CUBRILLO

Figura 2.4 Varianza asociada con los patrones de fluctuación de la Figura 2.3 Periodo: 1750-1985. Fuente: Agencia Japonesa de Meteorología, JMA.



- | | | |
|------------------|----------------------|--------------------|
| 1 Altotonga | 15 El Coyol | 29 Jalacingo |
| 2 Cardón | 16 El Higo | 30 Jalcomulco |
| 3 Cerro Colorado | 17 Espinal | 31 Jáltipan |
| 4 Cuautotolepan | 18 Fanal de Nauda | 32 Joloapan |
| 5 Cuichapa | 19 Fortín | 33 La Florencia |
| 6 Cuatláhuac | 20 Fco. Villa | 34 La Oranja |
| 7 Chicayán | 21 Hidalgotitlán | 35 La Lima |
| 8 Chiconquiaco | 22 Huatucaco | 36 La Michoacana |
| 9 Chicontepic | 23 Huayacocotl | 37 La Tembladera |
| 10 Chilapa | 24 Huazundán | 38 Playa Vicente |
| 11 Chinameca | 25 Idolos | 39 Pozo Rico |
| 12 Dobladero | 26 Ignacio de la Ll. | 40 Puente Jula |
| 13 El Barrio | 27 Independen. | 41 Puente Nacional |
| 14 El Tejar | 28 Ixcatepec | 42 Perote |

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.5 Localización de 42 estaciones climatológicas utilizadas en el análisis temporal de lluvia, con el método de las *ondeletas*. Fuente SMN.

El cambio intempestivo de fase en un régimen de temperatura mínima, indica una probable "anomalía" de la información. Esta falla es generada por lo común, al cambiar de ubicación la estación climatológica. Cuando la selección de un nuevo emplazamiento, se da al margen de una validación científica, suele introducir otro factor de control del microclima. Aunque claramente atribuible al nuevo balance de radiación y a la circulación de los vientos, se trata de un factor desconocido y altamente complejo, en respuesta a las particularidades del clima tropical continental. Ante esta situación, se optó por excluir estas series del conjunto útil.

El criterio de exclusión adoptado, se basó en la desviación media δT_i ($= T_i - \langle T \rangle_{mes}$) de la temperatura mínima diaria, con respecto al promedio mensual ($i = 1, 2, \dots, 30$). En los casos donde δT_i no se distribuyó normalmente con respecto a la media mensual, entonces la persistencia en el signo de la serie tiempo alternante $B_i = \{ \text{sgn}(\delta T_i), \text{sgn}(\delta T_{i+1}), \dots, \text{sgn}(\delta T_N) \}$ indicó una eventual falla en los datos.

$\tau_i = u(\delta T_i)$ es un parámetro auxiliar que representa la evaluación de la función escalón unitario [*i.e.*, $u(\zeta) = 0$; si $\zeta \leq 0$ \vee $u(\zeta) = 1.0$; si $\zeta > 0$] de la desviación media. Así, para determinar si la serie tiempo es de mala calidad, se aplica una prueba de homogeneidad de datos. Esta prueba es estadística y consiste en verificar que la serie alternante B_i se distribuya normalmente, identificando los casos con persistencia. El Algoritmo de Verificación del Cambio Intempestivo de Fase (AVCIF) tiene dos condiciones de frontera:

$$\sum_{i=j+1}^{j+v} \tau_i = 0 \quad \vee \quad \sum_{i=j+1}^{j+v} \tau_i > v \quad 2.4$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, N-v$$

Las condiciones marcan la persistencia de v términos negativos consecutivos y v términos positivos consecutivos, respectivamente. El algoritmo de verificación fijó el margen de tolerancia en $v = 7$. Esto de acuerdo con lo adoptado en metodologías similares, aplicadas sobre datos de estaciones convencionales del Estado de Tlaxcala (Orozco, 2000).

Con las series de temperatura mínima seleccionadas con esta metodología, se procedió a relacionar la frecuencia de las heladas y el *periodo libre* con la marcha del SOI y la TSO del Golfo de México. Esta relación se llevó a cabo comparando las

ELABORADO CON
FALLA DE ORIGEN

fases de cada serie temporal. Se adoptó como criterio general⁴, que la helada apareció sobre el sitio de la estación sólo hasta alcanzarse 0° C.

§ 2.4 Serie tiempo de granizo

El granizo también es considerado como un hidrometeoro complejo. Se sabe que la complejidad está asociada con la frecuencia y duración de esta forma de precipitación. El granizo suele presentarse durante la etapa de desarrollo de una tormenta, en conjunción con relámpagos, precipitación intensa y viento arrachado. El efecto de las partículas de hielo sobre la vegetación, también es complejo. El amplio rango de velocidades de caída está asociado directamente con la diversidad de alturas de caída, formas y tallas de las partículas (Pruppacher y Klett, 1978). En síntesis, la observación del fenómeno, implica una variable multidimensional (vector). No obstante, los estándares de observación convencional suelen reducirla a unidimensional binaria.

En consecuencia, y en una primera aproximación, se adoptó la representación del hidrometeoro conforme aparece en el banco de datos del SMN: presencia ($G = 1$) y ausencia ($G = 0$). En estaciones convencionales de superficie, el periodo de observación del granizo es de 24 horas.

En la etapa previa de evaluación de calidad, la falla encontrada consistió en pérdida de información, aunque en mucho menor proporción a lo ocurrido a los datos de lluvia y temperatura mínima. Se aplicó el algoritmo de dilatación de Mellin como método de interpolación, conforme se especificó en el apartado 2.1.

§ 2.5 Función de rendimiento del cultivo

El rendimiento del maíz es una variable dependiente del espacio y del periodo agrícola. Para todo distrito de desarrollo rural, el rendimiento se midió en proporción directa al *área siniestrada*:

$$A_{\text{sin}}(k, \Delta t) = A_{\text{sem}}(k, \Delta t) - A_{\text{cos}}(k, \Delta t) \quad 2.5$$

⁴ Este criterio tiene asociada la incertidumbre termométrica del abrigo meteorológico, con respecto a la intemperie.

Donde $A_{\cos}(k, \Delta t)$ es el área cosechada en el k -ésimo DDR ($1 \leq k \leq 12$) al final del periodo agrícola Δt . Dado que el área sembrada $A_{sem}(k, \Delta t)$ es una función de factores tales como la extensión territorial, "rotación" del cultivo y espacio ocupado por los cuerpos de agua superficial, se tomó como indicador el cociente relativo porcentual I_{ren} :

$$I_{ren}(k, \Delta t) = \frac{A_{sem}(k, \Delta t) - A_{sin}(k, \Delta t)}{A_{sem}(k, \Delta t)} \times 100 \quad 2.6$$

Bajo este enfoque, el máximo rendimiento estará representado por $I_{ren}(k, \Delta t) = 100\%$ y el mínimo por $I_{ren}(k, \Delta t) = 0\%$. En el caso general:

$$I_{ren}(l_1, \Delta t) \leq I_{ren}(l_2, \Delta t) \leq \dots \leq I_{ren}(l_{12}, \Delta t) \quad 2.7$$

En donde $l_{r-1} \leq l_r \leq l_{r+1} \Leftrightarrow I_{ren}(l_{r-1}, \Delta t) \leq I_{ren}(l_r, \Delta t) \leq I_{ren}(l_{r+1}, \Delta t)$ representa la jerarquía de orden inducida por la función de rendimiento, que en un sentido matemático (Hildebrand, 1976) resulta monótona. En síntesis: la función de rendimiento del cultivo se estableció como una regla de correspondencia, entre cada DDR y el respectivo I_{ren} .

Se consideró que aplicado como método, el cálculo de índices de rendimiento pudiera resultar útil para el diagnóstico de la forma y nivel del impacto por variabilidad climática interanual. En un ejercicio ilustrativo, la gráfica de la función de rendimiento I_{ren} fue suficiente para mostrar diferencias entre una familia de índices aleatorios normalmente distribuidos (Figura 2.6) y los índices calculados con datos reales (Figuras 2.7 y 2.8) estos últimos tomados del sistema de información agropecuaria de Veracruz.

§ 2.6 Síntesis de la metodología

Como se expresó en el apartado 1.1, se busca caracterizar el impacto de los hidrometeoros en el rendimiento del maíz. Esto a partir de analizar estadísticamente series de tiempo de datos meteorológicos en superficie. La metodología aplicada es variada (Figura 2.9). Por las imperfecciones encontradas en el banco de datos, la metodología inicia en la depuración de la información que abarca el análisis espacial y temporal.

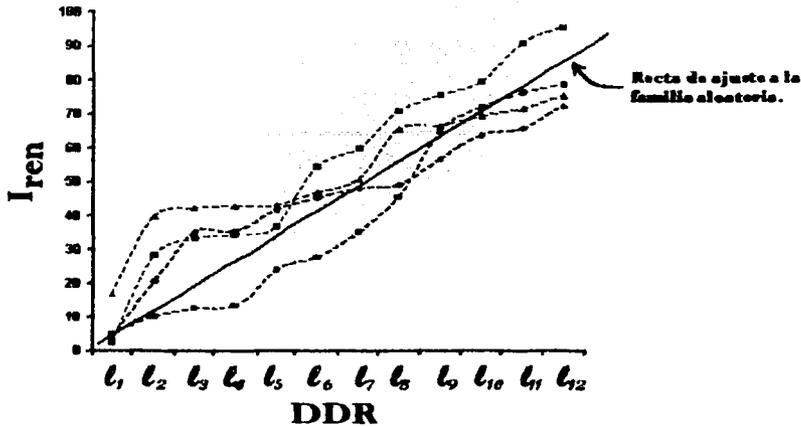


Figura 2.6 Ejemplo de la representación gráfica de la función de rendimiento. Se muestra la tendencia de cuatro familias de índices aleatorios. Cada rendimiento es igualmente probable. En el eje horizontal aparecen los distritos en orden creciente de rendimiento.

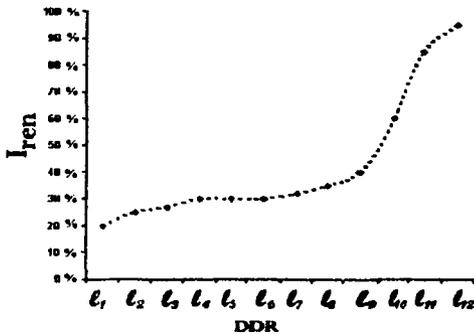


Figura 2.7 Ejemplo de gráfica de rendimiento con un año de datos reales del SIA. Los rendimientos en el 75 % de los DDR, por debajo del 50 %.

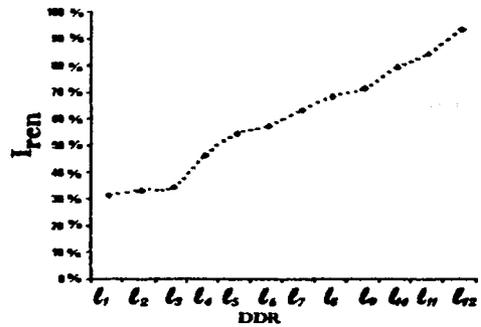
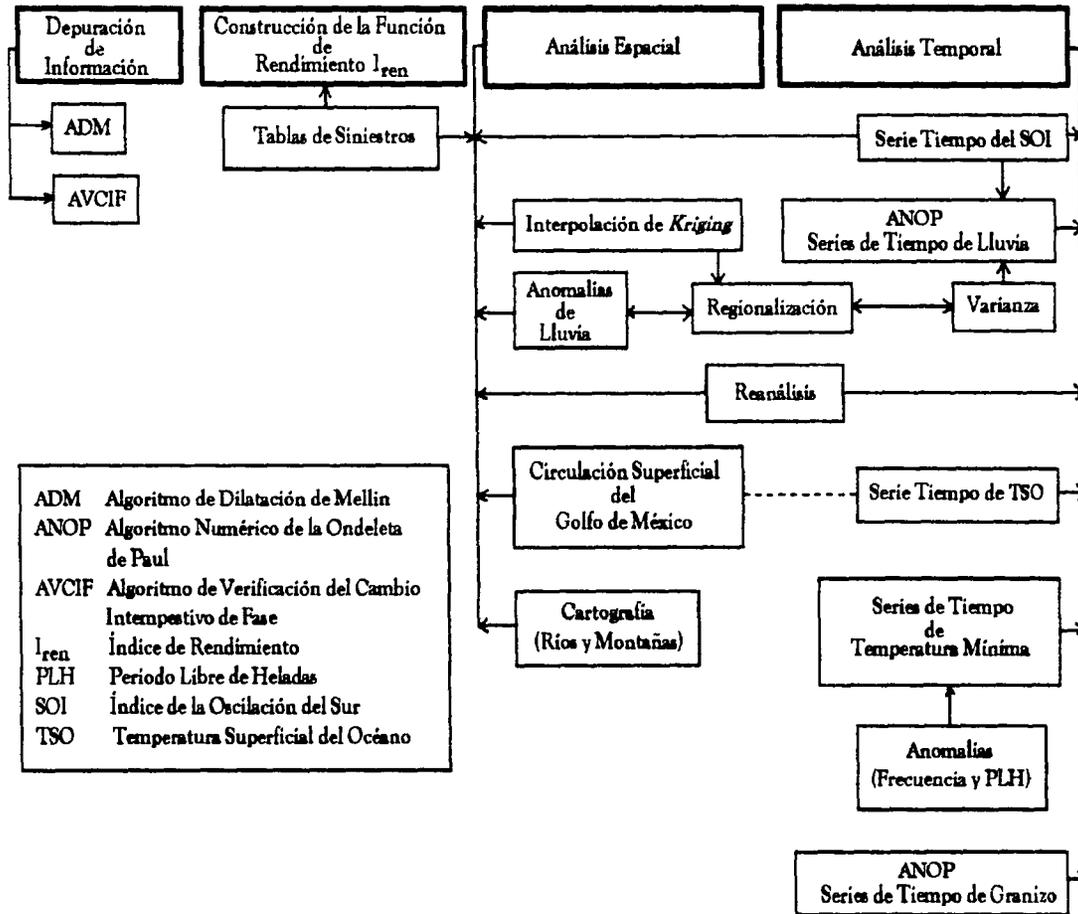


Figura 2.8 Similar a la Figura 2.7, pero aquí el 30 % de los DDR, por debajo del 50 %.

METODOLOGÍA



ADM	Algoritmo de Dilatación de Mellin
ANOP	Algoritmo Numérico de la Ondeleta de Paul
AVCIF	Algoritmo de Verificación del Cambio Interpestivo de Fase
I _{ren}	Índice de Rendimiento
PLH	Periodo Libre de Heladas
SOI	Índice de la Oscilación del Sur
TSO	Temperatura Superficial del Océano

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 2.9 Diagrama de flujo de la metodología aplicada.

La depuración de la información en la etapa previa al análisis (apartado 2.3) incluyó a las variables (1) temperatura mínima (2) lluvia y (3) granizo:

1.- Para la temperatura mínima se analizaron las series de 35 estaciones. Se halló que sólo dos de éstas 35 series temporales excedieron el margen de tolerancia $v=7$ (ecuación 2.4) reduciéndose el conjunto a 33 estaciones. También se remedió la discontinuidad de las series de temperatura mínima de 33 estaciones con el algoritmo de dilatación de Mellin. El intervalo mínimo de discontinuidad encontrado fue de un día y el intervalo máximo de tres meses.

2.- La depuración de la lluvia se aplicó a series de 42 estaciones. Se remedió la discontinuidad de las series de lluvia de éstas 42 estaciones con el algoritmo de dilatación de Mellin. El intervalo mínimo de discontinuidad encontrado fue de un día y el intervalo máximo de cuatro meses.

3.- La depuración de los datos de granizo se aplicó a series de 40 estaciones. Se remedió la discontinuidad de las series de granizo en cinco estaciones con el algoritmo de dilatación de Mellin. El intervalo mínimo de discontinuidad encontrado fue de un día y el intervalo máximo de 20 días.

En cuanto al análisis espacial de lluvia (apartado 2.2.4) se analizaron las anomalías sobre 16 años: 1961, 1967, 1970, 1971, 1972, 1974, 1977, 1979, 1982, 1983, 1988, 1989, 1991, 1995, 1997 y 1998. De este conjunto sólo se mostrarán un año típico de *El Niño* (Figura 3.5) y un año típico de *La Niña* (Figura 3.24). Esto responde sólo a cuestiones de simplicidad, evitando un exceso de figuras.

El análisis temporal de lluvia (apartado 2.2.5) se basó en el algoritmo numérico de la ondeleta de Paul y se aplicó para descubrir rasgos de variabilidad en el tiempo y para regionalizar impactos.

Finalmente, se tiene que el número de estaciones consideradas para analizar el impacto de cada uno de los tres hidrometeoros, es variable. En el análisis temporal de lluvia se usó información de 42 estaciones (Figura 2.5). En cuanto a las heladas, se utilizaron sólo las series temporales de 14 estaciones (Figura 3.26). Esto en

proporción a la fracción de territorio⁵ donde se observa el fenómeno y al impacto sobre la función de rendimiento I_{ren} . Para el caso del granizo se analizaron series temporales de 40 estaciones (Tabla 3.3). De estas 40 estaciones sólo 13 se utilizaron, en proporción a la fracción de territorio donde se observa el fenómeno y al impacto sobre la función de rendimiento I_{ren} .

⁵ Área con al menos una *helada meteorológica* al año entre área total dedicada a la siembra de maíz de temporal.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 3

RESULTADOS

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

§ 3.1 Lluvia y tormentas eléctricas

Se encontró que las tormentas de verano dominan por su cuantía¹ sobre otras condiciones y formas del hidrometeoro. Esto aparece en un análisis comparativo del ciclo anual medio de tormentas eléctricas, usando datos convencionales de los estados costeros del Golfo de México y el Estado de Tlaxcala (Figura 3.1). Veracruz destaca tanto por (a) el máximo de 4 días·mes⁻¹ como por (b) el período de 7 meses con tormentas.

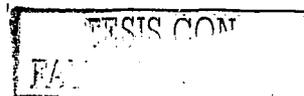
La precipitación media mensual sobre todo el estado (Figura 3.2) indica que el mes más lluvioso es septiembre (289 mm) y el más seco es marzo (34 mm). La estación que registró más lluvia en el mes de septiembre fue *Coyame* [Lon: 95° 1', Lat: 18° 26', Alt: 335 m] en el año 1969, alcanzando 1663 mm, y con mayor lluvia en marzo la estación *Las Perlas* [Lon: 94° 55', Lat: 17° 25', Alt: 100 m] en 1988, alcanzando 886 mm. Este hecho común antecedió a un revisión exhaustiva de rangos de variabilidad de la lluvia con la información disponible, confirmándose que la amplitud de rango también se manifiesta estadísticamente.

Usando la misma fuente de información, se tiene que durante *El Niño* aparece un máximo menor (3.6 días año⁻¹) en promedio (Figura 3.3). En años de *El Niño*, predominan las anomalías negativas de la lluvia (*sequías meteorológicas*) sobre las inundaciones. Durante el año 1972 (Figura 3.4) – considerado como un año en el que inicia o “entra” *El Niño* (a) – la agricultura de temporal de Veracruz fue afectada, puesto que sólo se presentaron lluvias ligeras durante ese verano. Para septiembre (Figura 3.5) el norte, centro y parte del sur del estado reportaron daños en los cultivos de temporal, principalmente en el maíz (SIA, 1999).

Estadísticamente, la presencia de *El Niño* se asocia con una extensa anomalía positiva de la radiación de onda larga: abarca casi por completo el territorio nacional (Figura 3.6). Los valores medios máximos se distribuyeron en torno a los 22° N. Con respecto a Veracruz, estos valores se encontraron sobre los distritos rurales de Pánuco, Tuxpan, Huayacocotla y Martínez de la Torre.

Con base en el proceso físico de la radiación térmica y de su balance dentro de la atmósfera real, la anomalía positiva de la radiación emergente de onda larga llevó a considerar

¹ Número de siniestros por ciclo agrícola.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Ciclo Anual de Tormentas Eléctricas

Zona Costera del Golfo de México

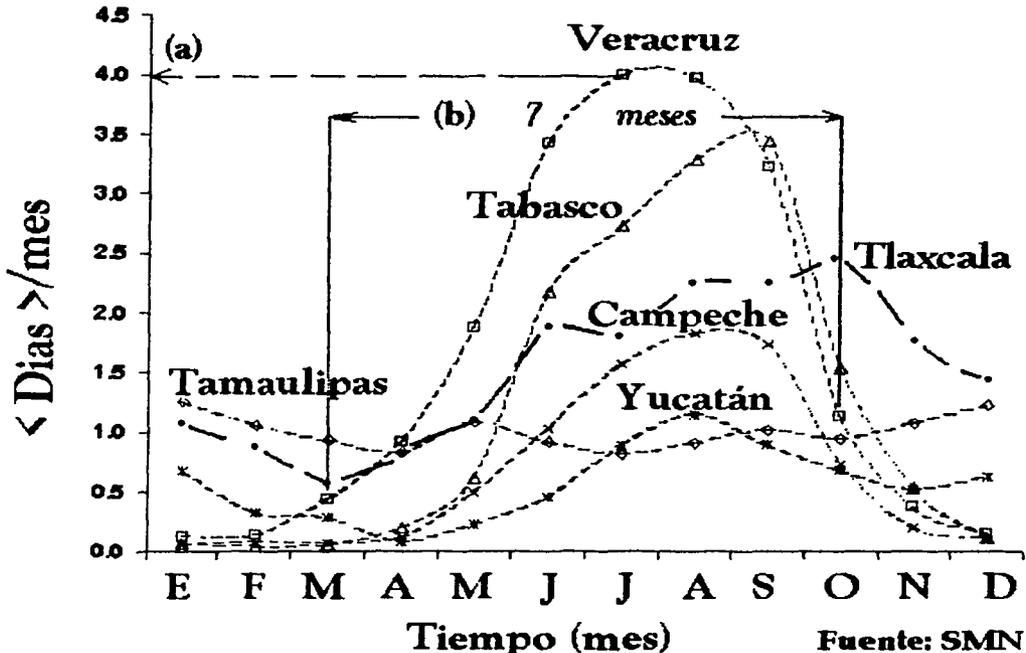


Figura 3.1 Ciclo medio anual de días con tormenta eléctrica en los estados costeros del Golfo de México más Tlaxcala, usando cuarenta años de datos de superficie: 1960–1999. (a) El máximo de 4 días al mes con tormentas se presenta sobre Veracruz. (b) Destaca también el periodo de aproximadamente 7 meses. Los datos diarios indican que inicia a mediados de marzo y concluye en la última semana de octubre. Fuente: SMN.

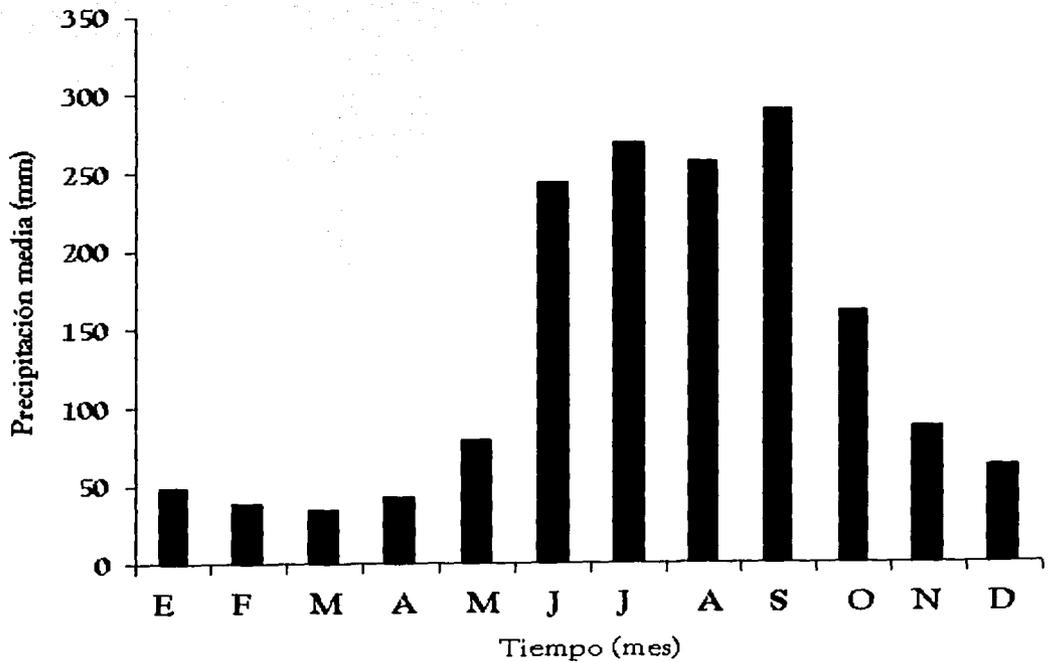


Figura 3.2 Ciclo anual de la lluvia en el Estado de Veracruz. Fueron promediados datos de 214 estaciones pluviométricas en el periodo 1961-1997. Fuente: SMN.

TRABAJO CON
FALLA DE ORIGEN

Estado de Veracruz

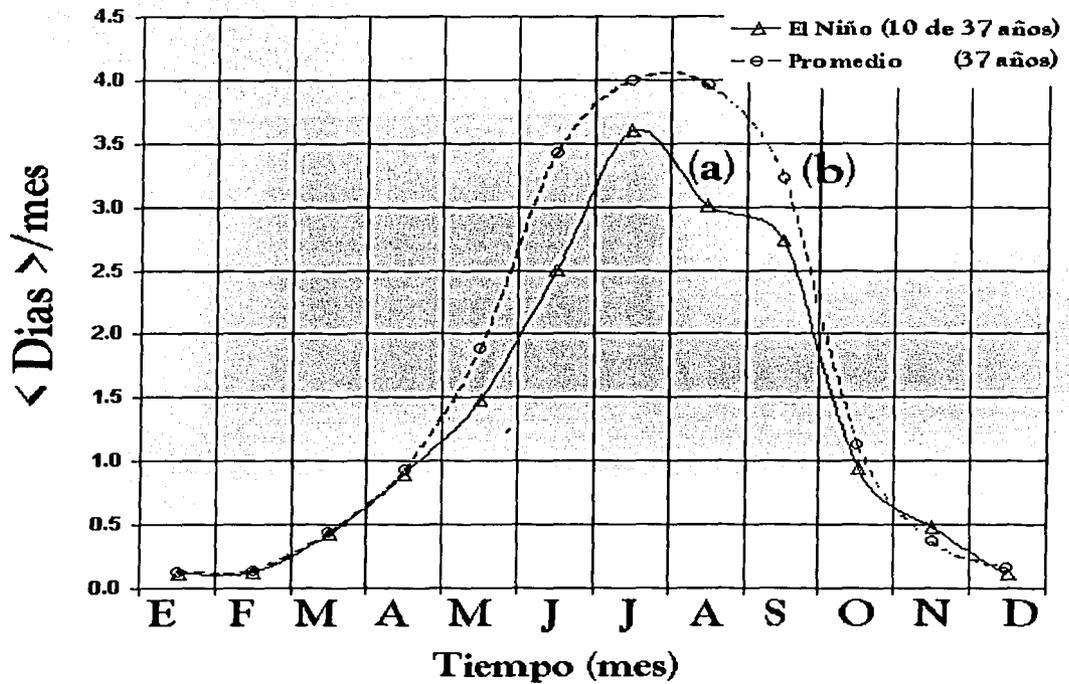


Figura 3.3 (a) Distribución media mensual del número de días con tormenta eléctrica en años de *El Niño* y (b) distribución promedio sobre periodo 1961–1997. Fuente: SMN.

ÍNDICE DE OSCILACIÓN DEL SUR 1950 - 2000

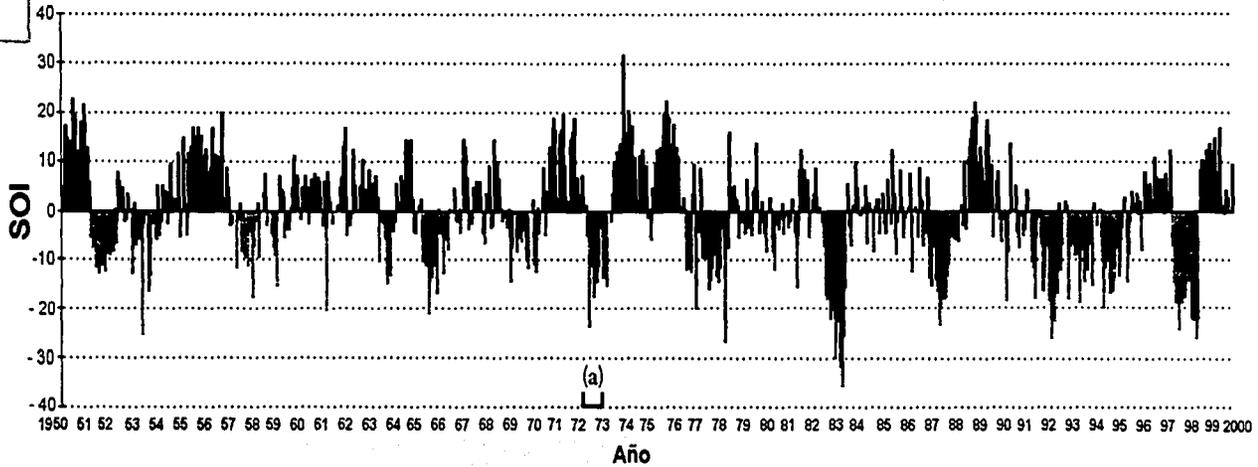


Figura 3.4 Serie tiempo media mensual del SOI entre 1950 y el año 2000. En el segundo semestre (a) de 1972 la tendencia del SOI fue hacia *El Niño*, manteniéndose esa fase del ENOS durante 1973. Fuente: Agencia Japonesa de Meteorología, JMA.

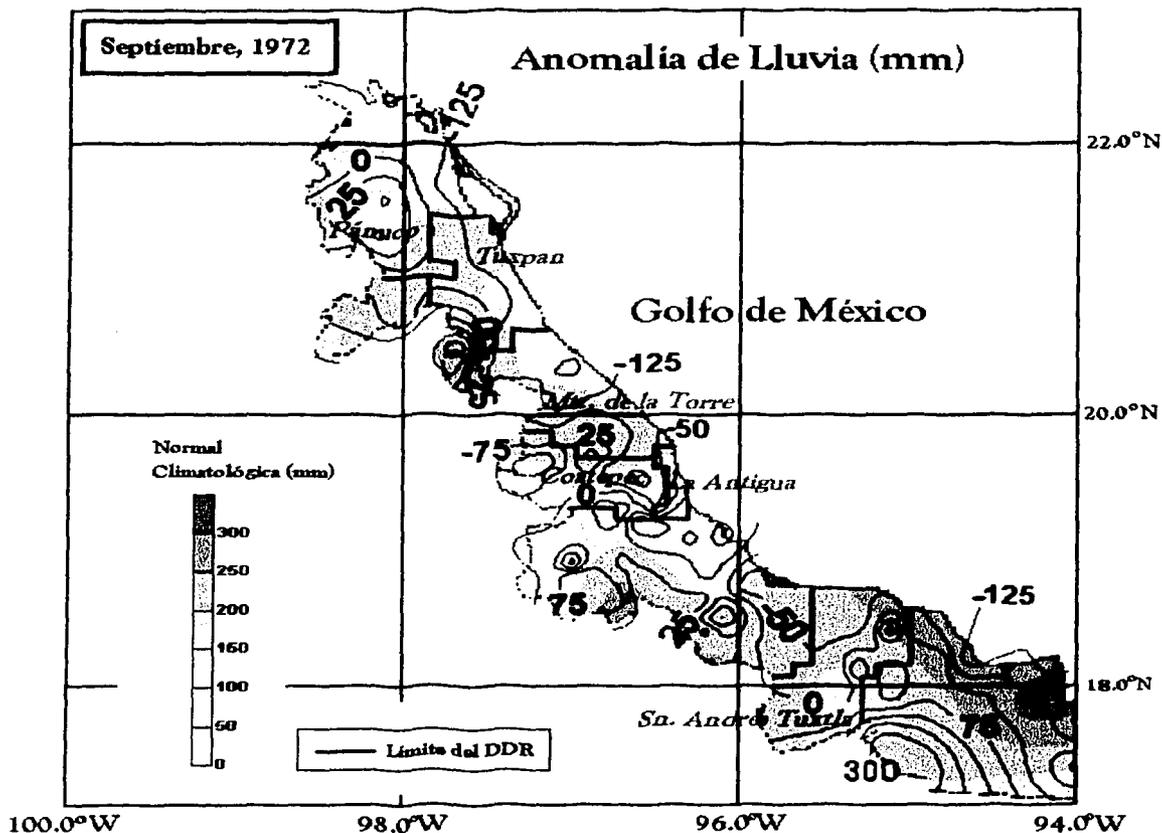


Figura 3.5 Anomalia de lluvia media mensual en septiembre de 1972. Los distritos que reportaron siniestros en el maíz, a causa de la sequía fueron: *Pánuco*, *Tuxpan*, *Martínez de la Torre*, *La Antigua*, *Coatepec* y *San Andrés Tuxtla*. Todos con anomalías mayores a 50 mm. Fuente: SMN y Climatología *East Anglia* (New et al, 1999).

TECIE CON
FALLA DE ORIGEN

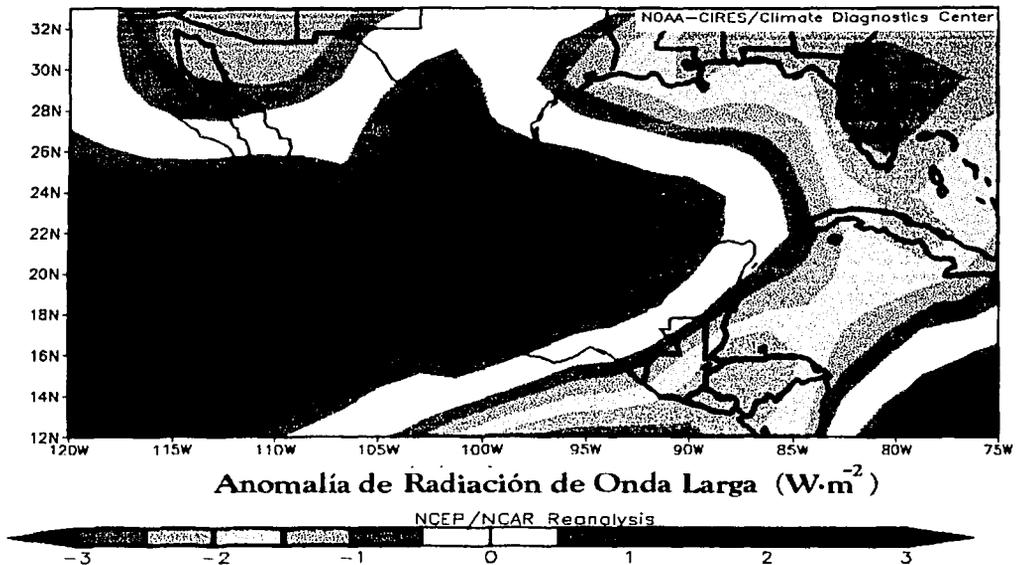


Figura 3.6 Compuesto de la anomalía del flujo de radiación emergente de onda larga, sobre años de *El Niño* con $SOI < -10$. La zona norte de Veracruz, se encuentra entre aquellos sitios de la República Mexicana con mayores anomalías. Fuente: Datos de reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996).

un déficit en la nubosidad total sobre la zona. En consecuencia de este déficit se justifica la *anomalía negativa* de la lluvia.

Se halló un cambio en la circulación troposférica asociada a la anomalía de precipitación. Específicamente, en la zona del Golfo de México [17 a 31° N; 80 a 98° W] los vientos (Figura 3.7) experimentan en promedio una disminución de intensidad (a). En cuanto a la dirección del flujo durante *El Niño*, se reflejó en los *reanálisis* un ligero cambio hacia el este ($\approx 2^\circ$) con respecto a los valores climatológicos medios (b). En cuanto a las condiciones superficiales del Golfo de México, se encontró que la anomalía anual de la *temperatura superficial del océano* en el bienio 1972-73 fue prácticamente nula (Figura 3.8).

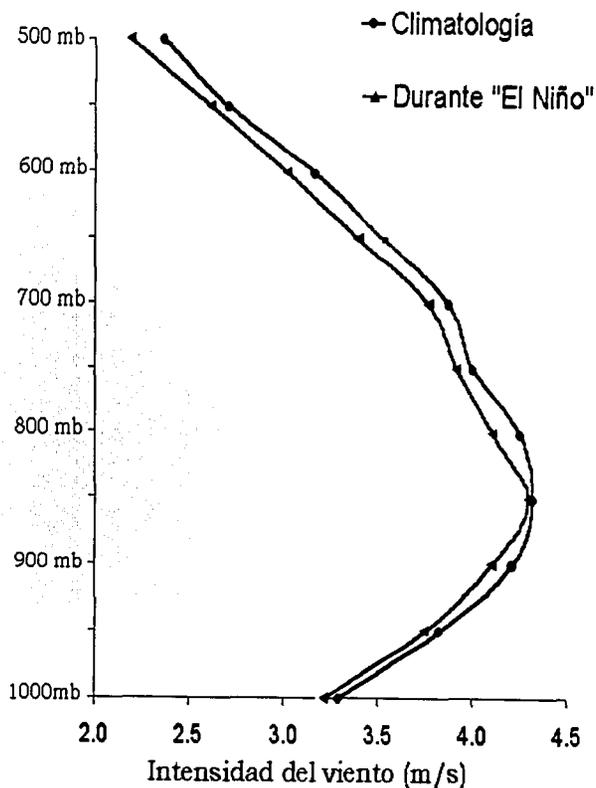
El fenómeno de *El Niño* no impactó uniformemente a la lluvia de Veracruz. Esto se verificó en diez años de *El Niño* entre 1961 y 1997, de los cuales el bienio 1972-73 es un caso particular. Los *reanálisis* por ejemplo, mostraron la existencia de una modulación de la precipitación por latitud (Figura 3.9). Este resultado puede llevarse a una interpretación simple, pues el territorio veracruzano es semejante a una estrecha franja alineada de norte a sureste.

De la aplicación del método de análisis con *ondeletas*, se obtuvo información detallada de las fluctuaciones temporales de la precipitación, como función del tiempo y de la estación pluviométrica (Figuras 3.10 y 3.11). Esto sirve para relacionar las fluctuaciones de la lluvia con siniestros del maíz, asociándoles un probable periodo de recurrencia. En cuanto a los efectos de *El Niño*, se hallaron patrones de sequía (Figura 3.12) de tres, cinco y 20 años (b), fuertemente correlacionados con *siniestros* en la producción de maíz por sequías (c). Estos patrones de sequía se encuentran asociados a la variabilidad del fenómeno de *El Niño y la Oscilación del Sur*.

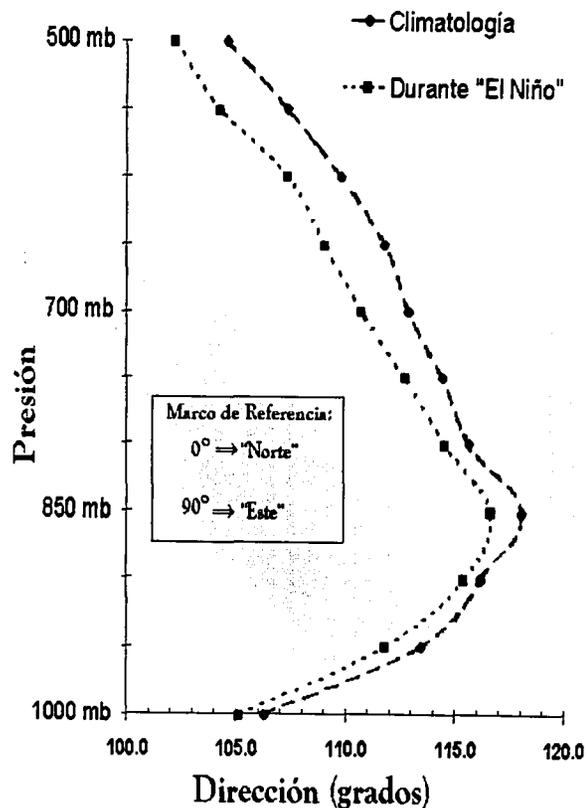
La correlación entre las lluvias de verano y el fenómeno de *El Niño y la Oscilación del Sur*, posterior a la exploración de series con *ondeletas*, es una contribución de actualidad (Torrence y Webster, 1998; Magaña, 1999). En particular se han vinculado fenómenos climáticos en la escala decadal.

La comparación entre el *índice de oscilación del sur* y el déficit de producción del maíz, condujo a una correspondencia implícita entre la *sequía meteorológica* y la *sequía agrícola*. La primera sequía vinculada sólo a *anomalías negativas* de lluvia, mientras que la última es ligada a otros factores del balance de humedad. La correspondencia

(a)



(b)



44

Figura 3.7 Promedios de (a) Intensidad y (b) dirección de los vientos de verano (JJA) sobre el Golfo de México con diez años de *El Niño*, en comparación con la valores climatológicos de 37 años. Fuente: Reanálisis NCEP-NCAR (Kalnay *et al*, 1996).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

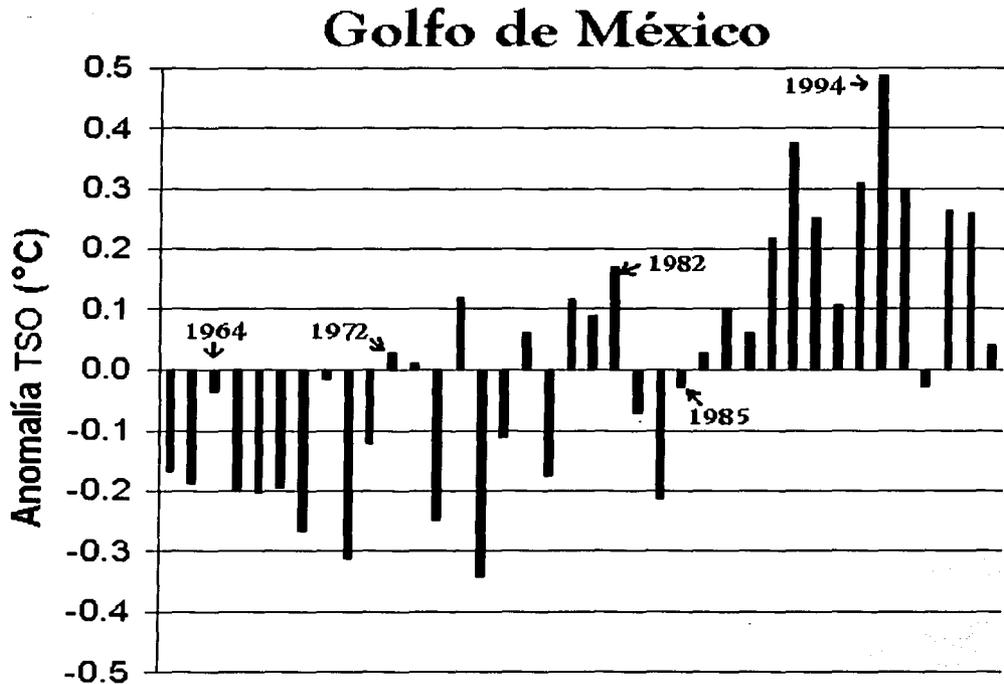


Figura 3.8 Serie de anomalías de la temperatura superficial del océano (TSO) del Golfo de México en el periodo 1962–1999. En el bienio 1972–73 la anomalía fue muy pequeña. Fuente: NSIPP–NASA (Casey y Cornillon, 1999).

COPIA CON
 FALLA DE ORIGEN

Impacto de "El Niño" en la Precipitación de Veracruz

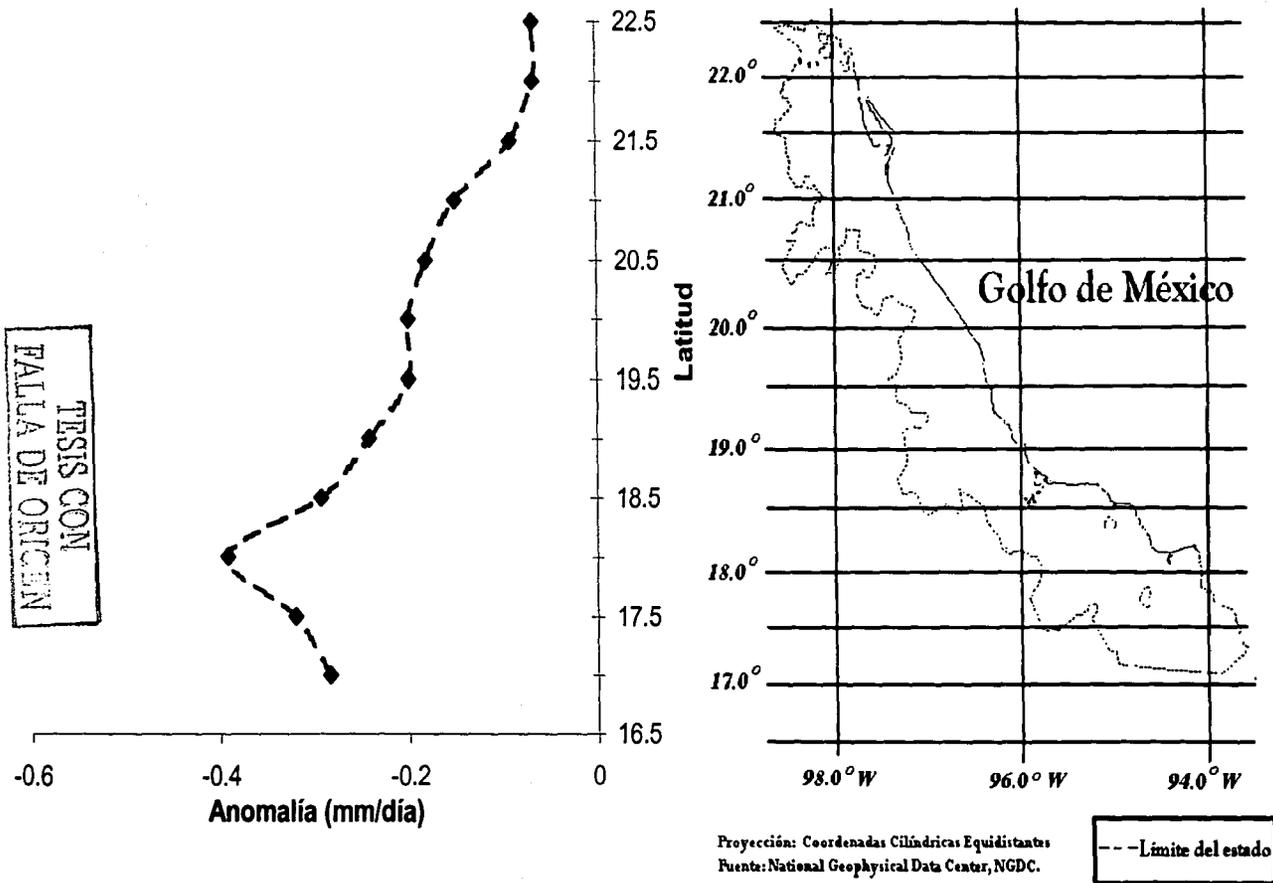


Figura 3.9 Anomalia promedio de precipitación (mm /día) sobre el Estado de Veracruz en el periodo 1961–1999, en condiciones de *El Niño* (10 de 37 años). La ecuación de ajuste lineal es: $anomalía = 0.0616 \cdot latitud - 1.4239$. Fuente: Datos de reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay *et al*, 1996).

El Cardón, Ver. [Lon: 98° 29' W, Lat: 21° 24' N]

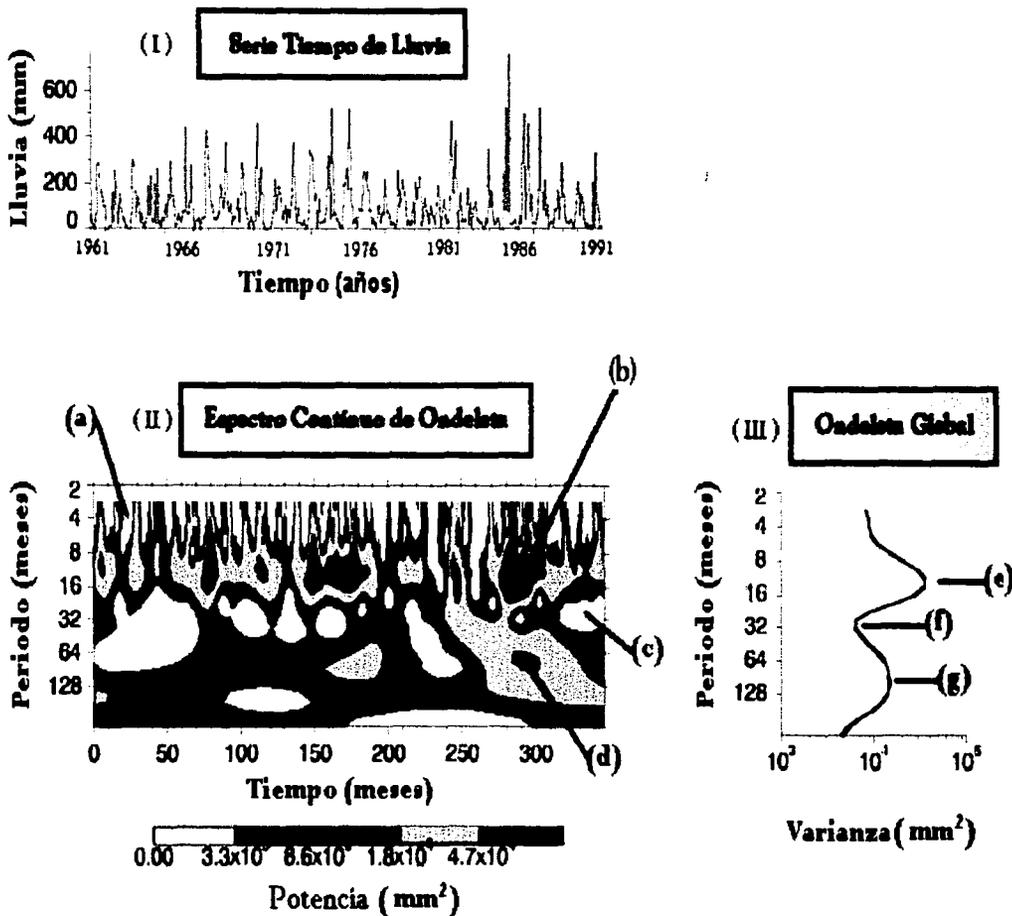
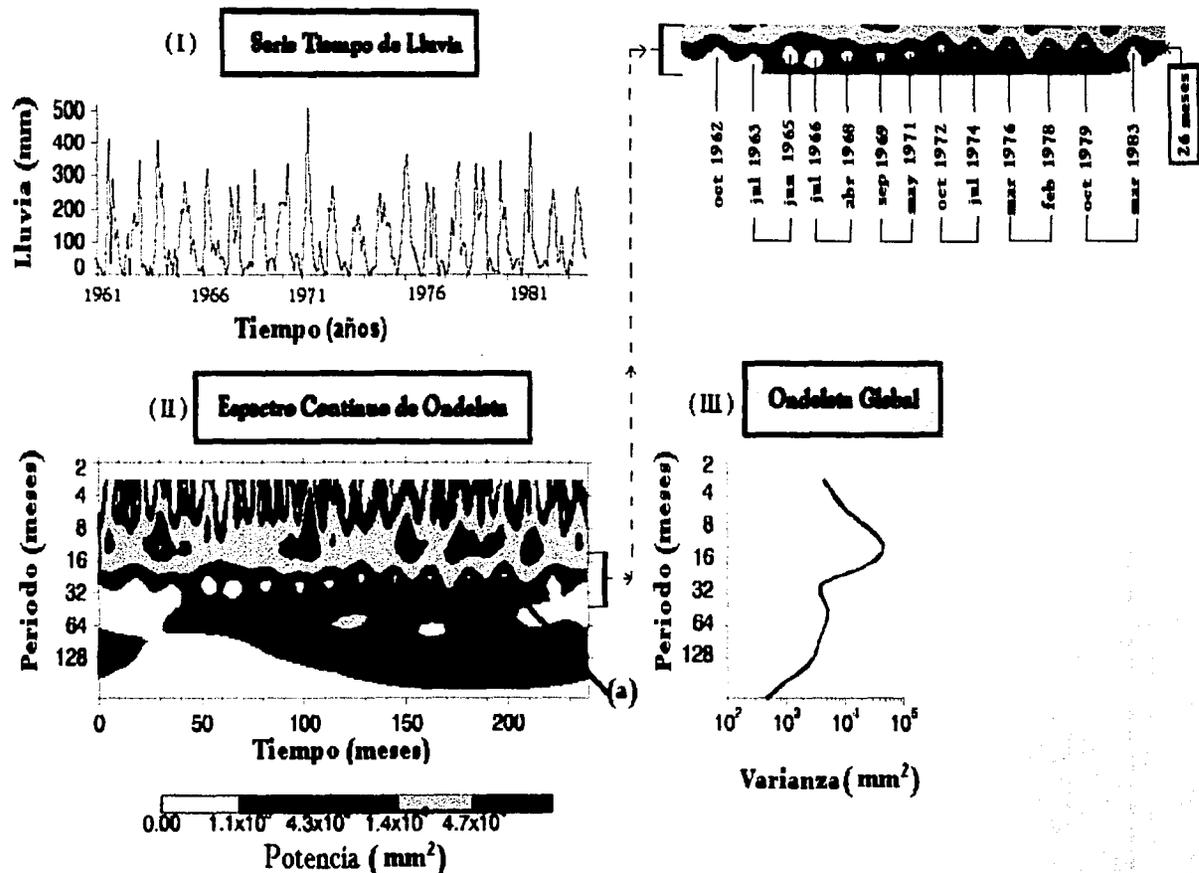


Figura 3.10 (I) Serie tiempo 1961-1991 de lluvia acumulada mensual en la estación *El Cardón*. (II) Descomposición de la serie en un espectro continuo, utilizando *ondeletas*. (a) Patrón de baja potencia asociado con lluvia inferior a 100 mm. Los máximos (> 300 mm) aparecen como patrones de alta potencia en (b). Son identificados periodos mayores (c, d). (III) Ondeleta global del espectro continuo con dos máximos (e, g) y un mínimos (f) de varianza.

El Dobladero, Ver. [Lon: 95° 46' W, Lat: 18° 7' N]



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS DEL ESTADO DE VERACRUZ

Figura 3.11 (I) Descomposición de la serie tiempo 1961-1983 de precipitación acumulada mensual en la estación *El Dobladero*. (II) Descomposición de la serie en un espectro continuo utilizando *ondeletas*. (a) Patrón de baja potencia asociado con una sequía cuasi-periódica (≈ 24 meses). (III) Ondeleta global del espectro continuo.

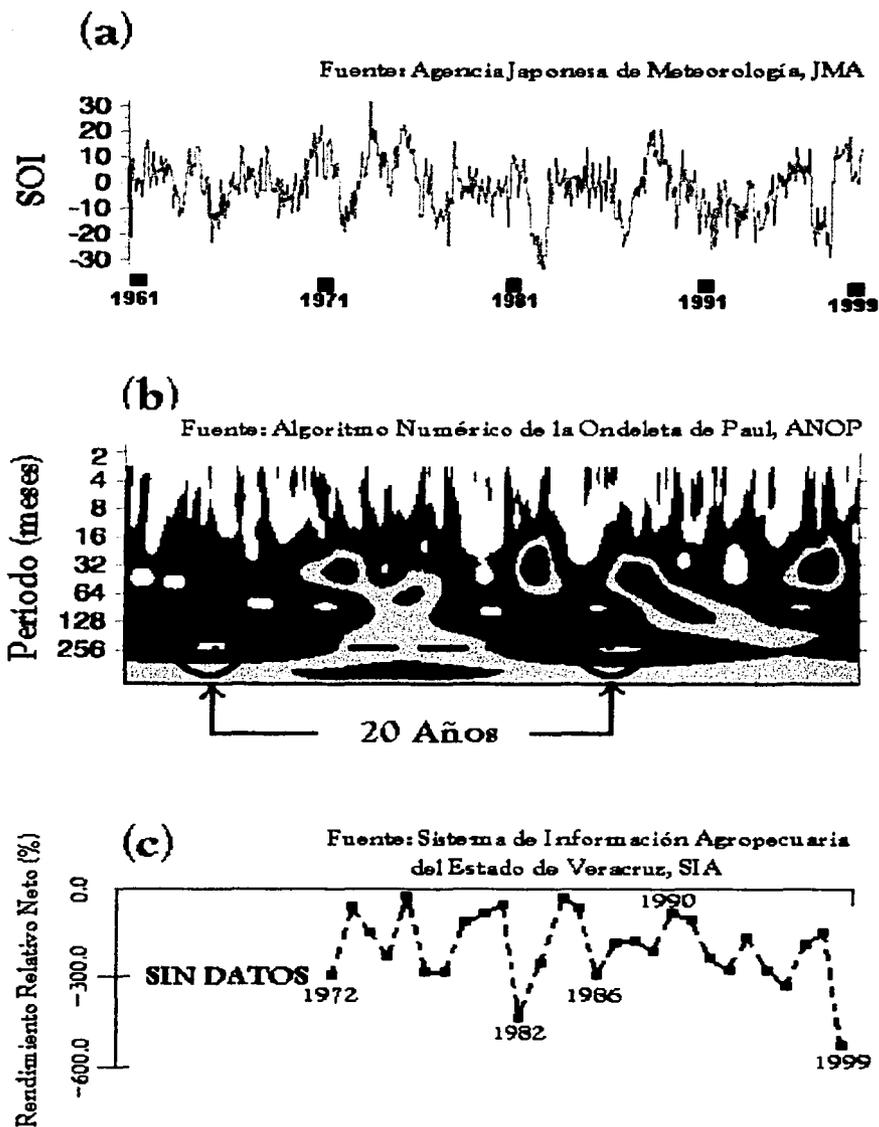


Figura 3.12 (a) Serie tiempo 1961–1999 del SOI. (b) Descomposición de la serie del SOI con *ondeletas*. (c) Serie tiempo 1972–1999 de siniestros del maíz en Veracruz.

entre estos tipos de sequía, sugerida al inicio de la investigación por ser el maíz un cultivo de temporal, resultó ahora cuantificado estadísticamente.

Contraparte en la discusión es la falta de "balance algebraico" de la variable perturbada $SOI = \langle SOI \rangle + \langle SOI' \rangle$ sobre el periodo analizado, dado que el término de fluctuación SOI' no se anula: $\langle SOI' \rangle \neq 0$. Entre 1961 y 1980, $\langle SOI' \rangle = 1.0$. Entre 1961 y 1996, $\langle SOI' \rangle = -1.1$ y en el periodo 1972 a 1999, $\langle SOI' \rangle = -2.1$. Esto implicaría un factor de incertidumbre, no atribuible a la metodología sino a la de información disponible; tanto agrícola como meteorológica convencional. Esto porque el comparativo se realiza contra una variable estadísticamente perturbada y no fluctuante².

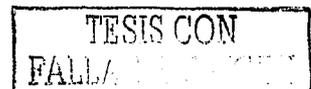
Se encontró en las series de tiempo de lluvia que la *canícula* o "sequía intraestival" es factor recurrente, inclusive durante periodos con *El Niño*. En la región sureste del país, la *canícula* es un fenómeno que ocurre sistemáticamente, comúnmente reconocido como un mínimo relativo de lluvia y de actividad convectiva, vinculado al ciclo anual de precipitación. Las características de variabilidad halladas dentro del periodo de estudio, ubicaron a la *canícula* al inicio del intervalo de máxima vulnerabilidad fenológica de maíz (Pág. 6) en el ciclo primavera-verano.

El efecto de la *canícula* en la lluvia diaria es complejo. Esto emergió en consecuencia de la amplia variabilidad encontrada a lo largo de Veracruz. La explicación más viable de esta variabilidad, toma en consideración la complejidad orográfica y la proximidad con los golfos de México y Tehuantepec como forzamientos físicos.

Como una medida de simplificación del análisis de la *canícula*, se optó por una regionalización pluviométrica. Esto permitió ligar la lluvia "puntual" de las estaciones con los *sinistros*. Estos últimos reportados por superficies (DDR). La regionalización no convencional se fundamentó en la *estadística global* de la *ondeleta* de Paul (Figura 3.13). Se dividió el territorio veracruzano en tres dominios (Figura 3.14):

- I) Si el periodo de la varianza (T_L) es inferior a 1.06 años
Todos los DDR de Veracruz tienen al menos una porción de terreno perteneciente a este dominio.

² Véase p. Ej. Garrat, 1992.



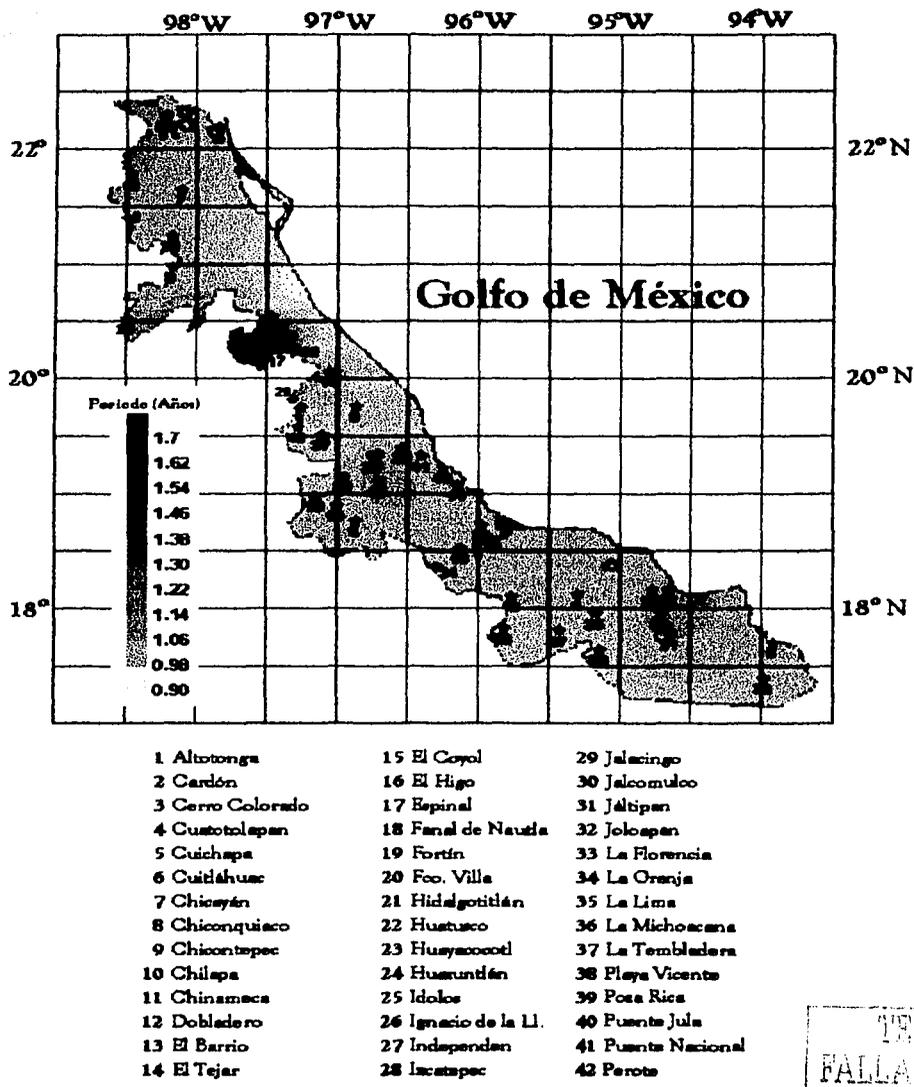


Figura 3.13 Periodo (años) correspondiente al máximo de varianza interanual global de la lluvia. Interpolación espacial recurriendo a series de tiempo de 42 estaciones pluviométricas. Fuente: Algoritmo Numérico de la Ondeleta de Paul, ANOP.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

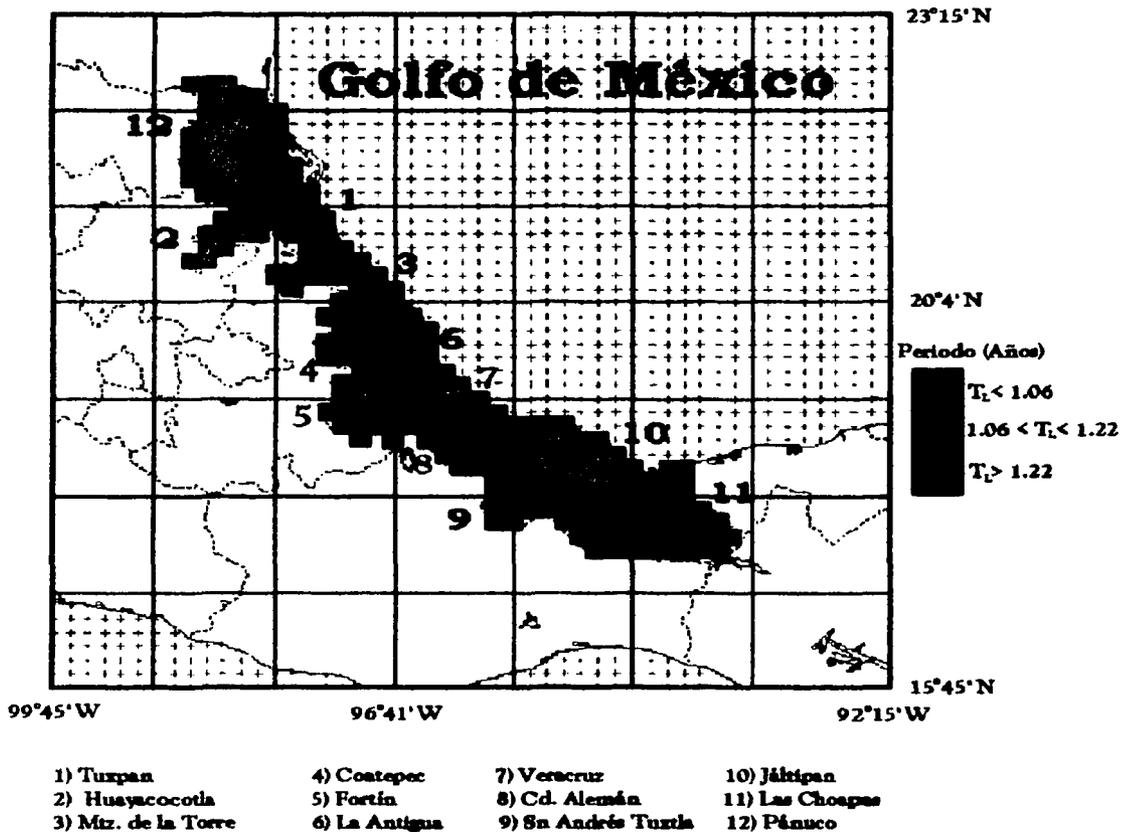


Figura 3.14 División del territorio de Veracruz en dominios (I a III) delimitados por interpolación de periodos interanuales de máxima varianza de la lluvia, T_L . Fuente: Algoritmo Numérico de la Ondeleta de Paul, ANOP.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

II) Si T_L se encuentra entre 1.06 y 1.22 años

Todos los DDR de Veracruz tienen al menos una porción de terreno perteneciente a este dominio.

III) Delimitado por T_L mayor de 1.22 años

Este dominio sólo se encuentra dentro del distrito de *Martínez de la Torre*.

La *varianza* de la *ondeleta global* es una función del periodo T_L :

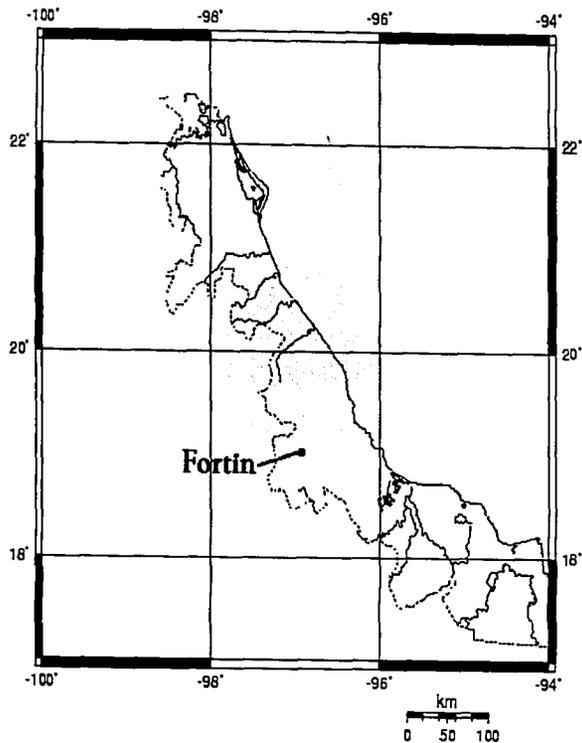
$$V(T_L) = \int_{t_1}^{t_2} P(t, T_L) dt \quad 3.1$$

Donde t_1 y t_2 representan el tiempo "inicial" y "final" de la serie tiempo y $P(t, T_L)$ la función de espectro continuo de *ondeleta* [Figura 3.10 (II)]. El periodo de máxima varianza se define como el menor periodo $T_L^{\max(t)}$ tal que $V[T_L^{\max(t)}]$ es un máximo relativo [Figura 3.10 III (e)]. Se halló que $T_L^{\max(t)}$ es de aproximadamente 12 meses y está asociado con los máximos de lluvia del verano. Una varianza $V[T_L^{\max(t)}]$ elevada implica entonces eventos recurrentes de lluvia máxima, en promedio.

La *canícula* de 1972 —año de *El Niño*— se manifestó en tres tipos de comportamiento. En el dominio **I**, se presentó a mediados de julio en *Fortín* (Figura 3.15) además de interrumpirse por un corto periodo húmedo. Este periodo húmedo discontinuo, inició el 28 de julio y se manifestó cinco días.

En *Hidalgotitlán* (Figura 3.16) dentro del dominio **II**, la sequía inició gradualmente, manteniéndose estacionaria durante agosto. Finalmente en *Coyutla* (Figura 3.17) dentro del dominio **III**, se observó un periodo de sequía relativamente prolongado y casi continuo. En los dominios **II** y **III** la *canícula* inició el 28 de julio, según el promedio bisemanal (Magaña *et al.*, 1999). En este sentido, la sequía en **I** fue anticipada con respecto a los casos anteriores. Como se indicó líneas arriba, esta regionalización pluviométrica permite ligar de un modo más simple a la lluvia con los *siniestros*.

La figura 3.15 también confirma que el *siniestro* del maíz se debió al impacto sobrevenido sobre tres etapas cruciales del ciclo vegetativo primavera-verano:



Fortín

[18°54' N, 97°0' W; 1016 msnm]

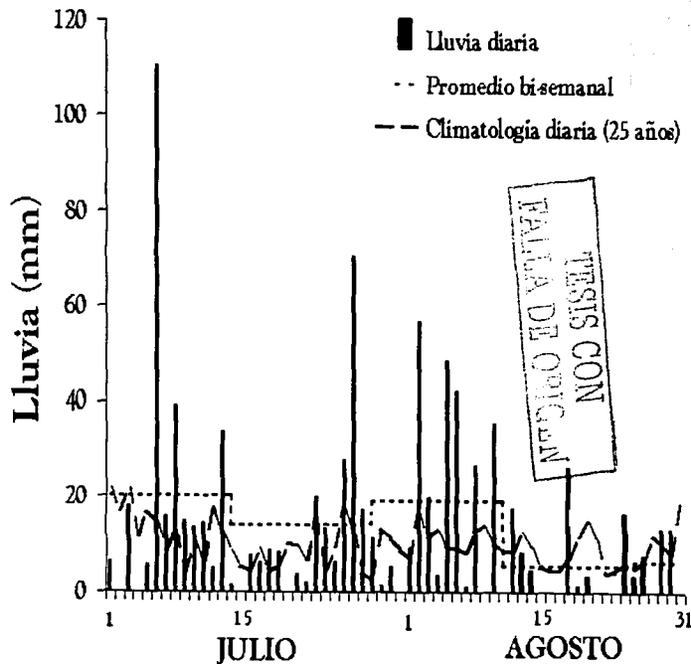
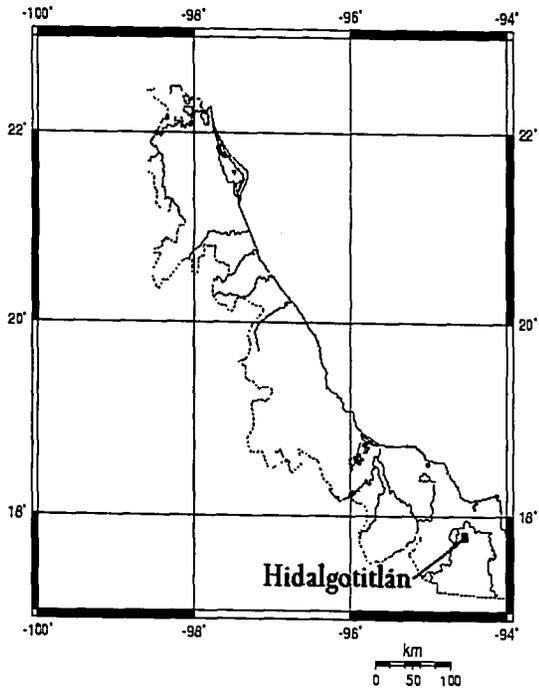


Figura 3.15 La estación *Fortín* en el centro de Veracruz (izquierda) reportó déficit de lluvia asociada a la canícula de 1972, año de *El Niño*. Con respecto a las series climatológicas diaria y bi-semanal (Magaña *et al*, 1999) el periodo de receso se presentó en la segunda mitad del mes de agosto. Fuente: SMN.

TESIS CON
TALLA DE ORIGEN



Hidalgotitlán

[17°47' N, 94°39' W; 40 msnm]

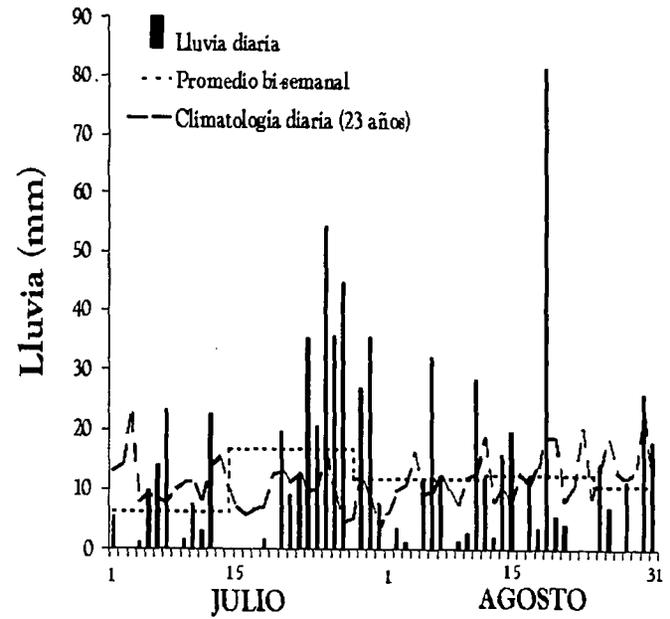
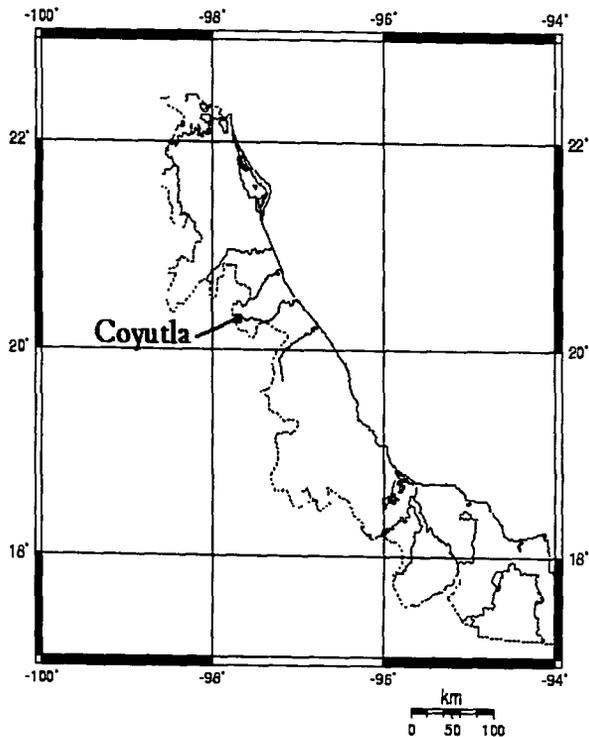


Figura 3.16 La estación *Hidalgotitlán* en el sur de Veracruz (izquierda) reportó déficit de lluvia asociada a la canícula de 1972, año de *El Niño*. Con respecto a las series climatológicas diaria y bisemanal (Magaña *et al*, 1999) el periodo de receso se presentó durante el mes de agosto. Fuente: SMN.



Coyutla

[20°30'N, 97°39'W; 245msnm]

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

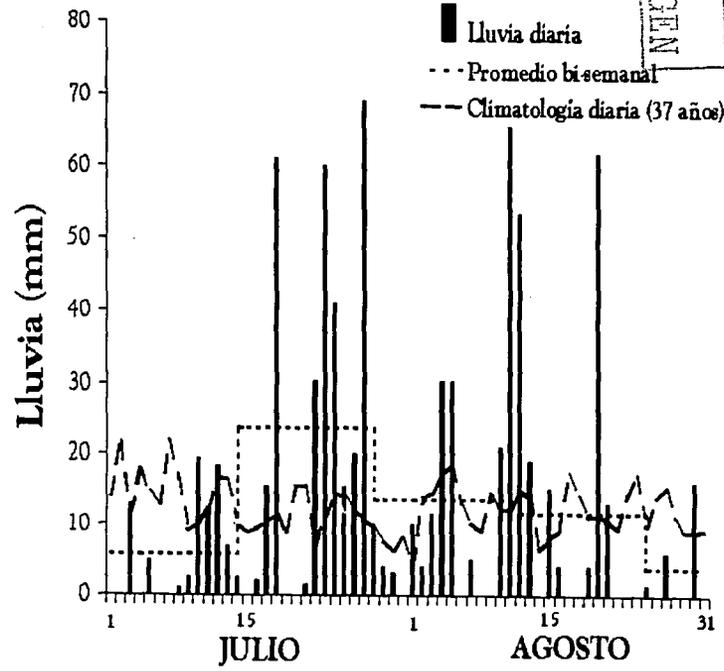


Figura 3.17 La estación Coyutla en el norte de Veracruz (izquierda) reportó déficit de lluvia asociada a la canícula de 1972, año de El Niño. Con respecto a las series climatológicas diaria y bisemanal (Magaña et al, 1999) el periodo de receso se presentó en el mes de agosto. Fuente: SMN.

espagamento 109 días después de la siembra (p. Ej. el 1 de julio), *floración* 134 dds (26 de julio), y llenado de grano 160 dds (21 de agosto).

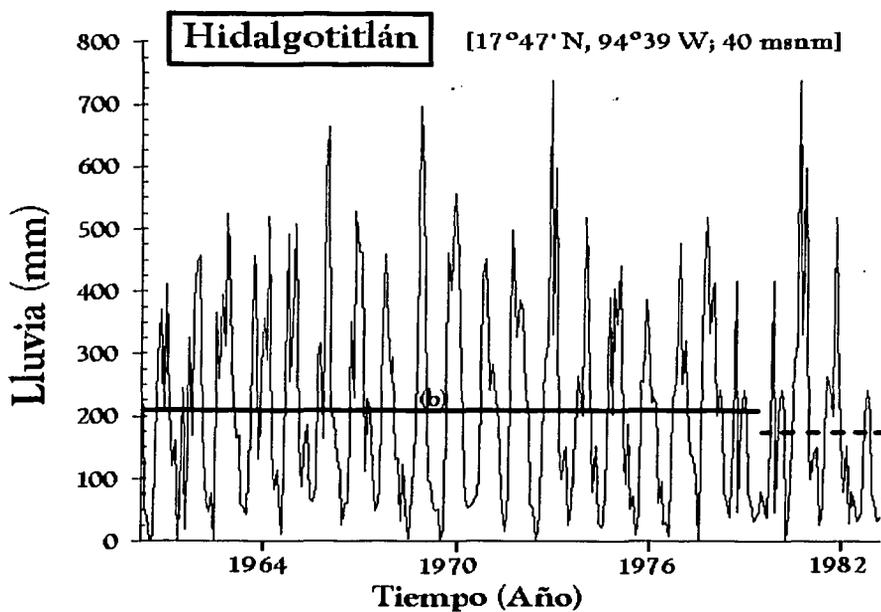
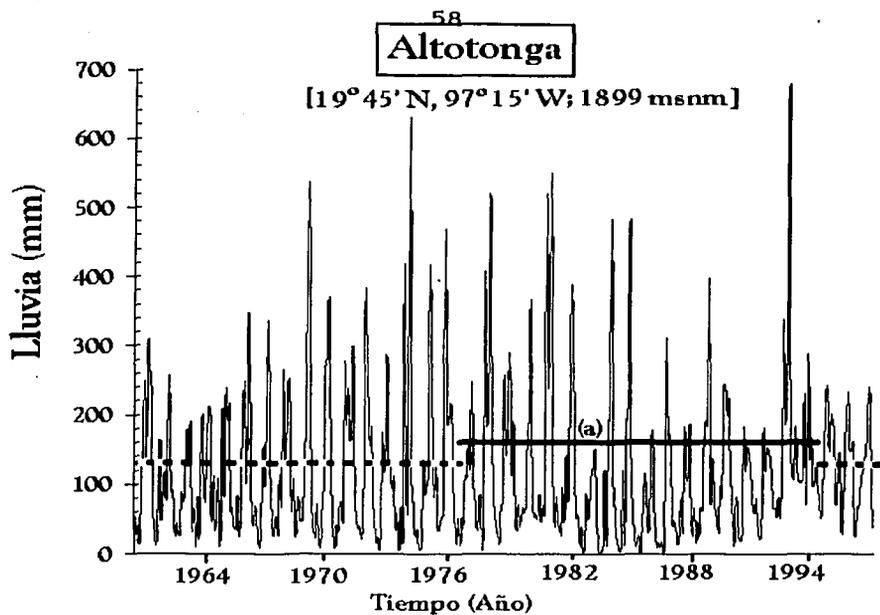
El análisis temporal del hidrometeoro suscitó el hallazgo de dos efectos cuasiperiódicos. El primer efecto es una variación abrupta del régimen interanual. Esto se observó en datos de estaciones del dominio **II** y de la mitad del verano. Las series de tiempo exhibieron variaciones cuasiperiódicas entre 18 y 20 años (Figura 3.17 CONTINUACIÓN) siempre posteriores a un salto o discontinuidad (Marcus y Brazel, 1984; Wang, 1995).

Este rasgo de variabilidad se presentó en los años 1976, 1980 y 1995; justamente cuando el índice de oscilación del sur medio anual tomó valores negativos. La causa de esta oscilación climática de casi veinte años resultó incierta. Su probable origen apunta hacia una profusa familia de procesos de memoria de largo plazo (McCoy y Walden, 1996).

El segundo hallazgo es la contribución negativa de la *oscilación cuasibienal*³ (QBO) al rendimiento agrícola. La QBO es un fenómeno del régimen de vientos estratosféricos (Haynes, 1998). Estos vientos invierten periódicamente la dirección entre el este (fase positiva) y el oeste (fase negativa). Se ha observado que el periodo de la oscilación está entre 20 y 36 meses, calculándose el valor medio de este periodo en 28 meses (Maruyama, 1997). También se ha observado un descenso del régimen de vientos con respecto a la vertical, entre 10 y 100 mb. El mecanismo físico asociado a la QBO es atribuido a la transferencia de ímpetu entre las ondas de Kelvin, Rossby y de gravedad (Takahashi *et al.*, 1997). Es conocida la influencia de la QBO en la lluvia tropical, en cuanto al monzón de la India y al régimen de lluvia del Sahel (Naujokat, 1986). La influencia de la oscilación cuasibienal en el clima de otras regiones del mundo es un problema científico de actualidad (Scaife *et al.*, 2000).

Se encontró que la QBO indujo periodos cortos de sequía. Estos periodos no se manifestaron por doquier en Veracruz. El análisis de *ondeletas* llevó a identificar los sitios con sequía cuasibienal (Figura 3.18). La identificación se basó en la localización de un mínimo relativo de la *varianza* con periodo cercano a dos años. El aspecto de la huella temporal fue siempre muy similar al tipo (a) presentado en la figura 3.11. Así, en sitios como *La Michoacana*, *Poza Rica*, *Perote*, *El Dobladero*, *Playa Vicente* y *Huazuntlán* se encontró la señal estadística de la QBO. En la Figura 3.19 se detallan tres zonas de impacto. La primera de ellas es extensa y se encuentra sobre

³ Adoptemos aquí el acrónimo en inglés, por ser más usual.



TESIS CON
 TALLA DE ORIG.

Figura 3.17 CONTINUACIÓN Ejemplo de discontinuidad en el promedio de la lluvia media mensual en dos estaciones del dominio II (a) *Altotonga* y (b) *Hidalgotitlán*. Periodos estimados en 18 y 20 años, respectivamente. Fuente: SMN.

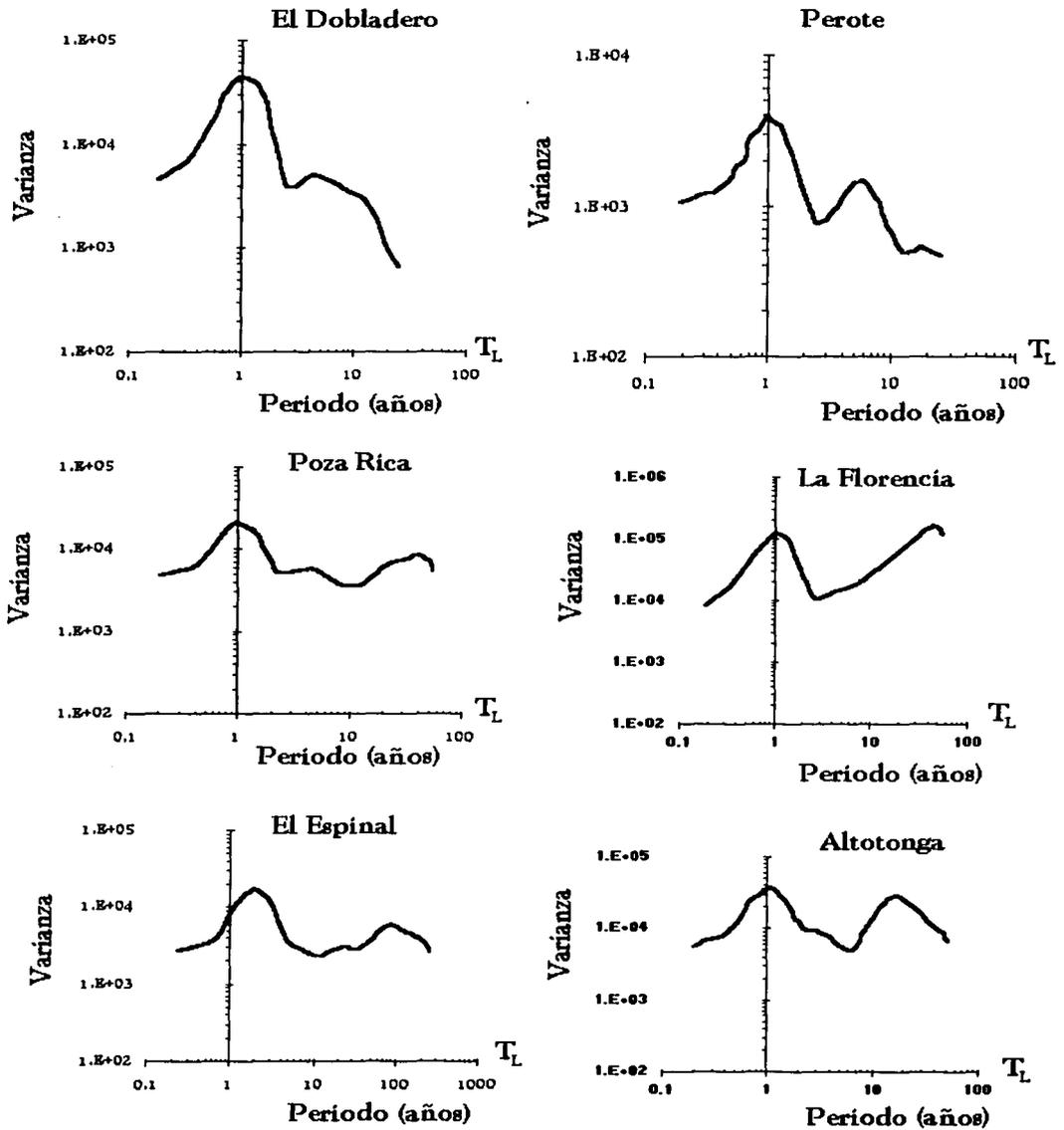


Figura 3.18 Ondeleta global del espectro continuo de la lluvia en *El Dobladero, Perote, Poza Rica, La Florencia, El Espinal, Altotonga*. El mínimo relativo de varianza $T_L \approx 2.0$ en estas estaciones, resultó en una huella estadística de la *oscilación cuasibienal, QBO*.
Fuente: Algoritmo Numérico de la Ondeleta de Paul, ANOP.

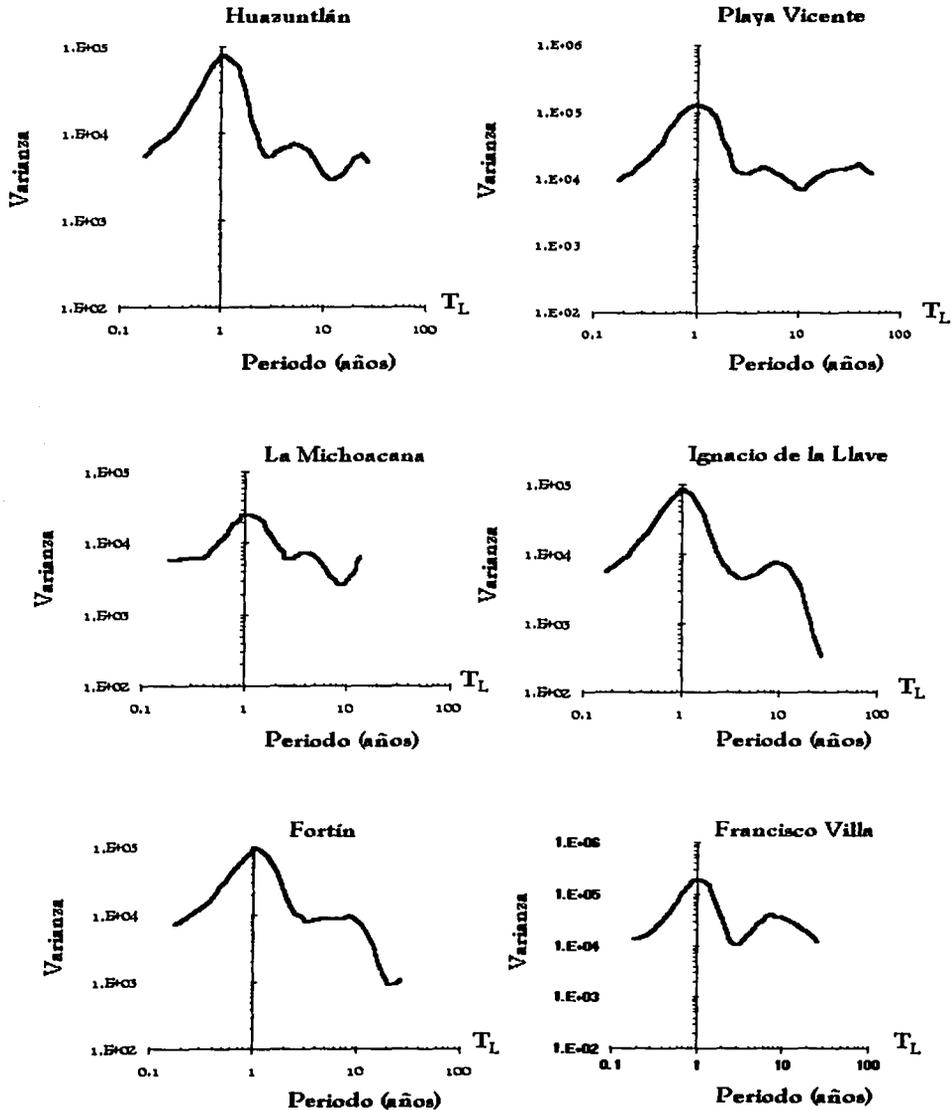


Figura 3.18 (CONTINUACIÓN) Ondeleta global del espectro continuo de la lluvia en *Huazuntlán, Playa Vicente, La Michoacana, Ignacio de la Llave, Fortín y Francisco Villa*. El mínimo relativo de varianza $T_L \approx 2.0$ en estas estaciones, resultó en una huella estadística de la Oscilación Cuasibienal, QBO. Fuente: Algoritmo Numérico de la Ondeleta de Paul, ANOP.

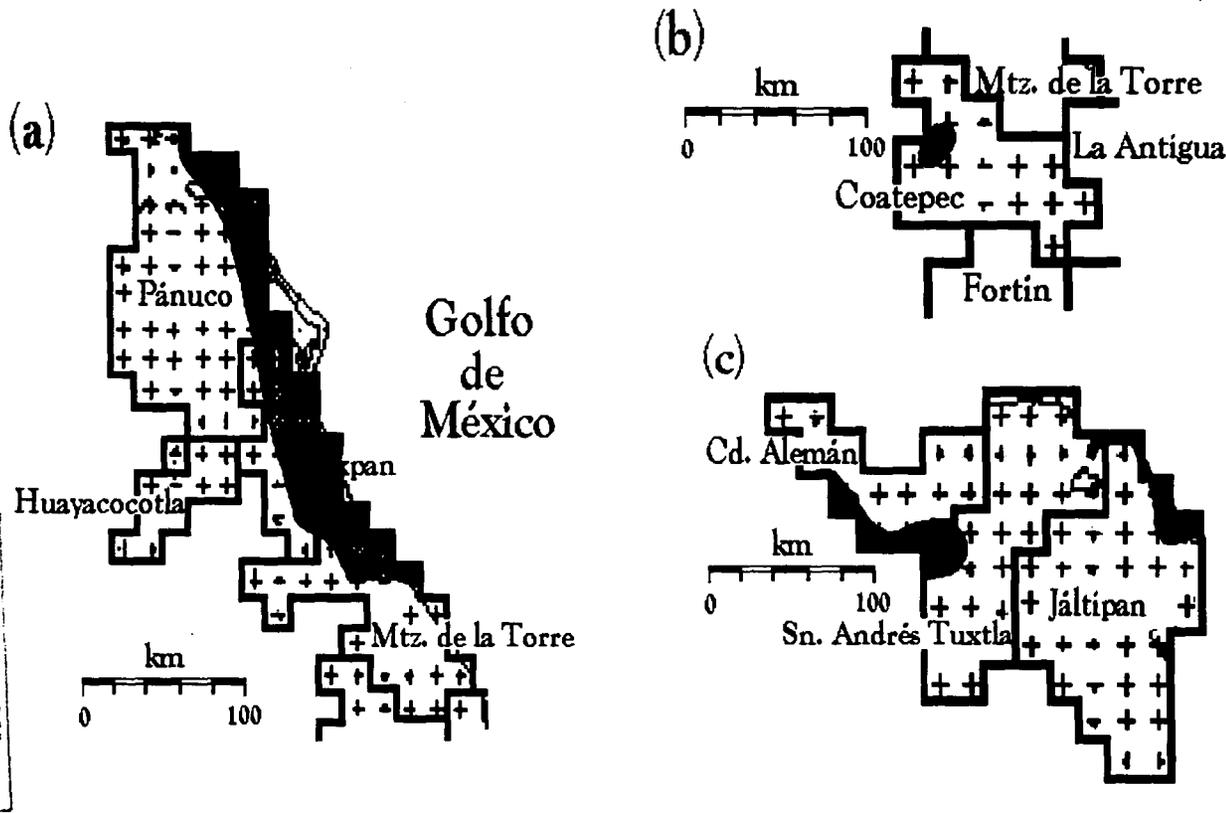


Figura 3.19 Zonas (sombreado) donde se observó impacto de sequía asociada a la QBO. (a) En el norte de Veracruz sobre parte de los distritos de Pánuco, Tuxpan y Martínez de la Torre. (b) En el centro del estado, dentro del distrito de Coatepec. (c) En el sur, en los distritos de Ciudad Alemán, Jáltipan y San Andrés Tuxtla. En todos los casos, la delimitación de las zonas resultó de la interpolación de *Kriging*. Fuente: Algoritmo numérico de la ondeleta de Paul, ANOP.

la costa del norte del estado (a). Abarca parcialmente a los distritos de *Pánuco*, *Tuxpan* y *Martínez de la Torre*. Es en su mayoría, una llanura costera con lomeríos y tierras bajas, dentro del cual se encuentra el valle del río *Tuxpan*. Esta zona es dominada por los *alisios* y los vientos del norte.

La segunda zona encontrada (b) es cerrada y reducida; 30 km de diámetro. Se encuentra sobre las estribaciones del *Cofre de Perote*, arriba de los 2000 msnm. En consecuencia de esta altura, la zona presenta mayor control de la circulación de la *atmósfera libre*. Su clima es esencialmente "semiseco" y "frío".

En similar condición está la tercera zona (c) localizada dentro del distrito de *Jáltipan*, al sur de la *Sierra de los Tuxtlas*. Esta zona a diferencia de la anterior, tiene un clima húmedo, típico ya del Istmo de Tehuantepec.

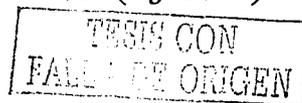
Finalmente, la tercera zona impactada por la QBO también cae en los distritos de *Ciudad Alemán* y *San Andrés Tuxtla*. Se trata de una extensión de terreno complejo y poco elevado (< 300 msnm) de la zona de transición de los climas sub-húmedo a húmedo (Cf. Figura 1.3).

En años de *La Niña* predominan las tormentas convectivas (Figura 3.20) apareciendo un mínimo relativo mensual en julio debido a la *cánicula*. Con el análisis de las series de tiempo, se observó mayor frecuencia en las *anomalías positivas* de lluvia cuando el *índice de oscilación del sur* mantuvo valores positivos.

Según la información agropecuaria de Veracruz, las lluvias intensas que se presentan en años de *La Niña* conducen a inundaciones. Estas inundaciones abaten los cultivos de temporal, en particular el maíz. Además, durante años con *La Niña* se presentan más tormentas desde mediados del otoño y hasta el invierno. En contraste, la lluvia de invierno resultó un hidrometeoro favorable al rendimiento del maíz en el ciclo otoño-invierno.

De forma diferenciada, en los rangos de latitudes se manifiesta *La Niña* (Figura 3.21). Se aprecia un impacto más distribuido con respecto a *El Niño*. Destaca la *anomalía negativa* por debajo de los 18° N. Esto sugiere la existencia de una reducida zona de *sequía meteorológica* en el sur de Veracruz.

De forma similar a *El Niño*, se fijó arbitrariamente un año típico de *La Niña*. Este año fue 1988, con $\langle \text{SOI} \rangle = 7.82$. La *anomalía positiva* en agosto de 1988 (Figura 3.22)



Estado de Veracruz

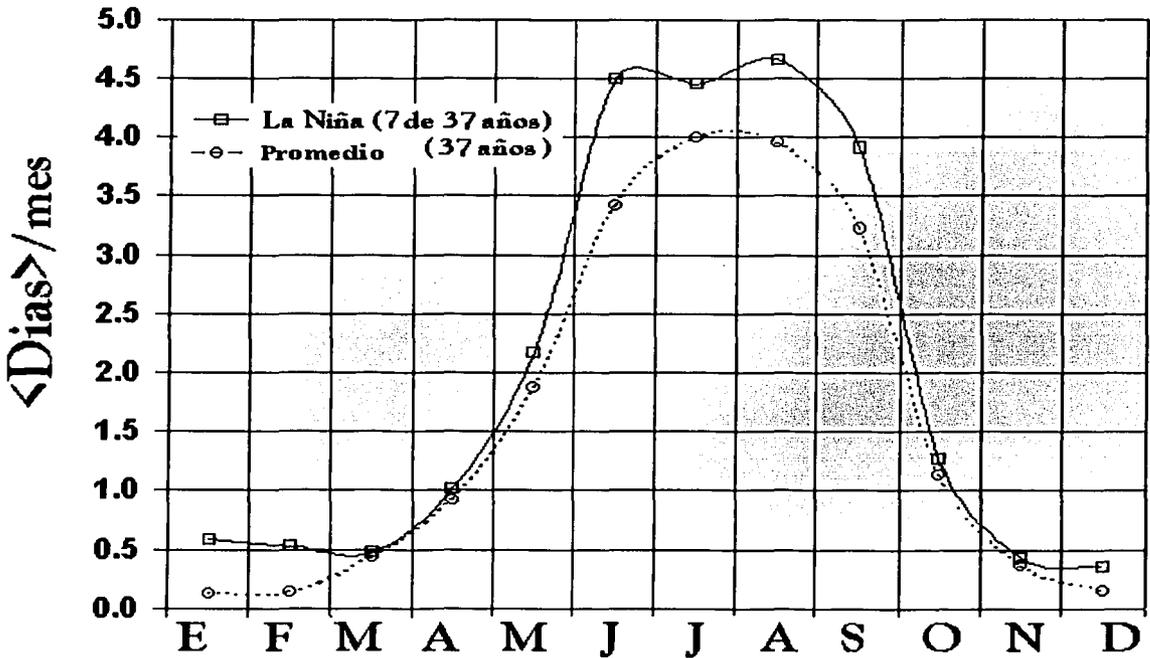


Figura 3.20 Distribución media mensual del número de días con tormenta eléctrica en años de *La Niña* (1964, 1967, 1970–71, 1973, 1975 y 1988) en comparación con la distribución media del periodo 1961–1997. Cf. Figura 3.3. Fuente: SMN.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

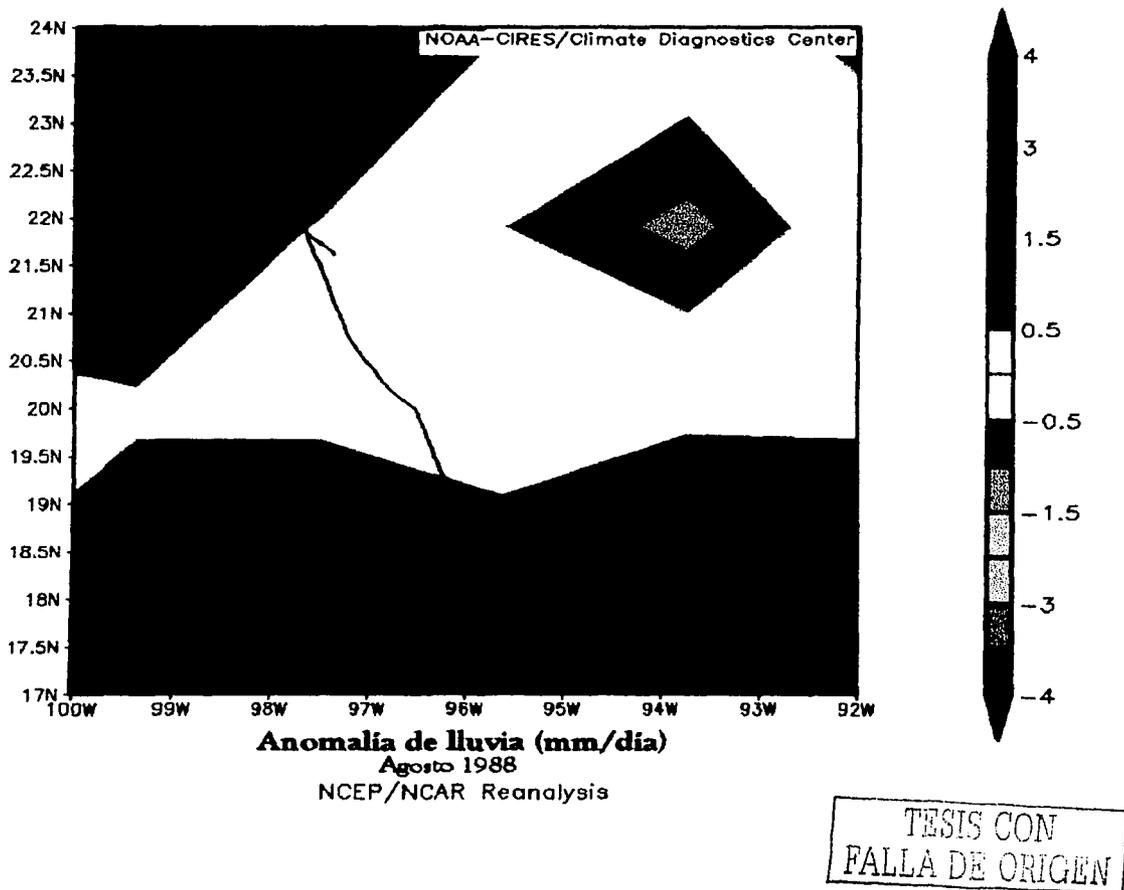


Figura 3.22 Anomalia de lluvia en agosto de 1988. Fuente: Datos de reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996).

indica lluvias intensas. Las lluvias de verano elevaron el nivel de los ríos *Cazones*, *Pantepec*, *Tuxpan*, *Tecolutla*, *Bobos*, *Nautla*, *Huitzilapan*, *Trinidad*, *La Lana*, *San Juan*, *Coatzacoalcos*, *Solosúchil*, y *Jaltepec*. La elevación del nivel de los ríos llevó a desbordamientos e inundaciones.

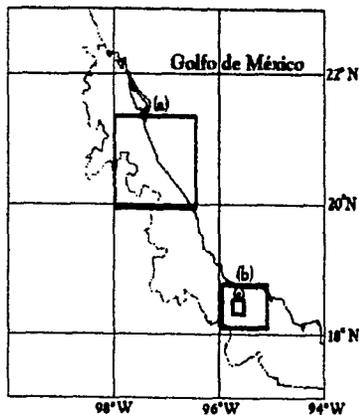
Los DDR con mayor impacto por inundación fluvial fueron *Tuxpan*, *Martínez de la Torre*, *Coatepec*, *Ciudad Alemán*, *Jáltipan* y *Las Choapas*. El desbordamiento de los ríos (Figura 3.23) se presentó (1) por debajo de los puntos de ramificación y (2) en las áreas cultivables adyacentes a canales, en consecuencia de la compleja hidrografía de Veracruz.

La precipitación en el mes más lluvioso (Figura 3.24) se manifestó sobre las laderas orientales de las montañas. Esto sugiere que las inundaciones en las tierras bajas de los distritos *Jáltipan* y *Las Choapas* (con anomalías negativas) se debieron a las avenidas fluviales generadas río arriba, justo sobre el sistema lacustre del río *Coatzacoalcos* y el valle *Uxpanapa* [Lon: 94° 25' W, Lat: 17° 20' N].

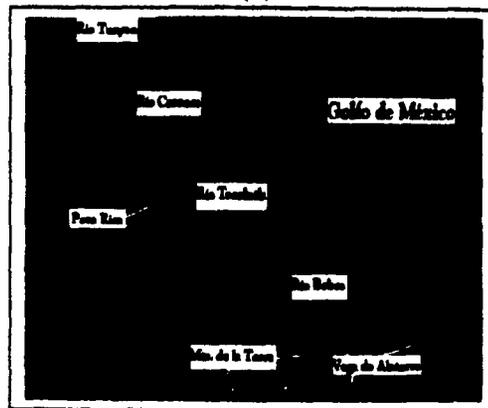
La correlación entre el índice de oscilación del sur y el rendimiento del maíz resultó compleja. Un esquema simplificado mantiene tres escenarios (Figura 3.25). Tales escenarios corresponden a igual número de casos particulares, durante los años 1972, 1984 y 1988. Estos años fueron seleccionados en función de las tendencias de crecimiento del índice medio mensual de el fenómeno de *El Niño* y la *oscilación del Sur*. El rendimiento relativo neto corresponde a la suma de los rendimientos de los 12 DDR de Veracruz.

Así, el impacto mayor se experimenta durante la *fase cálida*, a consecuencia de las sequías; principalmente en los distritos de *Huayacocotla*, *Veracruz*, *Tuxpan*, y *Ciudad Alemán*, los dos primeros particularmente afectados por la *canícula* y los últimos por la *QBO*. El siniestro de *El Niño* es del trescientos por ciento (Tabla 3.4) diez veces mayor al siniestro promedio y, por tanto, deriva en una cosecha ínfima de 250 kg. ha⁻¹ (SIA, 1999).

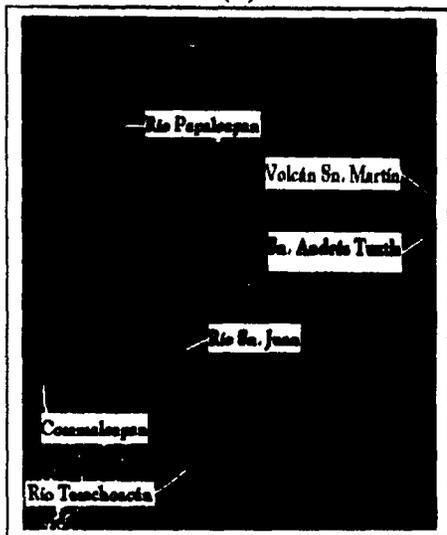
El distrito con menor siniestro en estas condiciones es *Las Choapas*, próximo al Istmo de Tehuantepec. Una explicación es que la zona del istmo es la más próxima a la *zona intertropical de convergencia*, fuente de actividad convectiva. La *zona intertropical de convergencia*, según se ha comprobado, experimenta fluctuaciones en su ciclo de desplazamiento latitudinal. Las fluctuaciones responden a las anomalías de los vientos de escala sinóptica asociados al fenómeno de *El Niño* y la *Oscilación del Sur*.



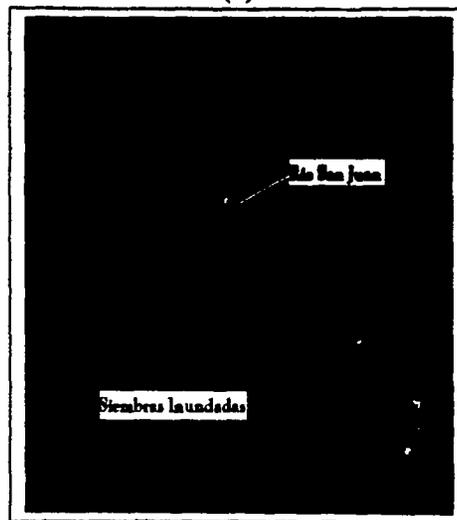
(a)



(b)



(c)



TESIS DE
 FALDA DE ORIGEN

Figura 3.23 Situación hidrográfica en el norte y sur de Veracruz. (a) Ríos *Tuxpan*, *Cazonas*, *Tecoluta* y *Bobos*. (b) Ríos *Papaloapan*, *Tesechoacán* y *San Juan* (c) Inundaciones por desbordamiento del río *San Juan* el 3 de agosto de 1987. Imágenes de *Landsat 7* (Goward *et al.*, 1999). Fuente: Centro de Distribución de Archivo Activo (DAAC).

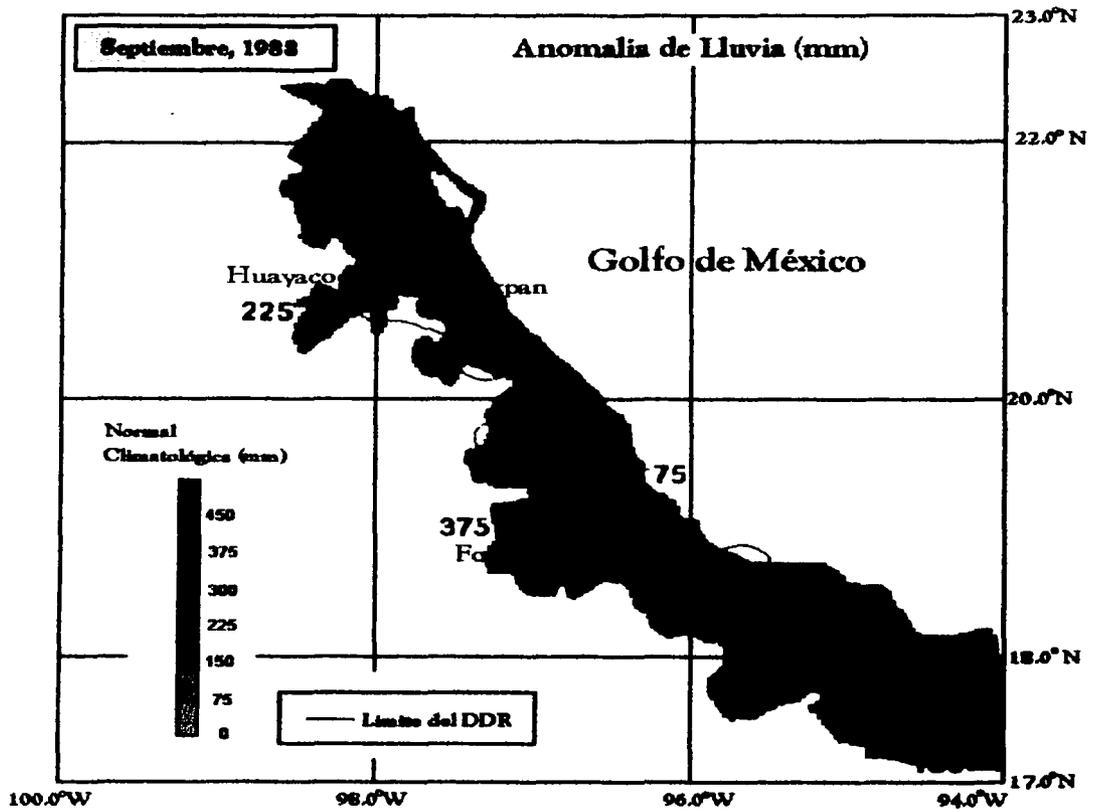
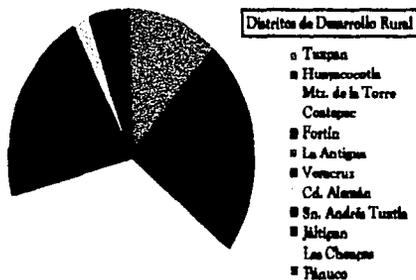
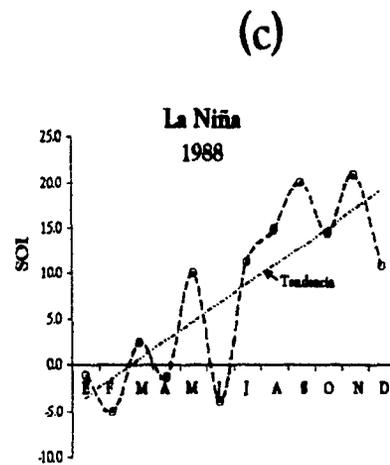
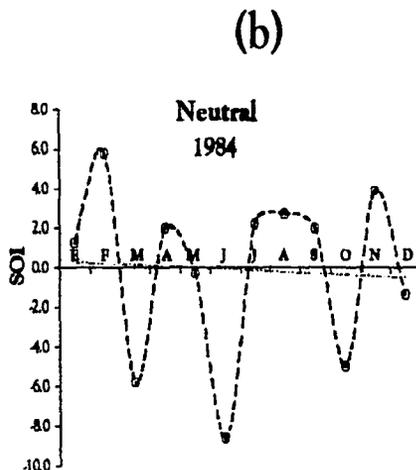
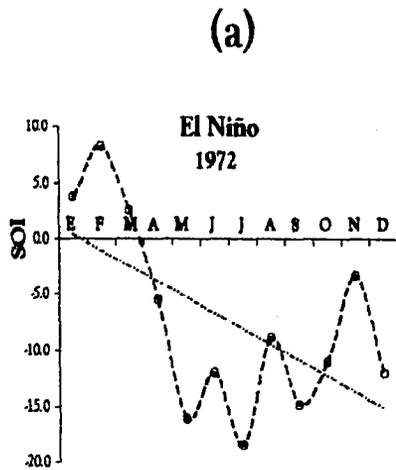
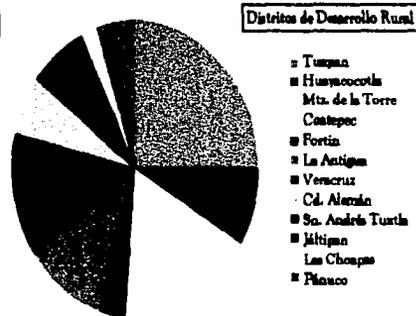


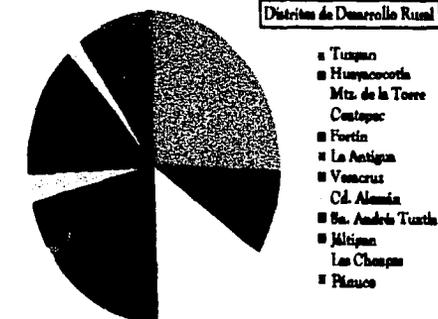
Figura 3.24 Anomalia de lluvia mensual en septiembre de 1988. Los distritos siniestrados fueron *Tuxpan*, *Huayacocotla* y *Fortín*, con precipitaciones mayores a 200 mm. Fuente : SMN y Climatología *East Anglia* (New et al, 1999).



Rendimiento Relativo Neto = -298.3 %



Rendimiento Relativo Neto = -31.2 %



Rendimiento Relativo Neto = -182.5 %

Figura 3.25 Series del SOI medio mensual y rendimientos relativos del maíz en 1972, 1984 y 1988. (a) En 1972 el índice presentó tendencia negativa (ver recta de ajuste). El mayor impacto ocurrió en los distritos del norte (abajo). En 1984 (b) el SOI fluctuó con una ligera tendencia negativa. El norte y la zona costera central reportaron mayores daños. En 1988 (c) la tendencia del SOI se mantuvo positiva. El impacto se registró entonces en el norte y sobre la zona montañosa central. Fuente: Agencia Japonesa de Meteorología y Gobierno de Veracruz.

INSTITUTO
 MEXICANO
 DE INVESTIGACIONES
 CIENTÍFICAS Y
 TECNOLÓGICAS

Tabla 3.4

DDR	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
1	-35.0	-2.2	-32.3	-47.7	-4.4	-38.2	-34.5	-21.0	-19.7	-33.3	-81.0	-33.9	-7.8	-9.0
2	-71.0	-0.3	-17.2	-16.0	-0.3	-70.1	-79.8	-23.3	-11.2	-23.5	-83.0	-79.2	-2.7	-14.3
3	-29.0	-12.3	-20.2	-21.2	-0.3	-25.8	-30.0	-18.8	-10.0	-8.9	-86.7	-26.9	-4.3	-8.1
4	-76.1	-6.1	-8.9	-7.7	-0.3	-63.2	-60.5	-11.1	-9.2	-7.8	-71.8	-32.1	-1.2	-3.1
5	-16.1	-6.9	-27.2	-27.0	-1.1	-17.5	-19.7	-1.1	-7.3	-3.3	-33.3	-13.0	-1.1	-2.7
6	-3.5	-2.2	-3.0	-4.0	-3.2	-3.7	-4.0	-4.5	-2.1	-3.0	-13.7	-5.5	-3.3	-1.3
7	-44.2	-1.0	-6.1	-9.9	-4.2	-47.2	-46.6	-0.3	-2.2	-2.0	-55.6	-21.4	-4.3	-0.4
8	-6.7	-3.2	-2.1	-3.0	0.0	-9.0	0.0	-2.1	-6.8	0.0	-2.6	-2.3	-2.0	-0.9
9	-6.8	-1.1	-1.0	-19.2	0.0	-3.4	-3.1	-4.5	-1.1	0.0	-3.1	-2.1	-0.9	-4.5
10	-5.2	0.0	-6.5	-5.5	-1.5	-2.6	-4.0	-7.7	-6.7	-2.2	-4.0	-15.9	-1.5	-2.2
11	-0.2	-2.3	-6.5	-21.9	-0.7	-1.1	-1.8	-12.3	-4.0	-4.7	-13.8	-13.5	-0.7	-4.9
12	-4.7	-19.9	-12.0	-36.4	-1.6	-3.9	-1.3	-0.9	0.0	-7.9	-24.0	-6.8	-1.6	-11.2
Total	-298.3	-57.5	-142.8	-221.6	-17.5	-285.5	-285.7	-107.7	-80.3	-96.5	-432.4	-252.4	-31.2	-62.8

DDR	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
1	-34.5	-15.7	-46.6	-57.9	-20.0	-14.5	-30.0	-39.1	-30.2	-41.3	-55.7	-17.8	-32.2	-67.2
2	-79.8	-18.4	-16.1	-14.1	-20.0	-13.3	-32.0	-71.1	-23.2	-69.1	-21.9	-18.4	-27.5	-80.0
3	-30.0	-6.3	-21.1	-23.0	-21.1	-10.7	-32.0	-27.8	-12.4	-22.3	-17.0	-6.3	-17.6	-80.3
4	-60.5	-1.3	-6.7	-4.6	-6.5	-10.0	-27.5	-56.7	-15.7	-50.3	-19.8	-6.1	-19.2	-24.7
5	-19.7	-11.7	-27.4	-30.3	-2.1	-8.2	-21.0	-17.9	-31.3	-19.0	-23.3	-8.7	-11.3	-23.9
6	-4.0	-0.4	-2.7	-0.3	-2.1	-2.5	-10.9	-4.1	-12.2	-4.0	-37.8	-10.4	-3.2	-5.6
7	-46.6	-91.5	-9.0	-13.6	-1.1	-9.9	-15.6	-34.7	-7.8	-50.1	-23.0	-79.0	-4.2	-17.0
8	0.0	-9.0	-5.8	-6.8	0.0	-6.7	-9.9	-9.2	-4.0	-11.3	-6.1	-9.0	-1.5	-15.7
9	-3.1	-13.9	-20.6	-23.3	0.0	-7.7	-3.3	-6.7	-3.3	0.0	-12.8	-14.0	-12.0	-13.6
10	-4.0	-7.6	-4.5	-7.8	-1.1	-4.6	-3.1	-3.2	-5.5	0.0	-26.8	-10.1	-1.5	-57.6
11	-1.8	-3.1	-3.6	-4.1	-5.6	-11.1	-16.2	-1.1	-7.9	-2.0	-36.9	-3.1	-3.5	-69.9
12	-1.3	-2.2	-16.4	-21.2	-4.4	-17.2	-32.0	-1.9	-10.0	-3.2	-40.0	-6.6	-12.5	-79.6
Total	-285.7	-161.2	-182.6	-207.0	-84.0	-116.6	-233.4	-273.6	-163.6	-272.6	-326.0	-189.7	-146.0	-536.3

Tabla 3.4 Rendimiento relativo porcentual del maíz (ambos ciclos productivos) en los doce distritos de desarrollo rural de Veracruz [Cf. Figura 3.12 (c)]. Período 1972-1985.
Fuente: Gobierno del Estado de Veracruz.

TESIS CON
FALLA DE CUBRIMIENTO

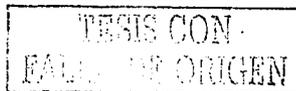
La Niña resulta ser la siguiente condición climática más limitante. Las inundaciones debidas a precipitaciones sobre las siembras, así como aquellas generadas a través del desbordamiento de los ríos, llevan a *siniestros* seis veces más intensos al promedio; 400 kg. ha⁻¹. Esto en los distritos de *Tuxpan, Pánuco, Las Choapas, San Andrés Tuxtla, Martínez de la Torre* y *Coatepec*. A excepción de este último, las inundaciones en los demás distritos están ligados claramente a la poca pendiente del terreno.

El distrito con menor *siniestro* en una año de *La Niña* es *La Antigua*, en la costa central de Veracruz. La explicación de este hecho está en la presencia de divergencia asociada al forzamiento orográfico local. Esto dado a la presencia de la única "saliente" [Lon:96° 35' W, Lat: 19° 50' N] de la cadena montañosa oriental que atraviesa Veracruz (ver Figura 1.1). Esto implica un control climático de mesoescala por capa límite.

Un ciclo anual con un *índice de oscilación del sur* relativamente estable está asociado con los *siniestros* más leves. Los distritos con mayor y menor impacto productivo son *Tuxpan* y *Las Choapas*, respectivamente. Ambos casos se pueden explicar por la influencia que las corrientes marinas superficiales del Golfo de México ejercen sobre la *inestabilidad atmosférica* y la *eficiencia* de las nubes (Esbensen y MacPhaden, 1996; Edwards y Weiss, 1996).

El flujo superficial que entra por el canal de Yucatán se desplaza paralelo a la costa desde la *Sonda de Campeche* y hacia el norte. Justo frente a las costas de *Tuxpan* se establece un vórtice anticiclónico [Lon:94° W, 22° N]. El vórtice anticiclónico es un sistema de circulación cuasipermanente considerado como célula terminal del mecanismo de transporte de calor del mar tropical (Walters y Hastenrath, 1989). En función del balance de fuerzas inerciales, este remolino de mesoescala induce convergencia horizontal, fomentando una *alberca cálida* poco profunda (Betts y Ridway, 1989).

Por la tendencia hacia el equilibrio entre la superficie del océano y la *capa límite atmosférica* (Thompson, 1992) la *buoyancia* del sistema agua-aire resulta incrementada y, en consecuencia, también la componente de aceleración vertical y la frecuencia de rotación de las celdas de tormenta. Estas condiciones inhiben la formación de nubes cumuliformes. En el mejor de los casos, es probable que lleguen a desarrollarse *cúmulus* de escasa profundidad, pero obviamente productores de lluvia



de muy corta duración. La parte sur del Golfo de México, frente al distrito de *Las Choapas*, está libre de remolinos cuasipermanentes y, en consecuencia, de este efecto "válvula" de la lluvia convectiva (Rotunno y Klemp, 1985).

TESIS CON
FALLA DE CALIFICACION

§ 3.2 Heladas

El fenómeno de las heladas se presenta por lo general en la zona montañosa central de Veracruz. Esto se apoya en los resultados de la Tabla 3.1, que contiene la distribución anual en 33 estaciones sobre el estado. Las heladas se presentan por lo común al iniciar la estación de otoño. Sitios próximos al volcán *Pico de Orizaba* [Lon:97°17' W, Lat:19°02' N, Alt: 5747 m] como *Coscomatepec* [Lon: 97°03' W, Lat: 19°04', Alt: 1588 m] y *Huatusco* [Lon:96° 58' W, Lat: 19° 08' N, Alt: 1344 m], son los primeros en reportar temperaturas de congelamiento, incluso en meses típicos de verano como son julio y agosto.

En la *Figura 3.26* se presenta el comportamiento medio anual de las heladas con respecto a la frecuencia (año^{-1}) y orden relativo de aparición. La escala de tiempo (días) se refiere al promedio del número de días transcurridos desde la primera *helada meteorológica*, que en promedio se presenta en la estación de *Huatusco* (punto a).

Los datos de temperatura mínima indican que existen sitios en donde las heladas aparecen casi simultáneamente (puntos b a d y f a k) mientras que en otros (puntos l a n) difieren entre sí dos y cuatro semanas la fecha de aparición. El primer grupo (puntos b a d) representan estaciones con aproximadamente 30 heladas por año, mientras que en el segundo grupo (f a k) las estaciones registran en promedio 15 heladas al año. Los sitios de la *figura 3.26* se encuentran muy próximos entre sí, dentro de una estrecha zona latitud-longitud de $1^{\circ}9' \times 26'$ y dentro de un rango de elevación entre mil y tres mil metros (*Tabla 3.2*).

Como ya se ha mostrado (*Figura 3.6*) en años con condiciones típicas de *El Niño*, sobre el territorio de Veracruz se presentó una *anomalía positiva de radiación emergente de onda larga* (REOL). Esto sugiere que las condiciones climáticas promedio, dentro de las cuales aparecieron las heladas, fueron cielos despejados y suelos con baja humedad dado un déficit de precipitación; aspecto ya discutido en el apartado anterior.

El compuesto de REOL en condiciones típicas de *La Niña* (*Figura 3.27*) muestra dos focos importantes: una intensa *anomalía positiva* centrada en el norte del país y otra sobre la península de Yucatán y Golfo de México, resultando el territorio de Veracruz con una anomalía media casi nula. Esto implica un clima con cielos nublados.

Estación	enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	diciembre	Anuales
Perote	6.210	4.200	2.560	1.220	0.860	0.701	0.948	0.961	0.692	1.955	3.634	5.307	29
Tembladeras	5.930	4.040	2.500	1.230	0.920	0.830	1.070	1.073	0.870	1.968	3.569	5.195	29
Jalacingo	6.110	4.140	2.480	1.140	0.790	0.560	0.814	0.840	0.554	1.828	3.509	5.131	28
Cosautlán	4.890	3.350	2.670	1.050	0.800	0.771	0.977	0.971	0.844	1.669	2.977	4.333	25
Coscomatepec	4.650	3.170	1.920	1.070	0.840	0.816	1.054	1.022	1.014	1.599	2.829	4.255	24
Orilla del Monte	5.220	3.430	2.090	0.920	0.610	0.420	0.634	0.639	0.350	1.563	2.909	4.250	23
Huayacocotla	4.540	3.100	1.690	0.690	0.420	0.374	0.549	0.501	0.526	1.298	2.441	3.725	20
Las Minas	4.220	2.760	1.690	0.750	0.501	0.358	0.528	0.527	0.299	1.278	2.340	3.412	19
Pescados	4.220	2.760	1.690	0.750	0.500	0.358	0.528	0.527	0.299	1.278	2.340	3.412	19
Las Vigas de R.	3.830	2.550	1.570	0.740	0.535	0.439	0.590	0.587	0.429	1.211	2.189	3.183	18
Atzacán	4.170	2.710	1.650	0.690	0.430	0.254	0.431	0.432	0.176	1.235	2.257	3.298	18
Huatusco	3.060	2.070	1.260	0.680	0.530	0.529	0.675	0.658	0.631	1.045	1.834	2.714	16
Teocelo	3.070	2.080	1.270	0.640	0.490	0.463	0.590	0.584	0.506	1.019	1.809	2.632	15
Jalapa	2.910	1.950	1.190	0.580	0.440	0.386	0.500	0.496	0.403	0.936	1.672	2.428	14
Zongolica	1.980	1.340	0.730	0.420	0.380	0.230	0.331	0.331	0.351	0.525	1.123	1.809	10
Concepción	1.480	0.980	0.570	0.270	0.210	0.141	0.188	0.185	0.139	0.422	0.762	1.106	6
Cedillo	0.230	0.140	0.110	0.020	0.020	0.002	0.002	0.002	0.002	0.023	0.114	0.207	1
Papanitla	0.300	0.190	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1
Catemaco	0.130	0.100	0.027	0.030	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.075	0.102	0
Poza Rica	0.260	0.190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
Tecoluta	0.240	0.170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
S. Doblado	0.190	0.160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
Sihuanapan	0.070	0.060	0.010	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.052	0.064	0
El Tejar	0.110	0.080	0.045	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
J. Cardel	0.100	0.080	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
El Higo	0.080	0.051	0.027	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
Jáltipan	0.079	0.053	0.017	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
Tuxpan	0.070	0.046	0.020	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
Pánuco	0.017	0.011	0.000	0.000	0.000	0.019	0.018	0.018	0.000	0.019	0.000	0.009	0
S.J. Evangelista	0.020	0.019	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	0.016	0
Zempoala	0.010	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
J. Carranza	0.004	0.020	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
S. J. del Carmen	0.003	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0

Tabla 3.1 Distribución media mensual del número de heladas N_h , en 33 estaciones de Veracruz, calculada a partir de series de tiempo de temperatura mínima. Fuente: SMN.

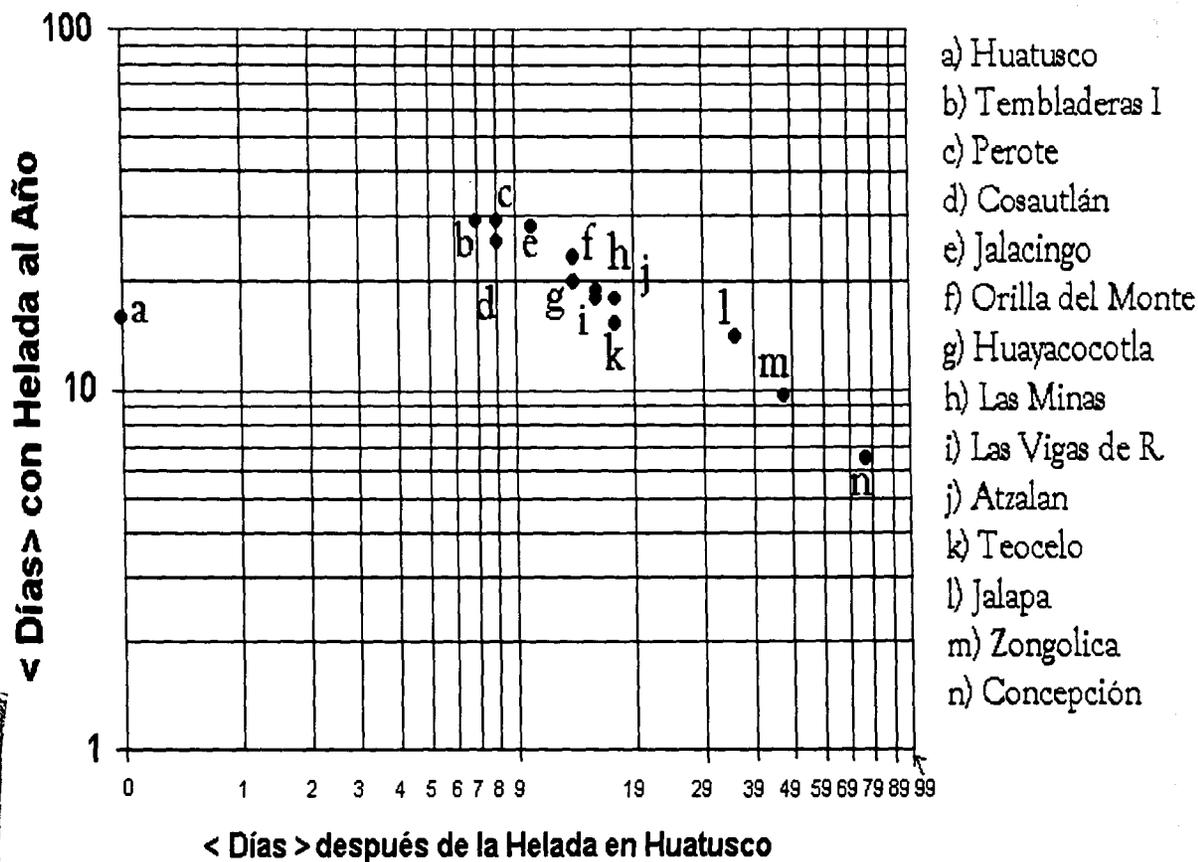
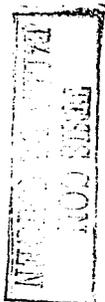


Figura 3.26 Comportamiento climatológico de las heladas, calculado con series de tiempo de temperatura mínima. La helada en *Huatusco* (a) es tomada como referencia.

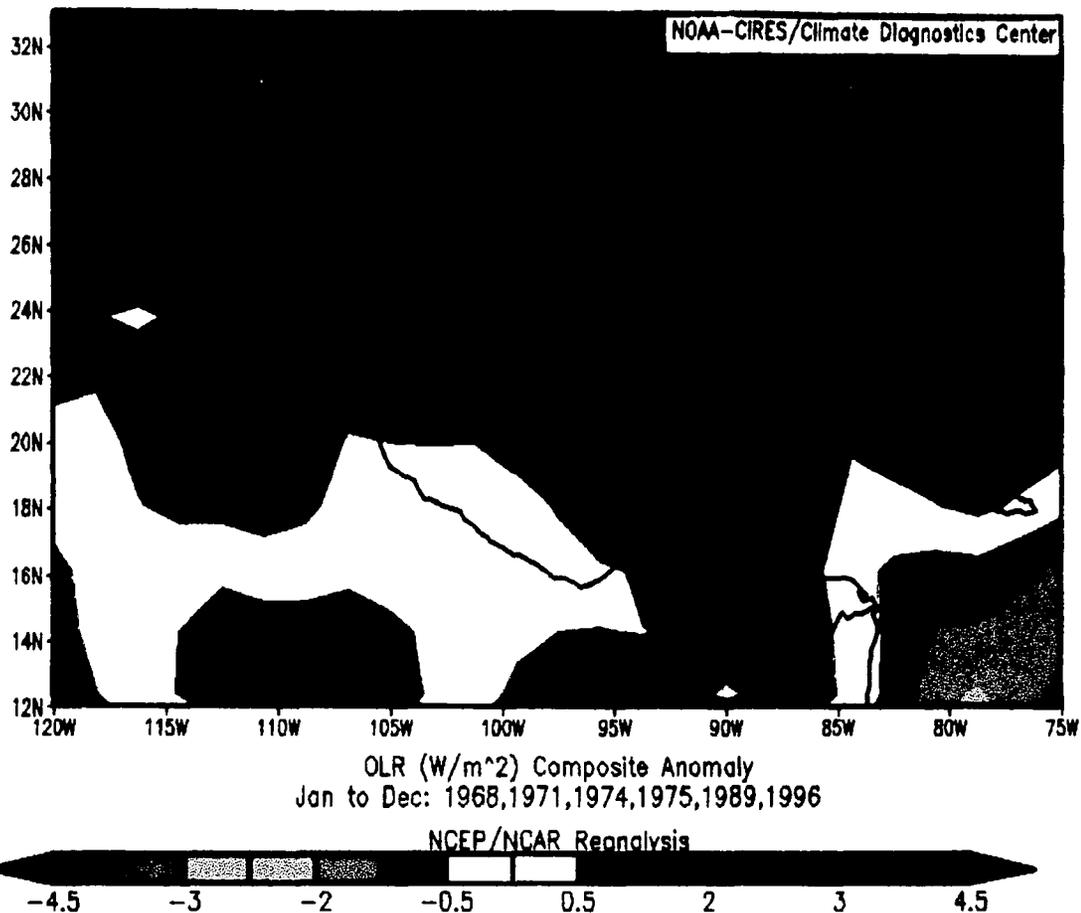


Figura 3.27 Radiación emergente de onda larga media anual ($W \cdot m^{-2}$) en los años de *La Niña* 1968, 1971, 1974-75, 1989 y 1996. Fuente: Datos de reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996).

TESIS COM
 RAFAEL

Tabla 3.2

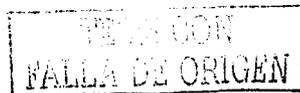
Estación	Latitud	(N)	Longitud	(W)	Altitud msnm
	o	'	o	'	
Atzalan	19	48	97	13	1842
Concepción	19	36	96	53	1130
Cosautlán	19	19	96	59	1290
Huatusco	19	9	96	57	1344
Jalacingo	19	49	97	19	1944
Jalapa	19	32	96	55	1999
Las Minas	19	41	97	8	1365
Las Vigas de R.	19	39	97	6	2400
Perote	19	35	97	16	2394
Tembladeras	19	30	97	7	2960
Teocelo	19	23	96	58	1218
Zongolica	18	40	96	59	1294

Afirmación también desprendida del mismo sentido clásico de centralidad estadística, propio de los *reanálisis*.

Se halló que el valor absoluto del $\langle \text{SOI} \rangle_{\text{anual}}$ en algunos años como 1961, 1963, 1976-79, 1981, 1984-86, 1990, 1995 y 1998 resultó relativamente pequeño. Estos estados se asociaron a una fase "neutral" del fenómeno de *El Niño y la Oscilación del Sur*. Esta condición climática está caracterizada por una *anomalía negativa* de REOL que domina el centro y sur de Veracruz (Figura 3.28). Las *heladas meteorológicas* en este caso sugieren el predominio del proceso advectivo sobre el radiativo. Esto se sustenta, no sólo por la nula anomalía de REOL sobre el resto del territorio veracruzano y el vínculo con el Pacífico vía Istmo de Tehuantepec. El mecanismo advectivo es muy probable en función de las *anomalías positivas* de los vientos en superficie. Las *anomalías positivas* de intensidad del viento se mantuvieron sobre los mencionados años neutrales, en la escala sinóptica.

Usando series de *temperatura mínima* se observó una modulación del fenómeno de las heladas en Veracruz. Esta modulación es con respecto al tiempo y está basada en las variables frecuencia y periodo libre, PLH⁴. A partir de esto, se encontró una mejor correlación con las variaciones interanuales que con la propia magnitud de la variable *índice de oscilación del sur*.

⁴ El PLH es el intervalo de tiempo (días) dentro del cual no se presentan heladas.



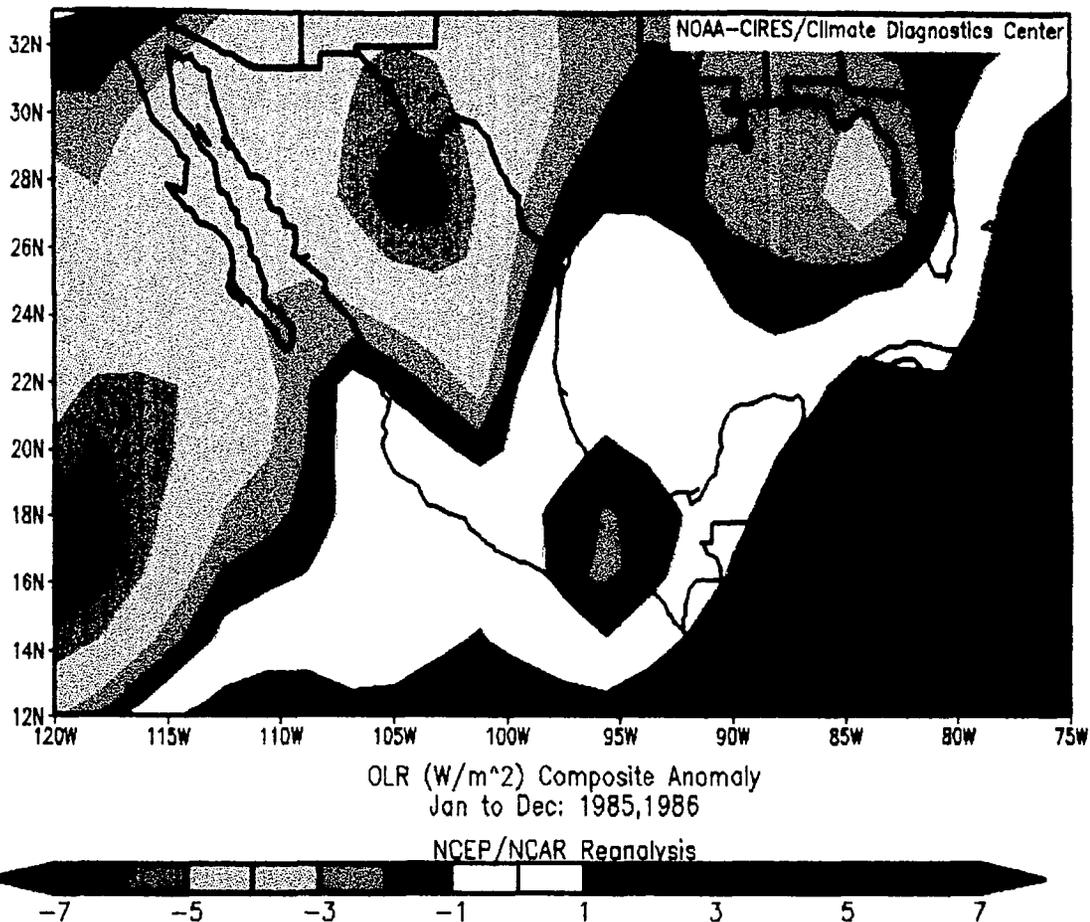


Figura 3.28 Radiación emergente de onda larga media anual ($W \cdot m^{-2}$) en años en la fase "neutral" del ENOS.
Fuente: Datos de reanálisis NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996).

En los casos analizados (Figura 3.29) destacó una fluctuación del régimen de heladas, incluso superior al inducido por *La Niña*. Las variaciones del PLH se ilustran en la Figura 3.30. La línea punteada sugiere un ciclo. Este ciclo no es permanente y está controlado por el signo de las anomalías de *temperatura superficial* del Golfo de México. El ciclo se cerró (ver Figura 3.8) en el periodo 1971-74 y fluctuó hasta 1985. Posteriormente se debilitó al elevar la *temperatura superficial* del mar en el periodo 1986-1995.

Se encontró que los distritos impactados por la helada son: *Huayacocotla*, *Martínez de la Torre*, *Coatepec* y *Fortín*. La función de rendimiento I_{ren} experimenta una inflexión más pronunciada en condiciones neutrales, con *La Niña* y en las transiciones de la *fase neutral* hacia las fases "fría" y cálida de *El Niño* y la *Oscilación del Sur*. El rendimiento del maíz bajo estas condiciones, desciende hasta media tonelada por hectárea (SIA, 1999).

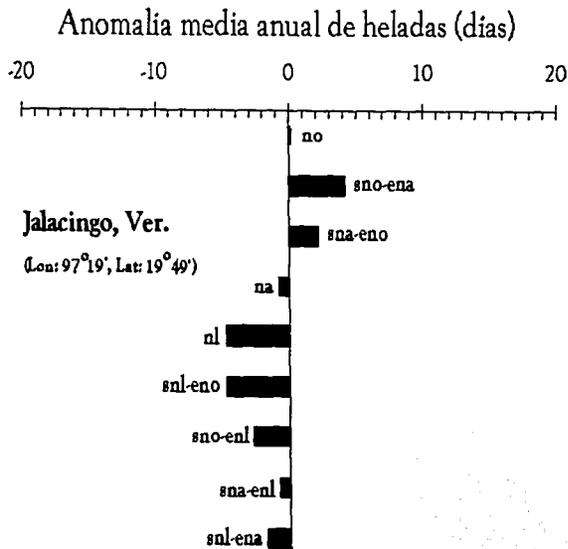
A diferencia de las heladas en otras épocas del año, las heladas inesperadas en un promedio de tres décadas, sólo se presentan en el distrito de *Fortín* y parcialmente en el distrito de *Coatepec* (Figura 3.31). Los valores en las isolíneas de la figura, indican el promedio de días con helada por estación del año (tres meses).

Las fluctuaciones interanuales en el periodo estudiado bajo el fenómeno de *El Niño* y la *Oscilación del Sur* se observan en torno al *Cofre de Perote* y al volcán *Pico de Orizaba*. La explicación a este hecho se encuentra en la dinámica de los vientos de valle-montaña, pues el descenso del aire "frío" (*viento catabático*) favorece al hidrometeoro, bajando el *punto de rocío* sobre los cultivos subyacentes.

TESIS CON
VALOR DE SALIR
ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

TESIS CON
FALTA DE ORIGEN
NUMERO 20

(a)



Abreviaturas:

no = *El Niño*

na = *La Niña*

nl = *Neutral*

sno-ena = Salida de *El Niño* – Entrada de *La Niña*

sna-eno = Salida de *La Niña* – Entrada de *El Niño*

snl-eno = Salida de *Neutral* – Entrada de *El Niño*

snl-ena = Salida de *Neutral* – Entrada de *La Niña*

sno-enl = Salida de *El Niño* – Entrada de *Neutral*

sna-enl = Salida de *La Niña* – Entrada de *Neutral*

(b)

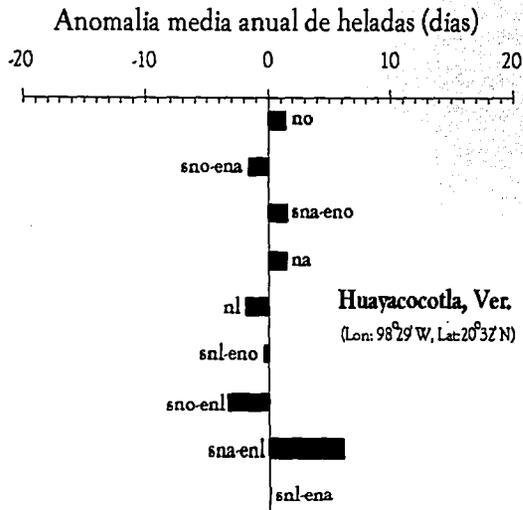
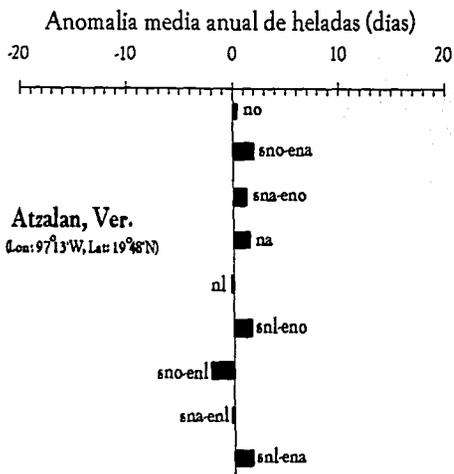
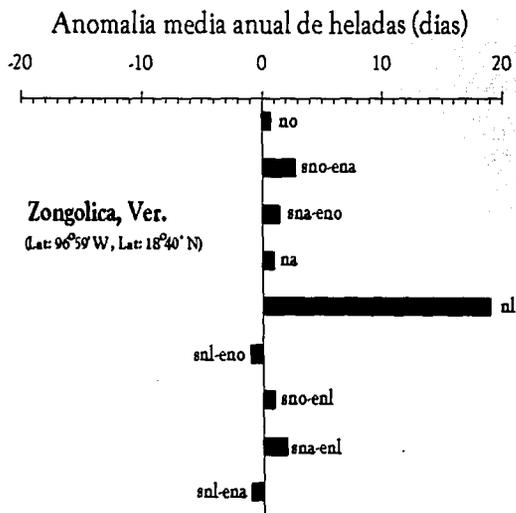


Figura 3.29 Modulación de la anomalia media anual de heladas por el ENOS, calculada con series de tiempo de temperatura mínima. (a) Jalacingo. (b) Huayacocotla.

(c)



(d)



Abreviaturas:

no = *El Niño*

na = *La Niña*

nl = *Neutral*

sno-ena = Salida de *El Niño* – Entrada de *La Niña*

sna-eno = Salida de *La Niña* – Entrada de *El Niño*

snl-eno = Salida de *Neutral* – Entrada de *El Niño*

snl-ena = Salida de *Neutral* – Entrada de *La Niña*

sno-enl = Salida de *El Niño* – Entrada de *Neutral*

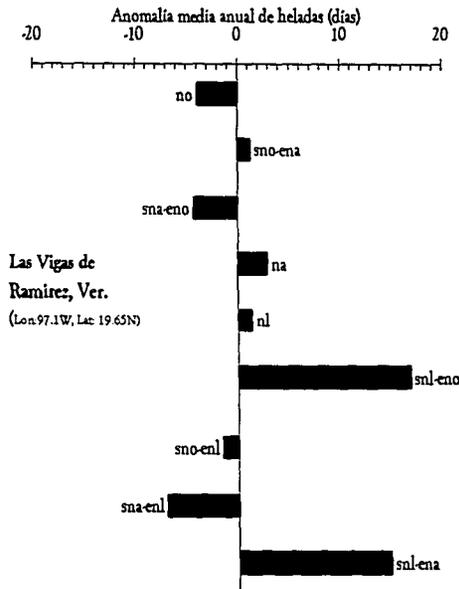
sna-enl = Salida de *La Niña* – Entrada de *Neutral*

UNIVERSIDAD
FACULTAD DE CIENCIAS
TESIS

Figura 3.29 CONTINUACIÓN Modulación de la anomalía media anual de heladas por el ENOS, calculada con series de tiempo de temperatura mínima. (c) *Atzalan* (d) *Zongolica*

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

(e)



Abreviaturas:

no = *El Niño*

na = *La Niña*

nl = *Neutral*

sno-ena = Salida de *El Niño* – Entrada de *La Niña*

sna-eno = Salida de *La Niña* – Entrada de *El Niño*

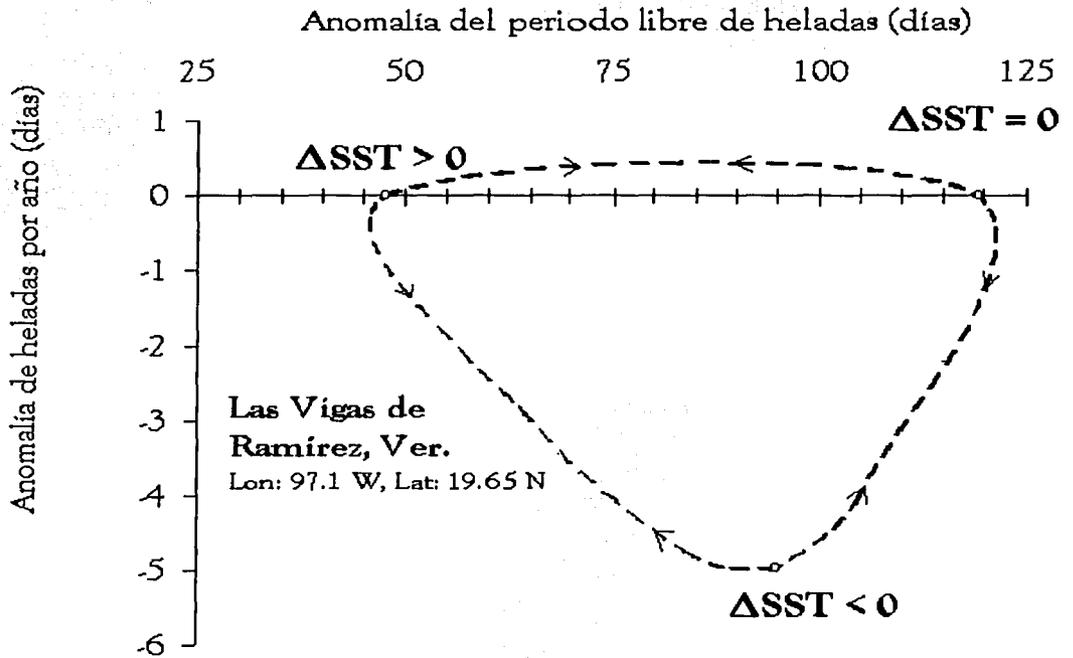
sno-enl = Salida de *Neutral* – Entrada de *El Niño*

sna-enl = Salida de *Neutral* – Entrada de *La Niña*

sno-enl = Salida de *El Niño* – Entrada de *Neutral*

sna-enl = Salida de *La Niña* – Entrada de *Neutral*

Figura 3.29 CONTINUACIÓN Modulación de la anomalía media anual de heladas por el ENOS, calculada con series de tiempo de temperatura mínima. (e) *Las Vigas de Ramírez*

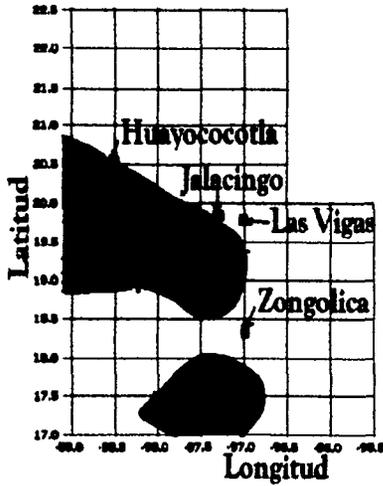


TESIS CON
FALLA DE REGISTRO

Figura 3.30 Ciclo de modulación de las heladas por anomalías de TSO del Golfo de México, calculado con series de tiempo de temperatura mínima.

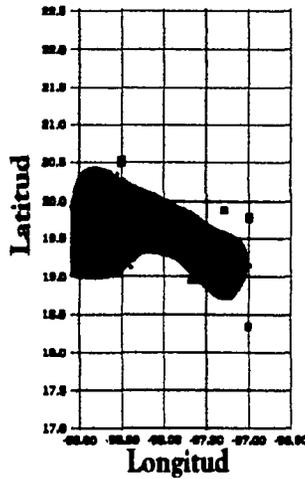
(a)

Primavera



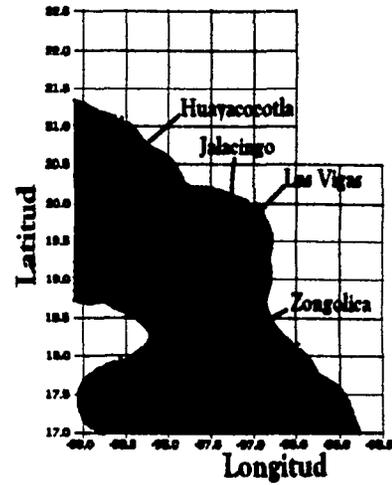
(b)

Verano



(c)

Invierno



1 < N_h < 3 5 < N_h < 7 9 < N_h < 11



3 < N_h < 5 7 < N_h < 9 N_h > 11

▲ *Volcán Pico de Orizaba*

△ *Cofre de Perote*

Figura 3.31 Número promedio de heladas, N_h . (a) Primavera (b) Verano (c) Invierno. Fuente: *Climatología East Anglia* (New et al., 1999).

FALL 1999

§ 3.3 Granizo

El análisis de las series de tiempo reveló que el granizo se presenta en las zonas montañosas de Veracruz; principalmente en sitios con altitudes mayores a 1800 msnm (Tabla 3.3). Los distritos agrícolas que reportaron siniestros del maíz por este hidrometeoro fueron *Coatepec*, *Fortín* y *Huayacocotla*.

Sobre tres estaciones del distrito de *Coatepec* se encontró que el granizo exhibió una marcha temporal cuasiperiódica (Figura 3.32). Se determinó que la oscilación de las tormentas de granizo abarca un periodo de entre tres a cinco años. Entre 1964 y 1989 el granizo se incrementó siguiendo al índice de oscilación del sur positivo, es decir, a *La Niña*. La explicación es congruente con los resultados obtenidos para la lluvia, dado que en esta fase del fenómeno de *El Niño* y *la Oscilación del Sur* se extiende e intensifica la actividad convectiva.

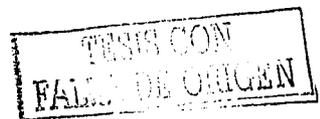
En contraste surgió un problema de inconsistencia entre la información agrícola y los datos meteorológicos en *Fortín* y *Huayacocotla*. Esto puede deberse a la baja eficiencia del sistema de observación climática utilizada. Se consideró que esta deficiencia procede tanto del diseño de la red, como del tiempo de intermediación entre registros (24 horas).

La escasa longitud de las *venas*⁵ y el corto tiempo de vida de las *andanas*, se contraponen a los métodos convencionales, toda vez que éstos se orienten a la investigación espacio-temporal del fenómeno. Además, la longitud media de separación de las estaciones consideradas en la figura 3.32 es de 14 km. Este valor es del orden de magnitud de las *venas* de granizo. En otros distritos, la separación entre estaciones alcanza 70 km.

Se sigue de lo anterior que para abatir la incertidumbre del granizo será necesario un replanteamiento de la fuente de información y la metodología. Dentro de las alternativas más adecuadas se tienen los productos de radar (Doviak y Zrnic', 1984). En síntesis, los resultados hallados sólo trascienden como diagnóstico local, dado que mantuvieron incertidumbre y baja representatividad espacial.

El diagnóstico local indica que en el periodo de 36 años la zona de influencia del granizo se encuentra en el centro de Veracruz (Figura 3.33). De acuerdo con la Figura 3.8 la anomalía de la *temperatura superficial del océano* del Golfo de México no

⁵ Terminología introducida en página 9



Estación	Lat(°)	Lat(')	Lon(°)	Lon(')	Elevación (msnm)	Promedio de días al año con granizo	Años con datos
LA TEMBLADERA	19	31	97	6	2727	4.258	31
COSCOMATEPEC	19	4	97	2	1588	1.364	33
JALACINGO	19	49	97	19	1944	0.806	31
FORTÍN	18	54	97	0	1016	0.667	42
NAOLICO	19	39	96	52	1605	0.633	30
NARANJAL	18	49	96	57	697	0.600	35
HUATUSCO	19	9	96	57	1344	0.515	33
ATZALAN	19	48	97	13	1842	0.394	33
PESCADOS	19	38	97	8	2938	0.394	33
LA FLORENCIA	17	39	95	9	50	0.300	30
MARTINEZ DE LA TORRE	20	4	97	3	152	0.294	34
CUATOTOLAPAN	18	8	95	18	14	0.265	34
LAS MINAS	19	41	97	8	1365	0.257	35
COYUTLA	20	30	97	39	245	0.212	33
PROGRESO DE ZARAGOZA	20	17	97	40	260	0.212	33
PLAYA VICENTE	17	50	95	49	95	0.212	66
JOLOAPAN	20	14	97	16	125	0.182	33
JALCOMULCO	19	20	96	45	330	0.171	35
EL RAUDAL	20	14	93	15	13	0.162	37
ANGEL R. CABADA	18	38	95	28	19	0.150	40
MOZOMBOA	19	30	96	27	70	0.129	31
ESPINAL	20	15	97	25	111	0.125	32
SANTA ROSA	19	27	96	27	68	0.125	32
POZA RICA	20	33	97	28	150	0.094	32
ÁLAMO	21	5	97	38	19	0.067	30
VILLA AZUETA	18	5	95	43	20	0.067	30
PÁNUCO	22	3	98	10	60	0.067	30
EL TEJAR	19	5	96	9	10	0.063	32
MELCHOR OCAMPO	20	20	97	32	200	0.063	32
ACTOPAN	19	30	96	37	311	0.057	35
EL REMOLINO	20	10	96	53	35	0.057	35
ACAYUCAN	17	57	94	55	88	0.050	40
JÁLTIPAN	17	58	94	43	46	0.033	30
NICOLÁS GARRO	18	15	95	32	20	0.033	30
EL COPITAL	18	0	97	26	57	0.032	31
CAMELPO	18	44	96	26	91	0.031	32
MATA ANONA	19	8	96	17	250	0.031	32
COYAME	18	26	95	1	335	0.028	36
EL COYOL	19	7	96	42	610	0.000	31
PUENTE NACIONAL	19	20	96	24	110	0.000	32

Tabla 3.3 Promedio de días al año con granizo. Cálculo basado en series de tiempo. Fuente: SMN.

TESIS
FALLA DE ORIENTE

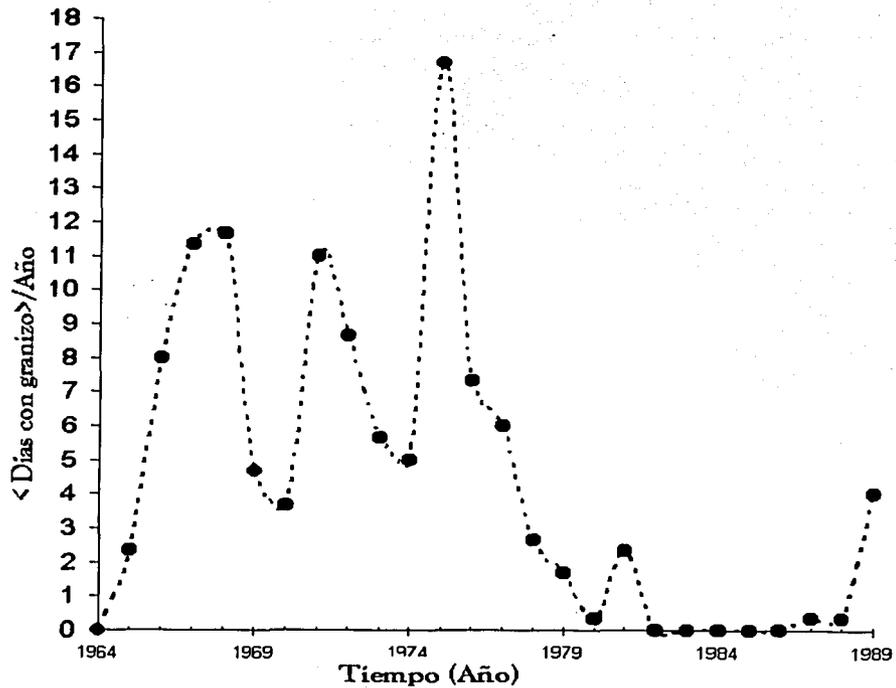


Figura 3.32 Régimen de granizo entre 1964 y 1989 en las estaciones *Perote, Tembladeras y Las Vigas de Ramírez*. Fuente: SMN.



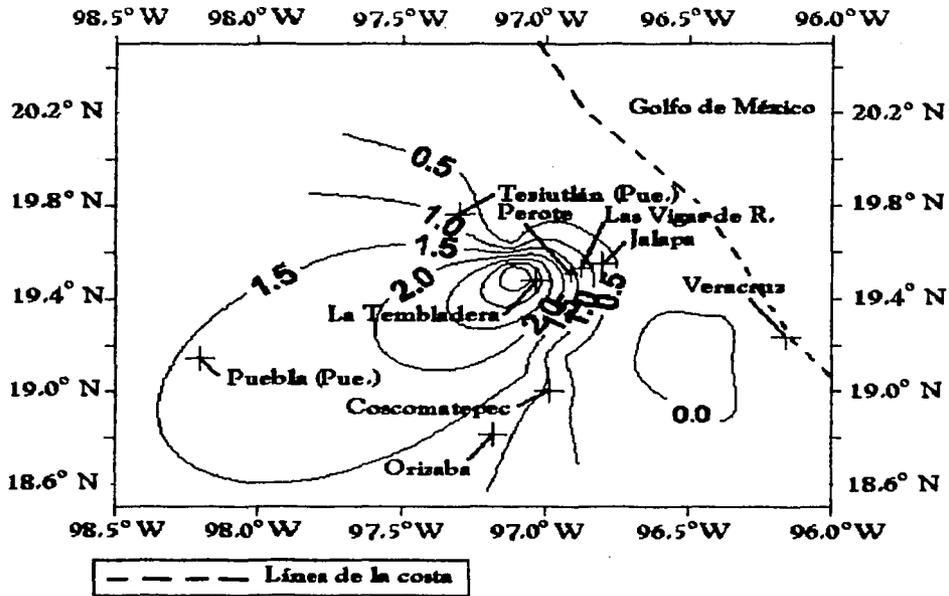


Figura 3.33 Promedio de días al año con granizo. Interpolación de Kriging.

Fuente: SMN.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

se encuentra correlacionada con el granizo observado en el distrito de Coatepec (Figura 3.32). Finalmente, se constató la afirmación de Bardsley (1990) que en regiones tropicales y tierras bajas el granizo es poco común.

§ 3.4 Síntesis de resultados

En el apartado anterior la discusión de resultados ha considerado el impacto en el rendimiento del maíz por tres hidrometeoros. Esto bajo tres condiciones climáticas globales (*El Niño*, *La Niña*, *Fase neutral*) y una condición de mesoescala (*anomalía de la temperatura superficial del océano*). Para cerrar el análisis formal de casos, se resumirá a continuación siguiendo el proceso inverso. Esto implica tomar una a una las condiciones climáticas, enunciando el impacto por cada uno de los hidrometeoros.

Impacto de hidrometeoros durante *El Niño*

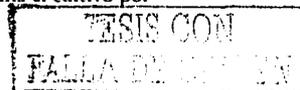
Durante *El Niño* se encontraron impactos en el rendimiento por tres hidrometeoros, siendo el más limitante la lluvia [Figura 3.12(c)] por la sequía. No se detectó repunte del rendimiento en el cultivo del maíz por el ligero incremento de las tormentas severas en noviembre (Figura 3.3). Así se tienen siniestros en ambos ciclos productivos: primavera-verano y otoño-invierno.

La señal estadística de la oscilación cuasibienal descubierta por el algoritmo numérico de la *ondeleta* de Paul es más marcada en *El Niño*. Los distritos cuyas series de tiempo reflejan QBO reportaron déficit en rendimiento.

La *canícula* en los años de *El Niño* es impactante para el maíz de temporal. Esto dado la coincidencia con los periodos de máxima *vulnerabilidad fenológica*. El distrito que reporta más impacto es *Pánuco* y *Las Choapas* el de menor impacto.

Los distritos *Huayacocotla* y *Martínez de la Torre* reciben simultáneamente impacto por la sequía y por las heladas⁶. Estas últimas desarrolladas principalmente por procesos radiativos. En esta fase del *índice de oscilación del sur* no se han reportado impactos por granizo.

⁶ El sistema de información agrícola de Veracruz no cuantifica la proporción específica en que se daña el cultivo por hidrometeoros, cuando éstos operan simultáneamente.



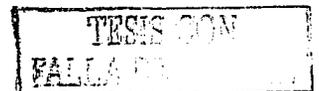
Impacto de hidrometeoros durante *La Niña*

Durante *La Niña* el impacto por la lluvia es debido a inundaciones, tanto pluviales como fluviales. Las inundaciones fluviales en años de *La Niña* afectan el rendimiento del maíz cosechado en el sur de Veracruz, principalmente por debajo de 18°N (Figura 3.21). El distrito que reporta más impacto es *Tuxpan* y *La Antigua* el de menor impacto. El ciclo primavera-verano es el único que ha reportado bajos rendimientos durante esta fase del fenómeno de *El Niño* y la *Oscilación del Sur*. Las heladas en años de *La Niña* afectan menos distritos que la lluvia, pero los estragos en el rendimiento se presentan en ambos ciclos productivos. Esto por el incremento del número de días con helada. Se encontró que si el índice de oscilación del sur experimenta una disminución en su valor absoluto por más de 6 meses (por ejemplo s_{na-nl} en la Figura 3.29) el impacto por heladas resulta fluctuante.

Impacto de hidrometeoros durante la *Fase neutral*

El impacto que los hidrometeoros ejercen sobre el cultivo del maíz durante la *fase neutral* del fenómeno de *El Niño* y la *Oscilación del Sur* resultó elevado, de forma relativa y con respecto a *El Niño* y *La Niña*. El impacto agrícola para los ciclos primavera-verano y otoño-invierno puede evaluarse a través de los índices de rendimiento I_{ren} (ecuación 2.6) o a través de *Tablas de Rendimiento Relativo Porcentual* (Tabla 3.4). De hecho, la expresión matemática del *rendimiento relativo porcentual* aparece cuando I_{ren} se expresa en forma alternativa: $I_{ren} = 100 - (A_{sin}/A_{sem}) \times 100$. Es decir: $I_{ren} = 100 + \text{rendimiento relativo porcentual}$.

Durante los periodos 1974, 1977-79, 1980-81 y 1983-85 considerados como años típicos de la *fase neutral* del fenómeno de *El Niño* y la *Oscilación del Sur*, se presentaron *siniestros* en los distritos *Tuxpan* (1) *Huayacocotla* (2) y *Forín* (5). Un cálculo elemental muestra que los rangos en que se ubicó el índice de rendimiento son 62% a 92%, 20% a 97% y 73% a 99%, respectivamente.



Impacto de hidrometeoros durante anomalías de la TSO

En términos generales, no se encontró una correlación significativa entre las anomalías de la *temperatura superficial del océano* del Golfo de México y el rendimiento del maíz. La *temperatura superficial del océano* parece responder a la aparición intempestiva de *heladas meteorológicas* durante el verano, destacando por su cuantía el distrito de *Fortín*. Estas heladas están asociadas estadísticamente al patrón de *anomalías negativa de temperatura superficial del océano* [Figura 1.5 (b)]. Se encontró que las fluctuaciones de la *temperatura superficial* del mar hacen variar tanto el periodo libre (PLH) como el número de días con helada al año. El algoritmo numérico de la *ondeleta* de Paul no reveló correlación entre la anomalía de la *temperatura superficial del océano* en el Golfo de México y el granizo.

TESIS CON
FALLA DE ORDEN

Capítulo 4

Conclusiones

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

§ 4.1 Conclusiones generales

El propósito de la tesis (apartado 1.1) fue determinar las condiciones de variabilidad climática asociadas con rendimientos extremos en el cultivo del maíz por hidrometeoros de impacto.

La metodología aplicada (figura 2.9) partió de la depuración de las series climatológicas de datos convencionales en superficie, mediante el diseño e implementación de dos algoritmos numéricos: (1) *Dilatación de Mellin* y (2) *Verificación del Cambio Intempestivo de Fase*. Estos algoritmos de depuración permitieron un análisis eficiente en el espacio y el tiempo, dado que abatieron la incertidumbre que persistía en las anomalías de lluvia, temperatura mínima y granizo, durante condiciones de *El Niño* – *La Niña*, en el estado de Veracruz.

Tomados como productos de esta etapa previa al análisis, se obtuvieron una técnica de remoción de discontinuidades y un procedimiento de exclusión de anomalías, ambos con operatividad sobre información climatológica convencional.

El análisis en el espacio y el tiempo se centró en el algoritmo numérico de la *ondeleta* de Paul. Este algoritmo numérico se aplicó a las series de tiempo de lluvia y granizo. También dentro de las conclusiones sobre la metodología aplicada, se tiene que la regionalización basada en la *varianza* de la *ondeleta global*, respondió al objetivo de caracterizar *siniestros*.

La relevancia de este trabajo se halla tanto en el ámbito práctico, como en el contexto científico (apartado 1.2). En términos prácticos, este trabajo contribuye técnicamente en la toma de decisiones relativa a la programación de los ciclos agrícolas del maíz. Esto en virtud de que la incidencia de un hidrometeoro (como por ejemplo la lluvia en inviernos con *La Niña*) no necesariamente implica *siniestro*.

En el ámbito científico entrega un conocimiento detallado del impacto climático asociado a la variabilidad interanual. El impacto del fenómeno de *El Niño* y la *Oscilación del Sur* en Veracruz revela heterogeneidad espacial y temporal.

Esto traslada el enfoque analítico de los patrones de rendimiento agrícola hacia un marco no-lineal y de causa múltiple. Esto porque la heterogeneidad espacial y temporal no es coherente con la visión de proporcionalidad entre conjuntos de



variables, pero sí resulta compatible con teorías de interacción más compleja entre varias escalas meteorológicas.

El balance de resultados prueba que se satisfizo el propósito de determinar las condiciones de variabilidad climática asociadas con los *siniestros*. Esto dentro del marco metodológico propuesto al inicio. En cuanto a la *vulnerabilidad* del cultivo, se concluye que los distritos de (1) *Tuxpan* (2) *Pánuco* (3) *Martínez de la Torre* (4) *Ciudad Alemán* y (5) *Jáltipan* son los más expuestos en ambos ciclos productivos.

Los valores críticos de la *varianza* correspondieron tanto con la fisiografía de Veracruz, como con los rasgos de incidencia de los sistemas sinópticos, "frentes fríos", ondas y tormentas tropicales. Esta conclusión se apoya en un conjunto de análisis con periodos interanuales de máxima *varianza*, similares a la figura 3.14.

Para extraer rasgos de largo plazo (> 64 meses) como los mostrados en la figuras 3.10 (II), 3.11 (II) y 3.12 (b) es recomendable que la *ondeleta* de Paul se reemplace por una *ondeleta* más eficiente. Inclusive la *dimensión fractal* puede aplicarse como medida de no-linealidad de la serie temporal de lluvia.

Con respecto a los hidrometeoros, se halló *correlación positiva* entre el *índice de la oscilación del sur* y las series de tiempo. El impacto de la lluvia, el granizo y las heladas resultó ligado a la modulación de la *actividad convectiva severa* (tormentas eléctricas) y no-severa (convección de cúmulos) por las fases del fenómeno de *El Niño y la Oscilación del Sur* y las anomalías de la *temperatura superficial del océano* sobre el Golfo de México. Especialmente, se mantuvo correspondencia directa entre las observaciones meteorológicas y los reportes de bajo rendimiento de las cosechas, con la excepción del granizo.

Se probó la utilidad del *algoritmo de dilatación de Mellin* como método directo de reconstrucción de series de tiempo con *datos reales*, lográndose abatir la incertidumbre por discontinuidad de registros. Esto es importante dado que se extendió la solución del problema científico ya explorado por otras disciplinas ambientales (apartado 1.5).

Similarmente, la implementación computacional del algoritmo numérico de la *ondeleta* de Paul fue proyectada como herramienta de análisis climatológico. Esto es debido a que posee alta eficiencia para extraer información esencial (no explícita) contenida en los datos, cuando éstos son tomados como un conjunto ordenado.

ISSIS CON
FALLA DE ORIGEN

Entre esta información esencial figuran tendencias sobre intervalos arbitrarios de tiempo, patrones de variabilidad y periodos de recurrencia de los máximos y mínimos. Estos últimos asociados con hidrometeoros de impacto.

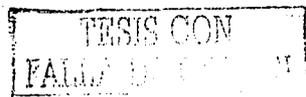
Específicamente, las *ondeletas* permitieron una zonificación de la *canícula* en dominios. Esto conforme a tres tipos de comportamiento: (1) *canícula* anticipada con "interrupción húmeda" (2) *canícula* de ingreso paulatino y (3) *canícula* de régimen prolongado. Esto fue factible porque la interpolación de Kriging ordenó en coordenadas longitud-latitud la diversidad de patrones de variabilidad temporal de la lluvia extraída de las series de lluvia.

En el caso de las sequías, se descubrió que la extensión del impacto de la *oscilación cuasibienal* es mucho menor al de la *canícula*, que se manifiesta sobre todo el territorio de Veracruz. Ante las fases del fenómeno de *El Niño* y la *Oscilación del Sur*, la *oscilación cuasibienal* hace fluctuar la lluvia acumulada. Esto se explica considerando el régimen de desplazamiento del sistema de vientos estratosféricos hacia niveles de mayor presión atmosférica, proceso adoptado para explicar fluctuaciones de la lluvia en el Sahel (Landsea *et al.*, 1996).

La interacción del sistema de vientos con las nubes cumuliformes implica una anomalía de *cizallamiento*. En consecuencia de este factor de forzamiento, se presenta inhibición en las etapas terminales del desarrollo de la nubosidad. De este efecto de modulación de la *oscilación cuasibienal* se halló evidencia sólo en los distritos de *Pánuco* y *Tuxpan*, por los estragos reportados en el rendimiento a causa de la sequía.

Las inundaciones resultaron devastadoras para la agricultura de temporal que se practica en el sur de Veracruz. Se halló que esto no sólo es consecuencia de los sistemas sinópticos del Pacífico y Golfo de México, sino de la respuesta de los ríos ante tormentas.

Asimismo, se ganó comprensión con respecto a la influencia que el Golfo de México ejerce sobre el clima de Veracruz, en la escala regional. Esto con respecto a la lluvia y a las heladas. En el primer caso, destaca el mecanismo de interacción del vórtice anticiclónico con la *capa límite*, referido en la discusión de resultados. A continuación, el control de las anomalías de la *temperatura superficial del océano* sobre el *periodo libre de heladas*. Esto a partir de los resultados obtenidos sobre un conjunto de catorce estaciones analizadas (de las cuales la figura 3.30 es tan sólo un elemento representativo).



Mientras que el granizo se encuentra correlacionado por la intensidad del *índice de la oscilación del sur*, las heladas parecen responder a las transiciones entre *El Niño* y *La Niña*. Estadísticamente las *heladas radiativas* se asociaron a las condiciones inducidas por *El Niño*, mientras que las *heladas advectivas* lo están con la fase opuesta. El grado de asociación se determinó contando casos ($T \cdot 0^{\circ}\text{C}$) con anomalías de *radiación emergente de onda larga* contra casos dominados por sistemas de viento, en los *reanálisis*.

Las heladas inesperadas son también un factor limitante para el maíz. Para Veracruz el fenómeno de la anticipación de las heladas lleva a un problema que cae dentro de la escala local, más que en la regional.

Se encontró que al salir de la *fase neutral* hacia cualquier fase de *El Niño* y la *Oscilación del Sur*, se produce un incremento en las heladas. Esta última conclusión sobre las heladas tiene baja representatividad estadística, dado que durante el periodo analizado se presentó muy pocas veces. En consecuencia, este punto deberá someterse a modelación numérica.

Con respecto al *ciclo vegetativo* de la planta, la sequía y las bajas temperaturas son las condiciones climáticas más impactantes al rendimiento. Estas inciden desde la *floración* hasta el llenado de grano. En cuanto al granizo, la etapa de *espigamiento* es la más vulnerable. Esto con respecto al análisis estadístico. Se deja a la modelación numérica las variaciones de los *ciclos vegetativos*, considerados hasta el momento como fijos en el mayor periodo de 200 días.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

§ 4.2 Problemas por resolver

Resultó en un problema por resolver la modelación del *ciclo productivo* del maíz a partir de los rasgos de variabilidad encontrados en cada hidrometeoro. Un modelo factible resulta ser el CERES-Maize (Jones y Kiniry, 1986). El CERES-Maize es un modelo mecanicista que realiza una simulación de la fisiología del desarrollo del maíz. Las rutinas de cálculo establecen un *balance* del agua (Gabrielle *et al.*, 1995) así como del contenido de nitrógeno y minerales presentes en el suelo agrícola.

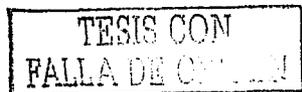
CERES¹ parte de variables geofísicas y de parámetros genético-biológicos. Entre las variables geofísicas está (1) *Lluvia* (2) *Temperaturas máximas y mínimas* (3) *Radiación neta* (4) *Albedo* (5) *Espesor de la capa de suelo* (6) *Humedad del suelo*. Con respecto a las dos primeras variables, CERES puede apoyarse de los resultados obtenidas para el estado de Veracruz, así como de la metodología descrita en el capítulo dos. Esto en cuanto a la depuración de información y análisis espacial y temporal.

La *radiación neta* puede ser incorporadas posteriormente dado que está contenida en bancos de información convencional del Servicio Meteorológico Nacional. Las variables *albedo*, *espesor de la capa de suelo* y *humedad del suelo*, no consideradas en este trabajo por la insuficiencia de datos y observaciones de campo, entran en un nuevo problema. Este problema puede tratarse con estimaciones de modelos de predicción climática.

La soluciones que viertan los modelos de predicción climática serán trascendentes, no sólo por el interés de la variabilidad climática interanual para estimar márgenes de sensibilidad del CERES (Mearns *et al.*, 1992) sino por las implicaciones arrojadas sobre el plano económico.

Las implicaciones económicas pueden ser derivadas de la experimentación numérica con el CERES- Maize, pues el modelo calcula el contenido de *materia seca* presente en el grano ($\text{gr}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{espiga}\cdot\text{planta}^{-1}\cdot\text{Ha}^{-1}$).

¹ De hecho CERES significa *síntesis de recursos ambientales del cultivo*, por sus siglas en inglés.



La totalidad de esta *materia libre de humedad* mide el rendimiento biológico ($\text{kg} \cdot \text{espiga}^{-1} \cdot \text{planta} \cdot \text{Ha}^{-1}$). Este último parámetro lleva a su vez a la determinación del rendimiento económico ($\text{kg} \cdot \text{Ha}^{-1}$) del cultivo.

En cuanto a la heterogeneidad espacial y temporal del impacto climático señalada en el apartado anterior, resulta en un problema por resolver la interpolación de campos de variables con métodos no-lineales, como por ejemplo las *redes neuronales artificiales* (López, 1997). Esto por la trascendencia que ha tomado en la actualidad el enfoque de las *redes neuronales artificiales*, dentro del área de *Ciencias de la Tierra*.

Por último, permanece como problema colateral la aplicación de la metodología desarrollada sobre otros estados del país y para otro tipo de cultivo de temporal.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Anexo A

Abreviaturas

Expresión	Significado
A	Zona pluviométrica
A	Abril, Agosto
ADM	Algoritmo de Dilatación de Mellin
anom	Anomalia
ANOP	Algoritmo Numérico de la Ondeleta de Paul
AVCIF	Algoritmo de Verificación del Cambio Intempestivo de Fase
B	Zona pluviométrica
C	Zona pluviométrica
CO ₂	Dióxido de carbono
D	Zona pluviométrica
D	Diciembre
DAAC	Centro de Distribución de Archivo Activo
DDR	Distritos de Desarrollo Rural
dds	Días después de la siembra
E	Zona pluviométrica
E	Este, Enero
ENSO, ENOS	El Niño y la Oscilación del Sur
F	Zona pluviométrica
F	Febrero
G	Zona pluviométrica
G	Variable de granizo
G	Granizo
GEV	Gobierno del Estado de Veracruz
GM	Golfo de México
H	Helada
J	Junio, Julio
JJA	Junio-Julio-Agosto
JMA	Agencia Japonesa de Meteorología
L	Lluvia
LT	Largo plazo
msnm	Metros sobre nivel del mar

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

M	Marzo, Mayo
no	El Niño
na	La Niña
nl	Neutral
N	Norte, Noviembre
NASA	Administración nacional de aeronáutica y el espacio
NOAA	Administración nacional de la atmósfera y el océano
NCAR	Centro nacional de investigación atmosférica
NCEP	Centro nacional de predicción
NSIPP	Proyecto de predicción estacional e interanual de la NASA
O	Octubre
OI	Otoño—Invierno
OLR	Radiación emergente de onda larga
PV	Primavera—Verano
QBO	Oscilación cuasibienal
REOL	Radiación emergente de onda larga (OLR)
sna-enl	Salida de La Niña—entrada de Neutral
sna-eno	Salida de La Niña—entrada de El Niño
snl-ena	Salida de Neutral—entrada de La Niña
snl-eno	Salida de Neutral—entrada de El Niño
sno-ena	Salida de El Niño—entrada de La Niña
sno-enl	Salida de El Niño—entrada de Neutral
S	Sur, Septiembre
SD	Desviación estándar
SEDAP	Secretaría de desarrollo agropecuario y pesquero
SIA	Sistema de información agropecuaria
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SOI	Índice de la oscilación del sur
SST	Temperatura Superficial del Océano
TSO	Temperatura Superficial del Océano
W	Oeste
WMO	Organización Meteorológica Mundial

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

101
Anexo B
Símbolos y Variables

TESIS CON
FALLA DE ORLEN

SÍMBOLO O VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
*	Conjugado complejo	
'	Datos reales	
< >	Promedio	
v	Operador de disyunción "o"	
α	Parámetro	
δ	Parámetro o desviación media	
λ	Coordenada de longitud, escala	°
μ	Índice	
v	Parámetro umbral	
ω, ω_k	Frecuencia	Hz
σ	Función auxiliar	
ϕ	Coordenada de latitud	
τ_i	Evaluación de la función escalón unitario de δT_i	
ζ	Variable auxiliar para la función escalón unitario	
Δ	Anomalia, variación	
Ψ	Función del tiempo	
Ψ_M	Ondeleta de Morlet	
Ψ_P	Ondeleta de Paul	
i	Índice	
j	Índice, unidad imaginaria compleja [$j^2 = -1$]	
k	Índice	
l	Índice, número de distrito	
M	Índice	
s_i	Dato de serie tiempo	
s_i^{rec}	Serie reconstruida	
t; t_i, t_f	Tiempo; tiempo "inicial", "final"	s; meses
u	Variable auxiliar	
A_{sem}	Área sembrada	Has.
A_{sin}	Área siniestrada	Has.
A_{cos}	Área cosechada	Has.
c	Normal climatológica	
C_Ψ	Parámetro de ondeleta	
CO_2	Dióxido de carbono	
E_a	Error absoluto	
F	Helada	
G	Variable de granizo	Día
H	Granizo	

SÍMBOLO O VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDADE S
id	Número (convencional) de estación pluviométrica	
I_{ren}	Función de rendimiento	
$Im \{ \cdot \}$	Parte imaginaria del complejo	
L	Dato de lluvia "perdido"	
L_m^{id}	Lluvia acumulada en m meses en la estación id	mm
\mathcal{M}	Transformada de Mellin	
N	Índice	
N_h	Número de días con heladas	
N_E	Número de estaciones	
OLR	Radiación emergente de onda larga	$W m^{-2}$
PLH	Periodo libre de heladas	Días
P_k^{id}	Lluvia observada el día k en la estación id	mm
P_q^{id}	Datos perdido de lluvia del día q en la estación id	mm
P_{SL}	Presión atmosférica a nivel del mar entre Tahití y Darwin	
P_M	Puntos de malla	
P_i	Serie tiempo de lluvia	
$Re \{ \cdot \}$	Parte real del complejo	
s(t)	Función del tiempo	
$S(\alpha)$	Transformada de Mellin de s(t)	
sgn(·)	Función signo	
SOI	Índice de la oscilación del sur	
S_i^{rec}	Dato reconstruido de serie tiempo	
SST	Temperatura superficial del océano	°C
T_i	Temperatura del aire	°C
T_L	Periodo asociado con la varianza de la lluvia	años
$T_L^{max(1)}$	Periodo de máxima varianza	meses
V	Varianza de la lluvia	mm^2
W_n	Transformada discreta	
X	Función del tiempo	
X_k	Serie tiempo	

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Anexo C

Algoritmo de la Transformada de Mellin

§ 1.0 Definición y propiedades de la Transformada de Mellin

La Transformada de Mellin de una función $s(t)$ está definida como (Gradshteyn y Ryzhik, 1980):

$$\mathcal{M}\{s(t)\} = \int_0^{\infty} s(t)t^{\alpha-1} dt = S(\alpha) \quad , \quad t > 0 \quad \text{C-1}$$

Haciendo los cambios de variables: $t = \exp(x)$, $\alpha = -j\omega$, $j = (-1)^{1/2}$ tenemos:

$$\mathcal{M}\{s(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\exp(x))\exp(-j\omega x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \sigma(x)\exp(-j\omega x) dx = F\{\sigma(x)\} = S(\omega) \quad \text{C-2}$$

Donde se ha definido $\sigma(x) = s(\exp(x))$. Esto demuestra que la Transformada de Mellin es equivalente a la Transformación de Fourier.

Partiendo de una función dilatada dependiente del tiempo $s(\delta t)$, afectada por el factor $0 < \delta < 1 \quad \wedge \quad \delta > 1$, la Transformada de Mellin resulta

$$\begin{aligned} \mathcal{M}\{s(\delta t)\} &= \int_{-\infty}^{\infty} \delta t^{-1} s(t) \exp[-j\omega (\log \delta + \log t)] dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \delta^{-j\omega+1} s(t) t^{-j\omega-1} dt = \delta^{\alpha+1} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) t^{\alpha-1} dt \end{aligned}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Es decir:

$$\mathcal{M}\{s(\delta t)\} = \delta^{\alpha+1} \mathcal{M}\{s(t)\}$$

Luego:

$$\mathcal{M}\{s(t)\} = \delta^{-(\alpha+1)} \cdot \mathcal{M}\{s(\delta t)\} \quad \text{C-3}$$

Esto implica que la transformada de Mellin de la función original $s(t)$, se obtiene de multiplicar a la transformada de la función dilatada, por un factor de escala.

Aplicando la inversa, resulta:

$$s(t) = \mathcal{M}^{-1} [\delta^{-(\alpha+1)} \cdot \mathcal{M}\{s(\delta t)\}] \quad \text{C-4}$$

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

§ 2.0 Implementación computacional del ADM

El algoritmo de dilatación de Mellin (ADM) fue implementado en una computadora personal con 32 Mbytes de memoria y 350 MHz de velocidad de proceso. En la programación, se utilizaron los paquetes Scilab 2.5 (INRIA, 1999) y Maple V (Scott, 1990; Geddes, 1991).

En la etapa previa al análisis, el ADM fue sometido a dos pruebas comparativas: 1) Prueba de "bondad de ajuste" y 2) Determinación de los tiempos de procesamiento y memoria requerida.

El objetivo de la primera prueba fue evaluar la capacidad del ADM para restituir datos perdidos en series de tiempo. Esto dada la ausencia de publicaciones específicas al respecto. La "bondad de ajuste", se determinó de un modo directo por comparación con la serie original, a partir del cálculo del error absoluto:

$$E_a = \sqrt{\sum_{i=1}^N (s_i^{rec} - s_i)^2} \quad C-5$$

(s_i^{rec} y s_i representan a los N datos de la serie reconstruida y original, respectivamente).

Así resulta claro que este error mantiene una proporción inversa con la "bondad de ajuste".

La prueba partió de una serie con 29 datos conocidos ($N = 29$). Posteriormente, se suprimieron premeditadamente datos en una proporción variable, obteniendo como resultado una serie con datos "perdidos" (Tabla 1). Después de aplicado el ADM se presenta una fuerte similitud con respecto a la serie original. Dado que en las series de datos climatológicos, se encuentran perdidos a lo sumo el 3% de los registros, los resultados de esta prueba lleva a la introducción de un error despreciable (Figura 1).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La segunda prueba se orientó hacia el tiempo de procesamiento en la computadora, así como a la demanda de memoria de los programas Scilab y Maple. En ambos casos, el objetivo fue saber cuál podría ser la eficiencia del cálculo numérico, usando series mayores (etapa de análisis). Los resultados se muestran en la Tabla 2. Se incluyeron como referencia adicional los cálculos con el método tradicional del análisis armónico de Fourier con cinco coeficientes no nulos.

Tabla 1

DATOS PERDIDOS	E_a
0%	0.45 %
7%	4.07 %
21%	5.11%
40 %	5.6%
60 %	7.4%
70 %	10.7%
80 %	27.5%
90 %	58.4%

TESIS COM
FALLA DE

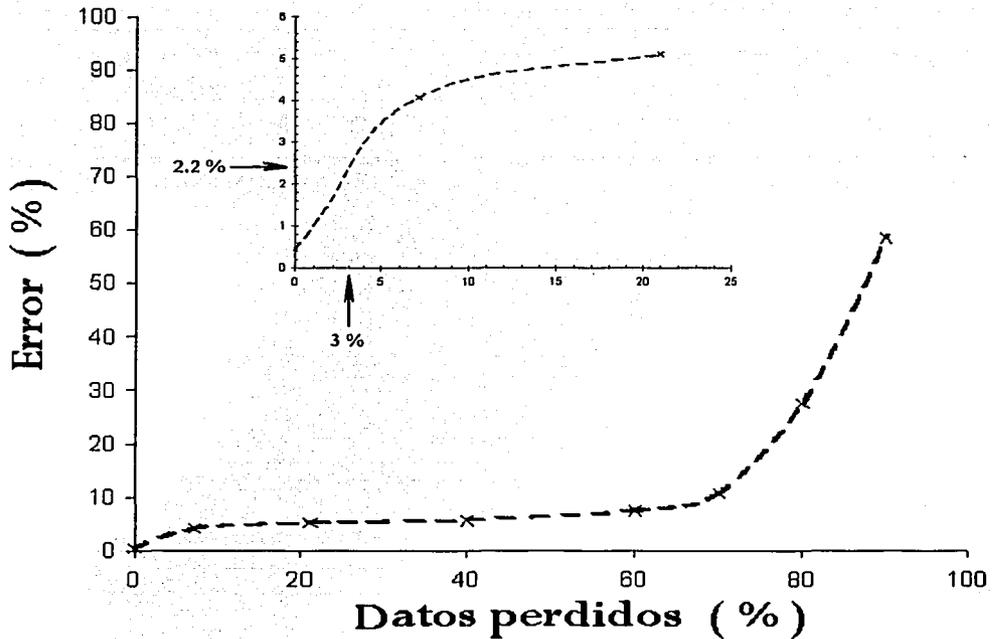


Figura 1 Distribución del error asociado por la reconstrucción de una serie temporal con datos perdidos, como resultado de una prueba implementada con el ADM. El porcentaje máximo de datos perdidos por serie temporal en los datos reales es 3%. Esto ubica al error introducido en 2.2 % aproximadamente.

TRABAJO CON
FALLA DE ORDEN

Tabla 2

Algoritmo	Tiempo de cómputo	Memoria utilizada
ADM	1.45 seg. (N=29) 4.18 seg. (N=290) 20.3 seg. (N=2900)	1.4 Kbytes 5.8 Kbytes 780.0 Kbytes
Análisis Armónico (Fourier)	1.41 seg. (N=29) 5.47 seg. (N=290) 28.03 seg. (N=2900)	1.4 Kbytes 6.2 Kbytes 919.0 Kbytes

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Finalmente, la función de demanda de memoria libre del ADM, resultó ser creciente y de tipo exponencial. Esto según datos obtenidos al ampliar la prueba, usando series de tiempo mayores de diez años (Figura 2).

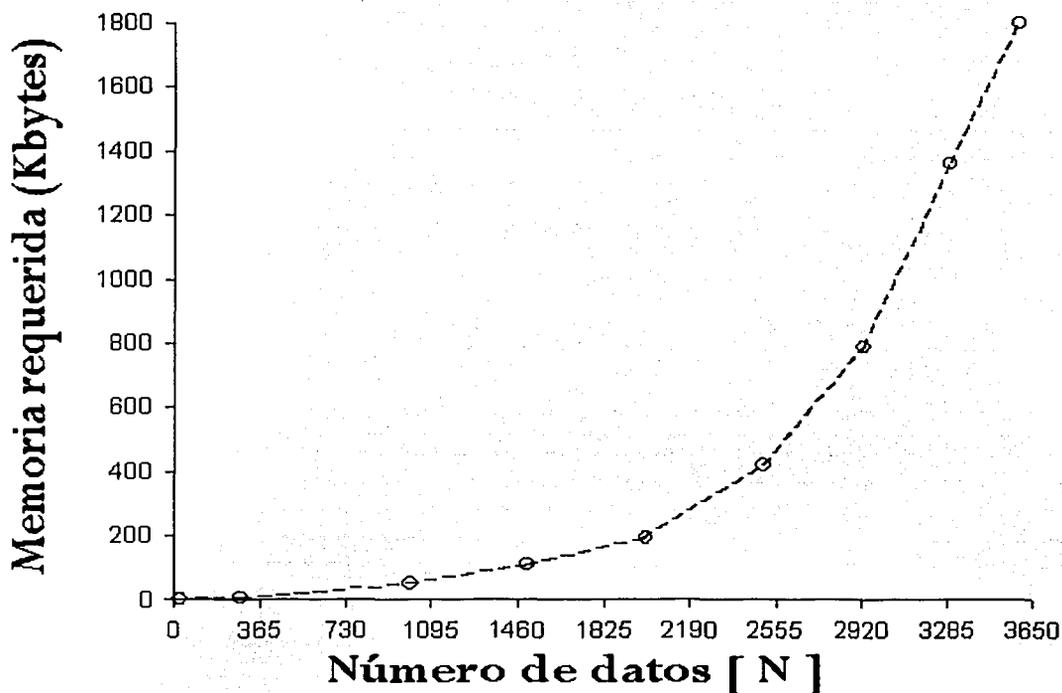


Figura 2 Requerimientos de memoria del ADM en función del número de datos de las serie temporal. Fuente: Algoritmo de dilatación de Mellin.

Anexo D

Algoritmo numérico de la ondeleta de Paul

§ 1.0 Definición

Ondeleta es toda función ψ de una variable u , que satisface las siguientes condiciones:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(u) du = 0 \quad \text{D-1}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi^2(u) du = 1 \quad \text{D-2}$$

$$0 < C_{\psi} < \infty \quad \text{D-3}$$

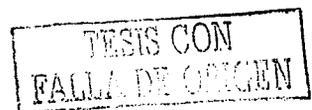
donde

$$C_{\psi} = \int_0^{\infty} \frac{|\Psi(v)|^2}{v} dv \quad \text{D-4}$$

y

$$\Psi(v) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(u) e^{-2\pi v u i} du \quad \text{D-5}$$

Las ondeletas son funciones capaces de extraer la información contenida en conjuntos numéricos finitos. Por tanto, son herramientas matemáticas útiles para analizar series de tiempo de variables observables. En la actualidad, es generalmente aceptado que el análisis con ondeletas complementa a las técnicas tradicionales, como por ejemplo los análisis espectrales y de correlación (Percival y Walden, 2000).



§ 2.0 Ondeleta de Paul

La ondeleta de Paul es una función compleja $\psi_p = \Psi_p(u)$ definida como:

$$\Psi_p(u) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{-2ui} e^{-\frac{u^2}{2}} \quad \text{D-6}$$

Esta función pertenece a la familia de ondeletas de Morlet:

$$\Psi_M(u) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{-\omega_0 ui} e^{-\frac{u^2}{2}} \quad \text{D-7}$$

En la Figura 1, se presentan las gráficas de las ondeletas de Paul y Morlet.

Sea $x(u)$ una señal continua. La información contenida en esta función, se puede extraer mediante la transformación integral:

$$W(\lambda, t) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_{\lambda,t}(u) x(u) du \quad \text{D-8}$$

Donde

$$\Psi_{\lambda,t}(u) = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \Psi\left(\frac{u-t}{\lambda}\right) \quad \text{D-9}$$

Siendo λ un parámetro de escala asociado con la longitud del intervalo de definición de la señal y t la variable independiente que representa el tiempo.

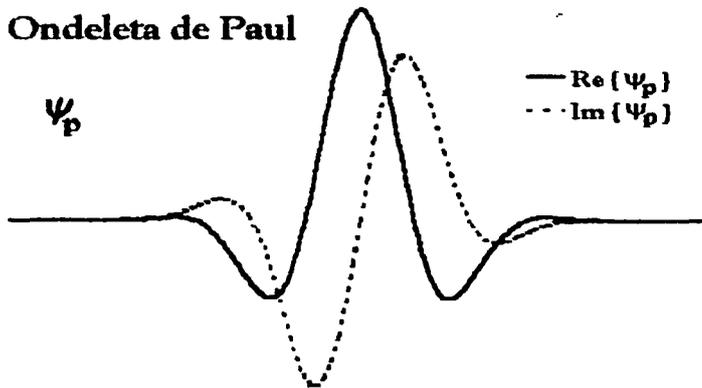
§ 3.0 Algoritmo numérico

El algoritmo numérico de la ondeleta de Paul (ANOP), es un método de cálculo basado en la transformación D-8, sólo que trasladando el problema al caso discreto de una serie tiempo X_k . La implementación computacional del ANOP,

TRABAJO CON
FALLA DE ORIGEN

(a)

Ondeleta de Paul



(b)

Ondeleta de Morlet

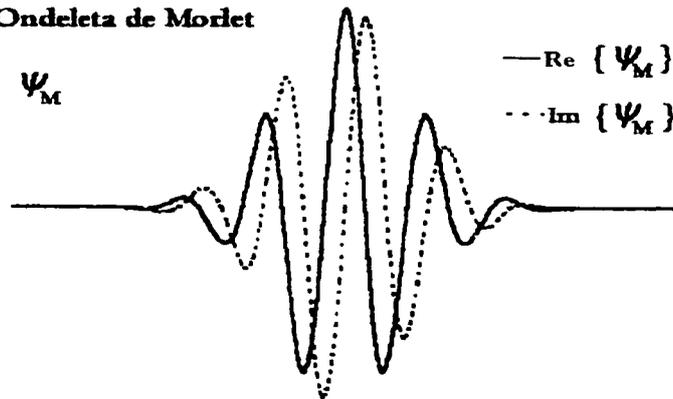


Figura 1 Gráficas de las ondeletas de (a) Paul y (b) Morlet.
 Re e Im simbolizan a la partes real e imaginaria,
 respectivamente.

se basa en el cálculo numérico de la transformada rápida de Fourier. Esto en virtud de representar mayor eficiencia. Así, se tiene que la transformación discreta queda:

$$W_n(s) = \sum_{k=0}^{N-1} F\{X_k\} F\{\Psi^*(s\omega_k)\} e^{\omega_k n t}$$

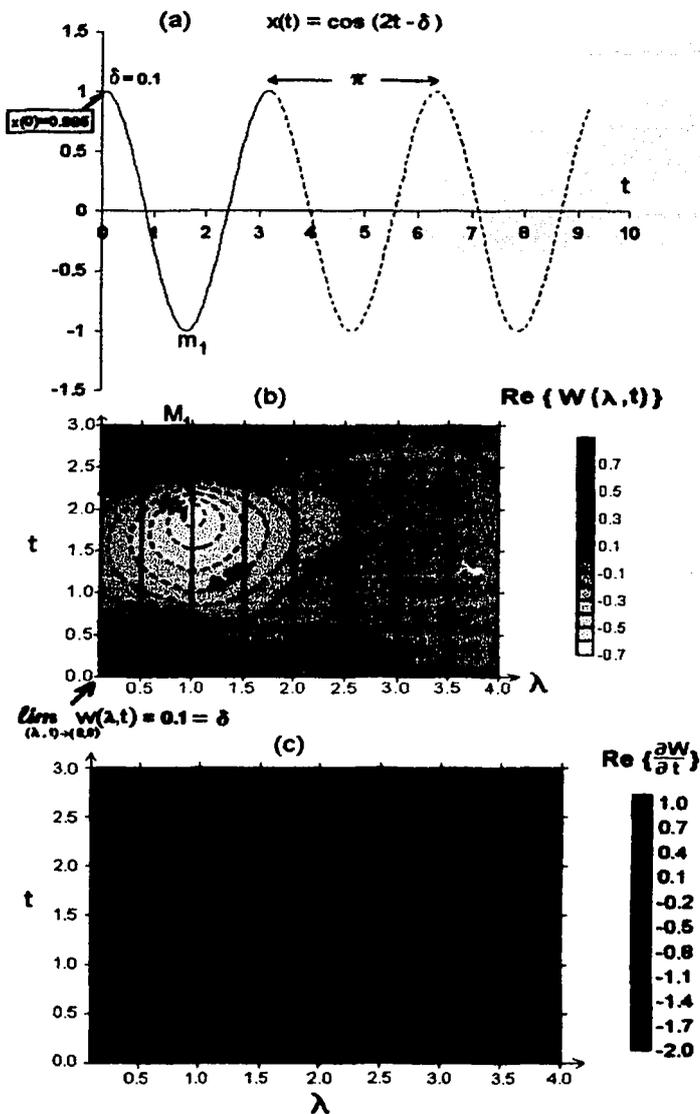
con

$$F\{X_k\} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X_k e^{-\frac{2\pi k n t}{N}}$$

§ 4.0 Relación de ψ_p con magnitudes físicas

A modo de ilustración de la correspondencia entre una señal y el parámetro λ , se considera a continuación la exploración de la función elemental armónica y continua $x(t) = \cos(2t - 0.1)$ por la ondeleta de Paul Ψ_p .

Calculando numéricamente la transformación $\text{Re}\{W(\lambda, t)\}$ en el dominio $\{(0,4) \times [0,3]\}$ se hallan dos máximos M_1, M_2 y un mínimo m_1 (Figura 2). La función $W(\lambda, t)$ evaluada en $\lambda = 1.0$ exhibe coincidencia de fase con respecto a $x(t)$. Este ejemplo muestra que existe la correspondencia entre las variables de la ondeleta y las magnitudes físicas en la función $x(t)$ que puede interpretarse como la solución matemática de un oscilador armónico de periodo π y constante de fase $\delta = 0.1$. En particular se tiene que el límite de $\text{Re}\{W(\lambda, t)\}$ cuando (λ, t) tiende a $(0,0)$ es igual a δ . Por último, la derivada temporal $\text{Re}\{\partial W(\lambda, t)/\partial t\}$ muestra valores críticos en $\lambda = 1$.



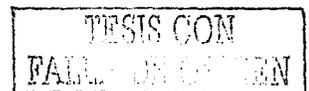
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Fuente: Algoritmo Numérico de la Ondeleta de Paul
Interpolación: Kriging

Figura 2 Ejemplo de la correspondencia entre las variables de la ondeleta y las magnitudes físicas. (a) La amplitud y fase del oscilador armónico $x(t) = \cos(2t - 0.1)$ están ligadas con el parámetro de escala λ (b) de la ondeleta de Paul de la función $x(t)$. (c) La derivada temporal $\text{Re}\{\partial W(\lambda, t)/\partial t\}$ muestra valores críticos en $\lambda = 1$

REFERENCIAS

- Abbott, P.F. 1986 "Guidelines on the Quality Control of Surface Climatological Data", WMO y WCP, Ginebra.
- Adams R. M., Bryant K. J., McCarl B. A., Legler D. M., O'Brian J., Solow A. y Weiher R., 1995 "Value of long-range weather information". *Contemporary Economic Policy* 8:10-19.
- Bardsley, W. E. 1990 "On the maximum observed hailstone size", *J. Appl. Meteor.* 29, 1185-1187.
- Bengtsson, L., y Shukla, J. 1988 "Integration of space and in situ observations to study global climate change". *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 69, 1130-1143.
- Betts, A.K. y Ridway, W. 1989 "Climatic equilibrium of the atmospheric convective boundary layer over the tropical ocean", *J. Atmos. Sci.*, 46, 2621-2641.
- Branick, M.L. 1993 "A comprehensive glossary of weather terms for storm spotters". NOAA Technical Memorandum NWS SR-145, 25 pp.
- Brunet, Y. y Collineau, S. 1994 "Wavelet analysis of diurnal and nocturnal turbulence above a maize crop". Foufoula-Georgio & Praveen Kumar Eds.
- Casey, K.S. y Cornillon, P. 1999 "A comparison of satellite and in situ-based sea surface temperature climatologies", *J. Climate* 12, 1848-1862.
- Chabalko, C. 2001 "Comparison of Paul and Morlet Wavelets for Measuring the Characteristic Scale of Peak Pressure Events on Low-Rise Structures", Tesis de Maestría, Virginia Polytechnic Institute.
- Changnon, S. A. 1970 "Hailstreaks", *J. Atmos. Sci.*, 27, 109-125.
- Changnon, S.A. y Changnon, D. 2000. "Long-term fluctuations in hail incidences in the United States". *Journal of Climate* 13: 658-664.



Conde, C., Ferrer, M. y Gay, C. 1998 "Variabilidad climática y agricultura", GEO-UNAM, 5, 1, 26-32.

Cotton, W.R. y Antes, R. A. 1989 "Storm and cloud dynamics", Academic Press, Inc., 593 pp.

De Fina, A. 1973 "Fenología y climatología agrícola", Buenos Aires, 213 pp.

Dorenbos, J. 1986 "Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos". Riego y Drenaje, 33, FAO, Roma.

Doviak, R.J. y Zrnic', D.S. 1984 "Doppler radar and weather observations", Academic Press, Orlando, FL, 480 pp.

Easterling, D.R., y Peterson, T.C. 1995 "A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series". Intl. J. Climatol., 15, 369-377.

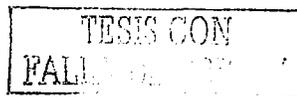
Edwards, R. y Weiss, S. 1996 "Comparisons between Gulf of Mexico sea surface temperature anomalies and southern U.S. severe thunderstorm frequency in the cool season", Preprints, 18th AMS Conference on Severe Local Thunderstorm, San Francisco, CA., pp 19-23.

Esbensen, S.K. y McPhaden, 1996 "Enhancement of tropical ocean and evaporation and sensible heat flux by atmospheric mesoscale system", J. Climate, 9, 2307-2325.

Flores, D. 1986 "Breve análisis sobre la agricultura de temporal en México". Instituto de Geografía, UNAM, 286 pp.

Gabrielle, B. Menasseri, S. y Houot, S. 1995 "Analysis and field evaluation of the CERES models' water balance component", Soil Sci. Soc. Am. J. 59: 1402-1411.

Gandin L. S. 1992 "Complex Quality Control and Decision Making Algorithms" Preprints 12th Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, June 22-26, Toronto, Ont., Canada. AMS Boston AMS 299-304.



Garrat, J.R. 1992 "The atmospheric boundary layer", Cambridge University Press, 316 pp.

Geddes, K.O. (1991) "Numerical integration using symbolic analysis" Maple Tech. Newsletter, No. 6, WMI, pp. 8-17.

Geer, I. W. 1996 "Glossary of Weather and Climate: with Related Oceanic and Hydrologic Terms". American Meteorological Society.

GEV, 1992 "Atlas del Estado de Veracruz", Gobierno del Estado de Veracruz.

GEV, 1999 "Boletín de información agropecuaria", 11, Gobierno del Estado de Veracruz.

Ghil, M. y Yiou, P. 1996 "Spectral methods: what they can and cannot do for climatic time series". En Decadal Climate variability: dynamics and predictability, Anderson & Willebrand eds.

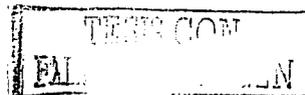
Gilmore, M.S. Straka, J.M. y Rasmussen, E.N. 2002 "Quantitative precipitation in simulated deep convection: sensitivity to the Hail/Graupel category" Preprints, 15th Conference on Numerical Weather Prediction, San Antonio, TX.

Gómez, L. 1992 "Distribución de la precipitación asociada a huracanes, como elementos para la zonificación agroclimática en México", Tesis de Licenciado en Geografía, UNAM.

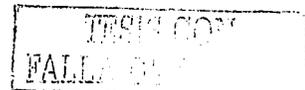
Goward, S.N. y coautores 1999 "Enhanced landsat capturing all the Earth's land areas", EOS, 80 (26): 289-293.

Gradshteyn, I.S. y Ryzhik, I.M. 1980 "Tables of Integrals, Series and Products", 4th Edición, Academic Press, Nueva York.

Green, P.M. 1996 "Regional Analysis of Canadian, Alaskan, and Mexican Precipitation and Temperature for ENSO Impact". COAPS Technical Report No. 96-6.



- Hansen, J.W., Jones, J.W. Kiker, C.F. y Hodges, A.H.. 1999. "El Niño-Southern Oscillation impacts on winter vegetable production in Florida". *Journal of Climate* 12:92-102.
- Hastings, P. A. 1990 "Southern oscillation influences on tropical cyclones activity in the Australian /South west Pacific region", *Int. J. Climatol.*, 10, 291-298.
- Haynes, P. H. 1998 "The latitudinal structure of the quasi-biennial oscillation", *Q.J.R. Meteor. Soc.* 124, 2645-2670.
- Hendon, H. H., y Woodberry, K. 1993 "The diurnal cycle of tropical convection", *J. Geophys. Res.*, 98, 16623-16637.
- Hildebrand, F.B. 1976 "Advanced Calculus for Applications", 2nd edition, Prentice Hall, NJ.
- Houghton, R.W. y Tourre, Y.M. 1992 "Characteristics of low-frequency sea surface temperature fluctuations in the tropical Atlantic", *J. Clim.*, 5, 765-771.
- Indeje, M., F. H. M. Semazzi, y Ogallo, L.J. 2000 "ENSO Signals in East African Rainfall Seasons". *Int. J. Climatol.* 20:19-46.
- INRIA, 1999 "Scilab reference manual", Unité de recherche de Rocquencourt, Project Meta2, Le Chesney Cedex, France, 954 pp.
- Jáuregui, E. 1974 "La isla de lluvia en la ciudad de México", *Rev. Recursos Hidráulicos*, 3, 138-151.
- Jáuregui, E. 1975 "Los sistemas de tiempo en el Golfo de México y su vecindad", *Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM*, 6, 7-36.
- Jáuregui, E. 1995 "Rainfall fluctuations and tropical storm activity in México", *Erdkunde*, 49, 39-48.
- Jáuregui, E. y Zitácuaro, I. 1995 "Los ciclones tropicales que afectan el estado de Veracruz", *La Ciencia y El Hombre*, 21.
- Jones, C.A. y Kiniry, J.R. 1986 "CERES-Maize. A simulation model of maize growth and development", Texas A&M Univ. Press, College Station.



- Kalnay, E. y coautores 1996 "The NCEP/NCAR 40 year reanalysis project", *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77, 437-471.
- Karl, T. R., Tarpley, D., Quayle, R. G., Diaz, H. F., Robinson, D. A. y Bradley, R. S. 1989 "The recent climate record: What it can and cannot tell us". *Rev. Geophys.*, 27, 405-443.
- Karl, T. R., R. G. Quayle, y Groisman, P.Y. 1993 "Detecting Climate variations and changes: New challenges for observing and data management systems". *J. Climate*, 6, 1481-1494.
- Kiladis, G.N. y Van Loon, H. 1988 "The Southern Oscillation. Part VII: Meteorological anomalies over the Indian and Pacific sectors associated with the extremes of the oscillation", *Mon. Wea. Rev.*, 116, 120-136.
- Klimowski, B.A., Hjelmfelt, M.R., Bunkers, M.J., Sedlacek, D. y Johnson, L.R. 1998 "Hailstorm damage observed from the GOES-8 satellite: 5-6 july 1996 Butte-Meade storm", *Mon. Wea. Rev.* 126, 831-834.
- Kuhnel, I. 1998 "The use of a multi-factor Southern Oscillation Index for the estimation of annual hailstorms frequencies in the Sydney area". *Internat. J. Climatology* 5, 1233-1258.
- Kulkarni, J. R. 2000 "Wavelet analysis of the association between the southern oscillation and the indian summer monsoon". *Int. J. Climatol.* 20, 89-104.
- Landsea, C.W., Gray, W.M. Mielke, P.W., Berry, K.J. y Taft, R.K. 1996 "June to september Rainfall in north Africa: verification of our 1996 forecasts and an extended range forecast for 1997", *Atmos. Sci.*, CSU, Fort Collins, CO, 9 pp.
- Latif, M., Barnett, T. P. Cane, M. A. Flügel, M. Graham, N. E. Storch, H. von Xu, J.-S. y Zebiak, S. E. 1994 "A review of ENSO prediction studies". *Climate Dynamics*, 9, 167-179.
- Lin, S., Liu, C. y Lee, T. 1999 "Fractality of Rainfall: identification of temporal scaling law". *Fractals* 7, 2, 123-131.

López, C. 1997 "Application of ANN to the prediction of missing daily precipitation records, and comparison against linear methodologies", Int. Conference in Engineering Applications of Neural Networks, Stockholm, 16-18 June, pp. 337-340.

Magaña V., Conde C., Sánchez O., Gay C. 1997 "Assessment of current and future regional climate scenarios for Mexico". *Climate Research*, Vol. 9, No. 1-2 (1997).

Magaña, V. (Editor) 1999 "Los impactos de El Niño en México", Dirección General de Protección Civil, Secretaría de Gobernación, 228 pp.

Magaña, V., Amador, J.A. y Medina, S. 1999 "The mid-summer drought over Mexico and Central America", *J. Climate* 12, 1577-1588.

Marcus, M.G. y Brazel, S. W. 1984 "Climate changes in Arizona's future", *ASCP*, 1, Arizona State University.

Maruyama, T. 1997 "The quasi biennial oscillation (QBO) and equatorial waves - A historical review", *Meteorology and Geophysics*, 48, 1, 1-17.

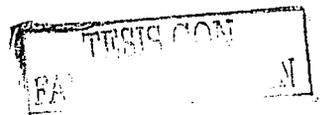
McCoy, E.J. y Walden, A.T. 1996 "Wavelet analysis and synthesis of stationary long memory process", *J. Comp. Graph. Stat.*, 5, 1, 26-56.

Mearns, L.O, Rosenzweig, C. y Goldberg, R. 1992 "Sensitivity analysis of the CERES-wheat model to changes interannual variability of climate", U.S. Environmental protection agency, Washington, D.C.

Messina, C.D., Hansen, J.W. y Hall, A.J. 1999 "Land allocation conditioned on ENSO phases in the Pampas of Argentina". *Agricultural Systems* 60: 197-212.

McLowery, E. 1973 "Error Analysis of meteorological network data." Preprints Third Conf. on Probability and Statistics in Atmospheric Science, AMS, 175 - 180

McMaster, H. 1997 "A tale of hail", *Nat. Haz. Quarterly*, 3, 4.



Miller, A., Thompson, J.C., Peterson, R.E., y Haragan D.R., 1983 "Elements of Meteorology", Cuarta Edición, C.E. Merrill Publishing Co., Columbus, Ohio, 417 pp.

Monreal, M.A. y Salas, D.A. 1997 "Circulación y estructura termohalina del Golfo de México", Contribuciones a la oceanografía física en México. Monografía Número 3, Unión Geofísica Mexicana, pp. 183-199.

Naujokat, B. 1986 "An update of the observed quasi biennial oscillation of stratospheric winds over the tropics", J. Atmos. Sci. , 43, 1873-1877.

Negrete, R. 2002 "Caracterización espectral de la precipitación pluvial de acuerdo al ciclo vegetativo del maíz en Tepechitlán, Zacatecas", Tesis de licenciatura en Ingeniería Geofísica, UNAM, 80 pp.

New, M.G., Hulme, M. y Jones, P.D. 1999 "Representing twentieth century space time-climate variability. Part I: Development of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology". J. Climate 12, 829- 856.

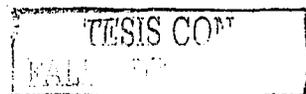
Ojeda, M. M., Tejeda, A., Mahe, M. y Ruiz, S. 1993 "Análisis preliminar de las tendencias climáticas en tres localidades del Estado de Veracruz, y sus posibles causas", Boletín del Instituto de Geografía, 27, UNAM, 49-67.

Oliver, M.A. y Webster, R. 1990 "Kriging: a method for interpolation for geographical information system", Int. Journal Geographical Information System, 4, 3, 313-332.

Orozco, S. 2000 "Cambio climático regional en Tlaxcala", Tesis de Maestría en Geografía, UNAM, 113 pp.

Percival, D.B. y Walden, A. T. 2000 "Wavelets methods for time series analysis", Cambridge University Press, Nueva York, 597 pp.

Pereyra, D. y Tejeda, A. 1993 "On simulation of air temperature curve near the ground in presence of frost in Valley of Perote (México)", Int. J. Biometeorol., 37, 2, 101-103.



Pinsky, M.A. 2003 "Introducción al análisis de Fourier y las ondeletas", Editorial Thomson, 376 pp.

Post, E. y Stenseth, N.C. 1999 "Climatic variability and plant phenology", *Ecology* 80(4): 1322–1339.

Pruppacher, H. R. y Klett, J.D., 1978 "Microphysics of Clouds and Precipitation", Reidel, Boston.

Quinn, W., Neal, V. y Antunez, S. 1987 "El Niño occurrences over the past four and half centuries", *J. Geophysical Res.*, 92, c 13, 14449-14461.

Rotunno, R. y Klemp, J. 1985 "On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorm", *J. Atmos. Sci.*, 42, 3, 271–293.

Sánchez, O. 1998 "El fenómeno de heladas inesperadas en México", Tesis de Maestría, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 64 pp.

Scaife, A. A., Butchart, N., Warner, C.D., Stainforth, D., Norton, W.A. y Austin, J. 2000 "Realistic quasi biennial oscillations in a simulation of the global climate", *Geophys. Res. Let.* 27, 3481–3484.

Schneider, S. H. 1996 "Encyclopedia of Climate and Weather", Oxford University Press, New York, NY, vols. 1 y 2, 929 pp.

Scott, T. 1990 "Recipes for solving definite integrals involving exponentials and logarithms (Part II)". *Maple Tech. Newsletter*, No. 5, WMS, pp. 16-23,

SIA, 1999 "Boletín del Sistema de Información Agropecuario", Coordinación de planeación, programación e informática, Gobierno del Estado de Veracruz, Vol. I, Núms. 2 a 5.

Sittel, M. 1994 "Differences in the Means of ENSO Extremes for Temperature and Precipitation in the United States". COAPS Technical Report 94-2.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Sonka S. T., Lamb P. J., Hollinger S. E. y Mjelde J. W. 1986 "Economic use of weather and climate information: Concepts and an agricultural example". *Journal of Climatology* 6:447-57.

Statsoft, 1998 "Statistica for Windows: computer program manual", StatSoft Inc, Tulsa, OK, 518 pp.

Takahashi, M., Zhao, N. y Kumakura, T. 1997 "Equatorial waves in a general circulation model simulating a quasi biennial oscillation", *J. Meteor. Soc. Japan* , 75 , 529-539.

Tejeda, A. y Maruri, M. 1991 "La intensidad de la sequía interestival en el Estado de Veracruz, estimada a partir de datos normales de precipitación", *Memorias del 5º Congreso Nacional de Meteorología, OMMAC*, 101-106.

Tejeda, A., Sánchez, J. F. y Pérez, A. 1993 "Comparación gráfica de la temperatura media anual y de la precipitación total anual de Xalapa, contra los índices de anomalías climáticas globales en el periodo 1923-1988", *GEOS, Bol. Unión Geofís. Mex.*, 13, 4 , 11-15.

Thompson, R.L. 1992 "Equilibrium theta-e over the Gulf of Mexico and its relationship to severe thunderstorms in the cool season", M.S. Thesis, School of Meteorology, University of Oklahoma, 119 pp.

Tomas, R. A., y P. J. Webster, 1997 "The role of inertial instability in determining the location and strength of near-equatorial convection", *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 123, 1445-1482.

Torrence, C. y Webster, P.J. 1995 . "The predictability barrier in interannual variability". En *Proceedings of 19th Annual Climate Diagnosis Workshop*, College Park, 14 -18 , 454 pp.

Torrence, C. y Webster, P. J. 1998 "The annual cycle of persistence in the El Niño-Southern Oscillation statistics". *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124, 1985-2004.

Trenberth, K. E., y Paolino, D.A. 1980 The Northern Hemisphere sea-level pressure sata set: Trends, errors, and discontinuities. *Mon. Wea. Rev.*, 108, 855-872.

Trenberth, K. E., Stepaniak, D. P., Hurrell, J. W. y Fiorino, M., 2000 "Quality of reanalyses in the tropics", *J. Climate*, 14, 1499-1510.

Tung, Y.K. 1990 "Mellin Transform Applied to Uncertainty Analysis in Hydrology/ Hydraulics", *Journal of Hydraulic Engineering* 116(5):659-674.

USDC 1995 "Federal Meteorological Handbook No. 1, Surface Weather Observations and Reports", United States Department of Commerce, OFCMSSR, pp. A1-A11.

Walters, K. y Hastenrath, S. 1989 "Annual cycle and long-term trends of circulation and climate variability over the tropical ocean", *J. Climate*, 2, 1329-1351.

Wang, Y. 1995 "Jump and sharp cusp detection by wavelets", *Biometrika*, 82, 2, 385-397.

Wang, B., y Y. Wang, 1996 "Temporal structure of the Southern Oscillation as revealed by waveform and wavelet analysis". *J. Climate*, 9, 1586-1598.

WMO, 1988 "Technical Regulations", WMO, 49, Ginebra.

Yeo, S., R. Leigh y Kuhnel, I. 1999 "The April 1999 Sydney hailstorm". *Nat. Haz. Quarterly*, 5, 2.

Zhang, Z. y Krishnamurti, T.N. 1997 "Ensamble forecasting of hurricane tracks", *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 12.

