



03060
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA 2

**CARACTERIZACIÓN DE LA
ACTIVIDAD ELÉCTRICA
SOBRE LOS GOLFOS DE
MÉXICO CON EL SISTEMA
LIS/TRMM**

T E S I S

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

P R E S E N T A

OSCAR ALVAREZ GASCA

Director: DR. Tomás Morales Alcoltzi

Ciudad Universitaria

Febrero, 2002

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.

A mi esposa Ana Delia
y a mis hijas Susy y Cristy,
por su gran amor, apoyo y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento al Dr. Tomás Morales Acoltzi, investigador del Centro de Ciencias de la Atmósfera por su asistencia en la dirección de este trabajo. Mi reconocimiento por su gran calidad profesional y humana.

Asimismo, manifiesto mi gratitud al Fís. Ángel Barrientos Santiago, M.I. Domitilo Pereyra Díaz, Dr. Adalberto Tejeda Martínez y Dr. Juan Cervantes Pérez, distinguidos académicos de la Universidad Veracruzana, por su firme apoyo y amistad.

Al Dr. Michael W. Douglas, investigador del NSSL/NOAA por su cordial asesoría, revisión y valiosos comentarios.

Al maestro Tomás Uscanga Constantino (Morfosintaxis del Español), de la Facultad de Idiomas de la Universidad Veracruzana, en reconocimiento por su calidad y gran ayuda.

A los honorables miembros del Jurado, por sus notables aportaciones concedidas a este trabajo.

Contenido	Página
I. Introducción	1
II. Metodología	10
III. Resultados y Discusión	13
IV. Conclusiones y Problemas Abiertos	36
V. Referencias	38
Anexo A: "Símbolos y Variables"	42
Anexo B: "Abreviaturas"	44

I. Introducción

Las tormentas eléctricas son manifestaciones del tiempo severo (Sturtevant, 1994). Se pueden detectar con varios tipos de instrumentos y métodos. Por lo común se miden desde tierra, como lo efectúa la Red Nacional de Detección de Relámpagos (NLDN) de los Estados Unidos (Cummins *et al.*, 1998). Por la evidencia científica acumulada en el pasado con datos tomados desde superficie, se conoce que las tormentas que desarrollan relámpagos pueden ocurrir durante todo el año (Doswell, 1982). Los resultados estadísticos a la fecha muestran que las tormentas con relámpagos forman un ciclo, globalmente. Este ciclo de actividad eléctrica presenta al menos un máximo dentro de la estación de verano (Gary, 1991). La regularidad de este proceso es un aspecto aún no bien entendido, así como tampoco lo están las anomalías observadas sobre escalas temporales de un mes o menores.

En las zonas costeras las tormentas eléctricas se encuentran asociadas a menudo con sistemas de circulación de pequeña escala (Simpson, 1994). Sobre otros espacios, las tormentas con intensa actividad eléctrica aparecen ligadas con nubes activadas por un campo de flujo multicelular (Ray *et al.*, 1987), así como con sistemas sinópticos que producen lluvia por actividad convectiva (Petersen y Rutledge, 1998).

El proyecto *Misión de Monitoreo de la Lluvia Tropical (TRMM)* inició sus operaciones en noviembre de 1997 con el lanzamiento de un satélite de exploración. Esta plataforma permitió obtener estimaciones de la precipitación en áreas de $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ localizadas entre 38° N y 38° S por periodos de 30 días (Simpson *et al.*, 1995). El satélite se mantuvo a aproximadamente 350 km de altura, con una velocidad media de desplazamiento de 7 km s^{-1} .

La instrumentación a bordo está formada por tres grandes sistemas: adquisición de imágenes por micro-ondas (TMI), radiometría por canales visibles e infrarrojos (VIRS) y percepción de precipitación por radar (PR). También cuenta con dos instrumentos que son el sistema de detección de relámpagos por imágenes (LIS) y el dispositivo de medición de energía global radiante y de nubes (CERES).

El sistema LIS observa manifestaciones de electricidad atmosférica derivada de procesos convectivos leves y de tormentas severas (Christian, 1999). Esto lo efectúa con un dispositivo óptico de alta resolución, que percibe secciones transversales horizontales de atmósfera (Figura 1.1) de manera continua (Christian *et al.*, 1999).

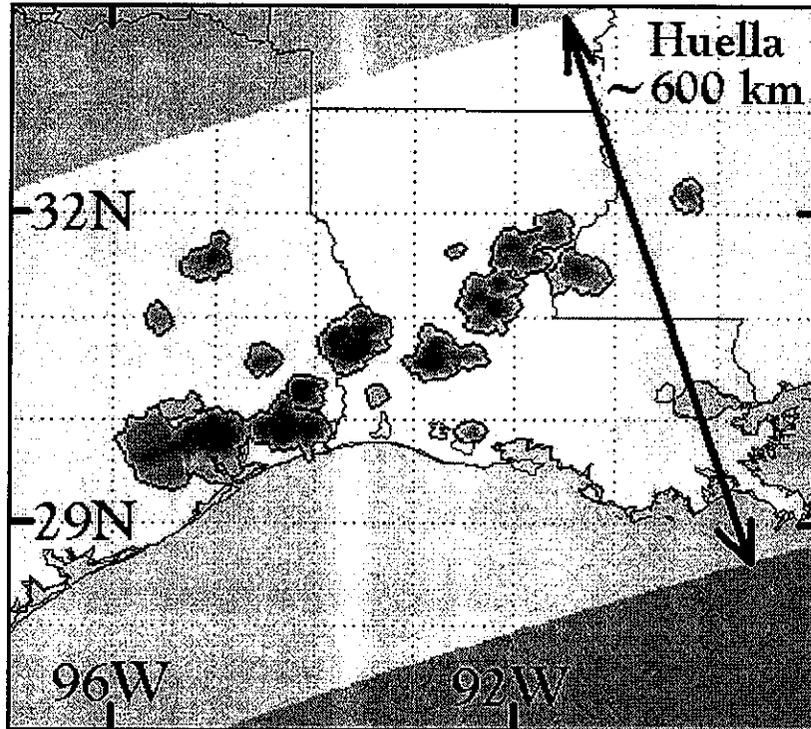


Figura 1.1 Ancho de la huella del sistema LIS. Las manchas más oscuras sobre la imagen indican sitios de alta actividad de relámpagos sobre Louisiana y el este de Texas (EUA) el 22 de junio de 1998 a las 04:12 UTC.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Cada uno de los sistemas arriba mencionados, obtiene datos de forma independiente, de acuerdo con su capacidad de detección. En particular, la actividad eléctrica se registra de modo secuencial. La posición media de los eventos se da siempre en coordenadas longitud y latitud (λ, θ). Los límites globales de detección del LIS son: 35° N, 35° S, 0° E y 360° E (Figura 1.2). La resolución máxima del sistema LIS corresponde a una sección de aproximadamente 100×100 m. Las tres zonas de estudio situadas sobre los mares regionales de México, se encuentran por completo dentro de los límites del sistema LIS (Christian *et al.*, 2000).

Los relámpagos son observados por la señal luminosa que proviene del interior de las nubes de tormenta. La radiación electromagnética liberada comprende desde ondas de baja frecuencia hasta rayos X. Con base en su diseño tecnológico, LIS es capaz de reportar los cambios en la intensidad de la radiación en tiempo real, aún cuando los destellos se presenten en periodos diurnos con alto albedo. Por su principio de funcionamiento, este sistema de exploración no puede discriminar en ningún caso si las descargas son nube-tierra o nube-nube.

Tres son las variables registradas por el sistema LIS de manera continua:

- 1.- Número de relámpagos N_r
- 2.- Intervalo de duración $\Delta\tau$
- 3.- Radiancia R_r

El muestreo de la actividad eléctrica representado a través de estas variables, se efectúa una vez cada veinticuatro horas en todas las zonas del cinturón tropical. Esto debido a que el periodo de la órbita del satélite TRMM es de un día aproximadamente (Figura 1.3).

Las regiones marítimas de México son extensas y complejas en cuanto a su morfología (Figura 1.4). Existen también marcadas diferencias en el clima de cada golfo. Esto puede apreciarse desplegando el comportamiento de la temperatura del aire observada en el nivel de superficie. Usando como variable la amplitud promedio de la temperatura $T_a (= T_{\max} - T_{\min})$ sobre las proximidades de los golfos, se pueden ver diferencias relativas de hasta 5° C en las series mensuales (Figura 1.5). Entre los máximos y mínimos hay diferencias en la temporalidad: están desfasados por dos o tres meses a lo largo del ciclo anual. No obstante a lo citado, en los golfos de México y sus zonas aledañas se comparten semejanzas durante la mayor parte del verano: la precipitación es producida principalmente por tormentas.

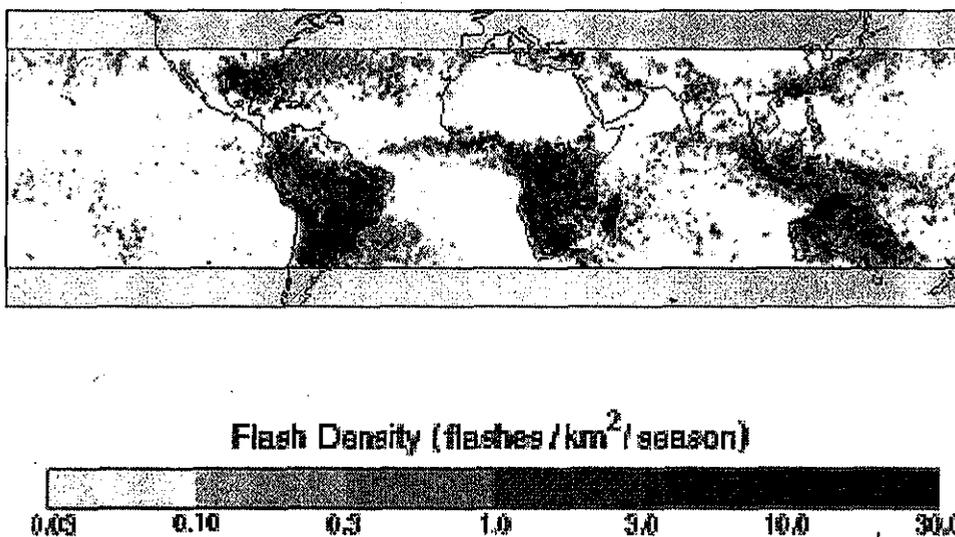


Figura 1.2 Límites globales en la detección de relámpagos por el sistema LIS/TRMM. Se muestra como ejemplo la densidad de destellos durante el trimestre diciembre a febrero de 1998.

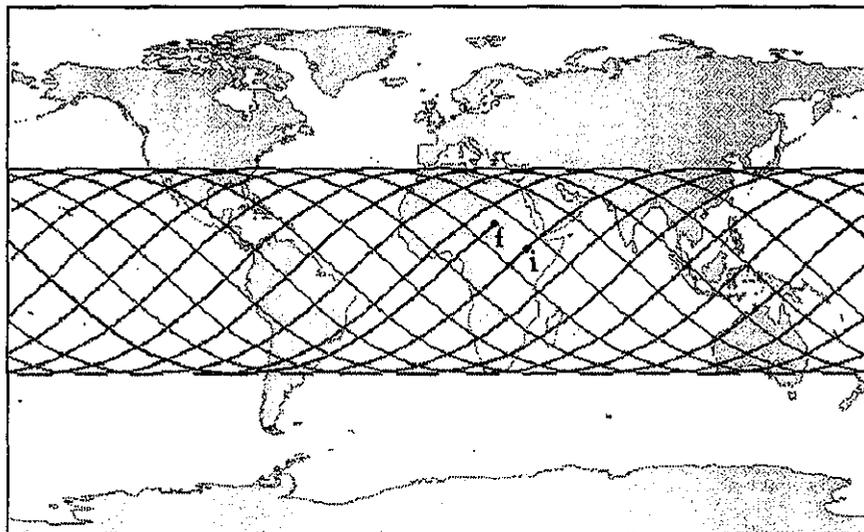


Figura 1.3 Tipo de trayectoria de la misión TRMM. El recorrido en 24 horas se indica con el trazo i → f.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

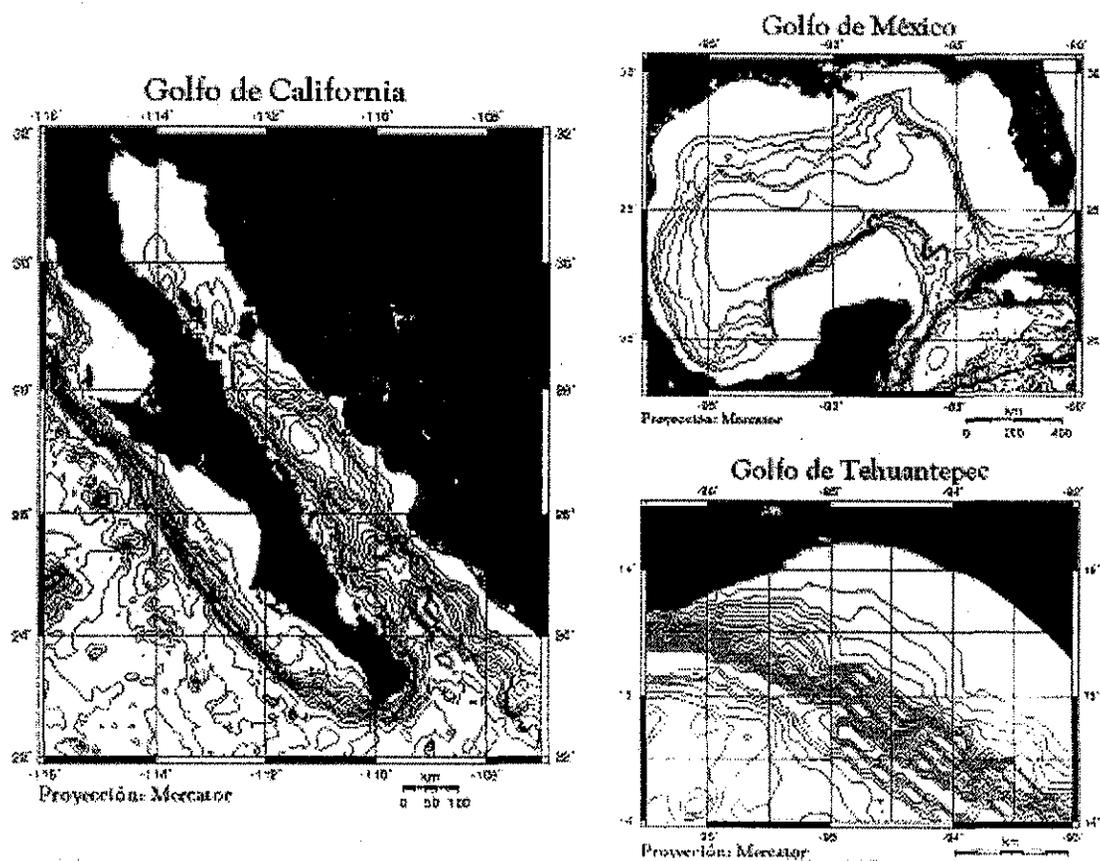


Figura 1.4 Las regiones marítimas de México y sus características morfológicas. Cartografía y datos batimétricos del Centro Nacional de Datos Geofísicos (NGDC).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

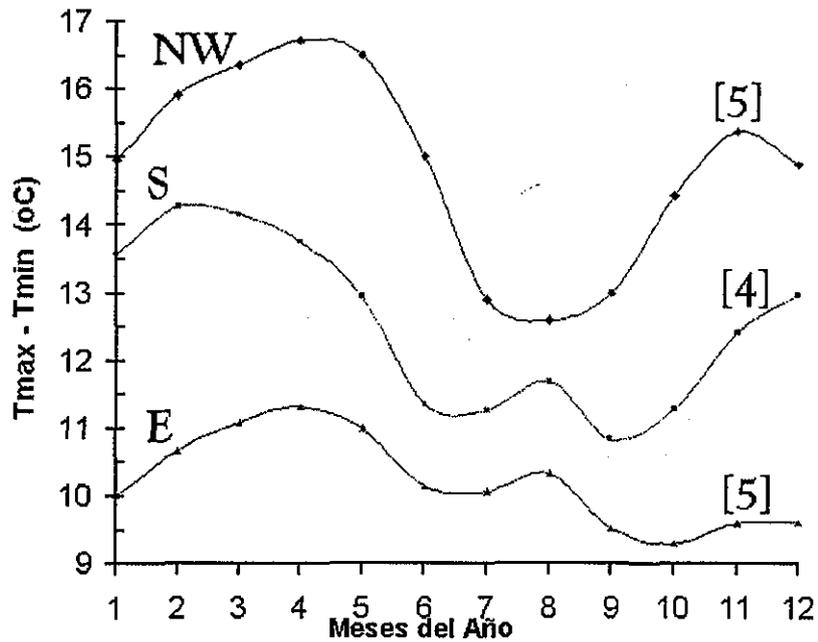


Figura 1.5 Ciclo anual (enero = 1, diciembre = 12) de la amplitud de la temperatura del aire en superficie: $T_a = T_{\max} - T_{\min}$ en sitios colindantes al Golfo de California (NW), Golfo de Tehuantepec (S) y Golfo de México (E). Entre paréntesis el número de localidades cuyos datos fueron promediados. Fuente: Base de datos climatológica *East Anglia* (New et al., 1999).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Está probado que la temperatura superficial del océano (SST) es una variable básica para el entendimiento del clima marítimo (Houghton y Tourre, 1992; Walters y Hastenrath, 1989). También son fundamentales la evaporación y el flujo de calor entre el océano y la atmósfera: participan en el desarrollo de tormentas de mesoescala (Esbensen y MacPhaden, 1996). En principio, es posible descubrir una correlación positiva entre la SST y el número de relámpagos desarrollados por las condiciones del tiempo severo. Esto porque las temperaturas elevadas en superficie se sumarían como condición inicial favorable a la convección. Sobre los mares que rodean a la República Mexicana la convección es desarrollada más bien por las frecuentes perturbaciones tropicales, que por condiciones de buen tiempo.

En el caso del Golfo de México, la oscilación media anual de la SST (Figura 1.6) alcanza el valor mínimo durante febrero y el máximo en agosto. La variabilidad mensual de la temperatura superficial del océano indica frecuentemente cambios significativos. En particular, entre 1991 y 2000, se estima que los cambios resultaron hasta del orden de un grado entre uno y otro año (Figura 1.7).

El propósito de este trabajo es describir las características básicas de la actividad eléctrica sobre los golfos de México. Además de mostrar la utilidad de los datos de LIS en meteorología, ya sea considerándolos de forma independiente o complementaria a la información extraída de imágenes infrarrojas de satélite y de datos de precipitación en superficie.

Dado que no existen publicadas investigaciones sobre este problema específico, se desarrolla un estudio de caracterización por zonas: montañosas, costeras, peninsulares y oceánicas. El foco de atención consiste en explicar físicamente los detalles encontrados, apoyándose en procesos atmosféricos bien entendidos. En lo que respecta a los mares, se buscan evidencias que vinculen a la SST con las variaciones del número de relámpagos en los años analizados. Como es común en trabajos similares, la caracterización de la actividad eléctrica no se contempla como meta absoluta: se considera suficiente para promover desarrollos posteriores.

La importancia e impacto de la tesis radica en que los resultados obtenidos dejan ver propiedades físicas de las nubes de tormenta, tales como intensidad de convección y contenido de partículas de hielo (IWC) sobre grandes regiones: es comúnmente aceptado en el campo de la electricidad atmosférica, que las partículas frías de las nubes son esenciales en la producción de relámpagos.

**Climatología de la SST
Golfo de México
1955-1999**

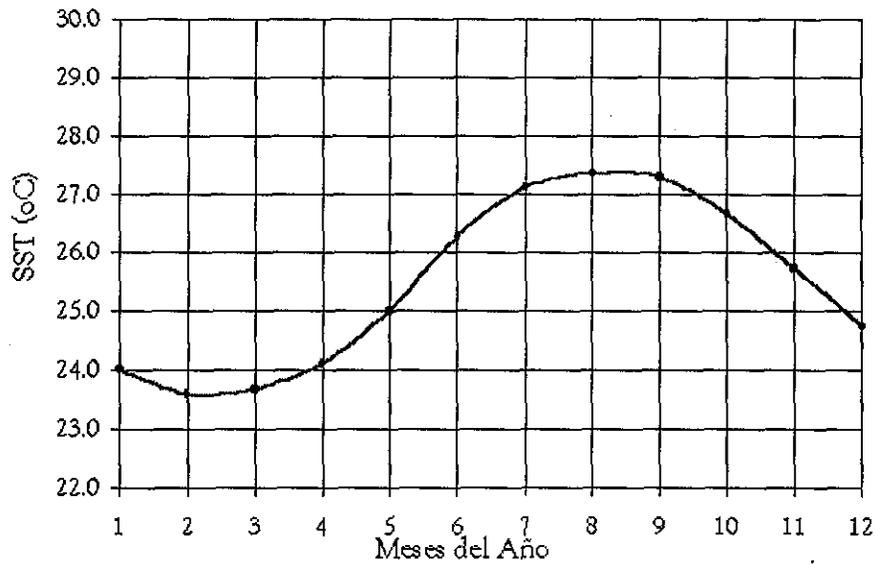


Figura 1.6 Ciclo anual de la SST sobre el Golfo de México. Calculado con datos del Proyecto de Predicción Estacional e Interanual de la Agencia Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NSIPP/NASA).

Golfo de México
Anomalía media mensual de SST
1991-2000

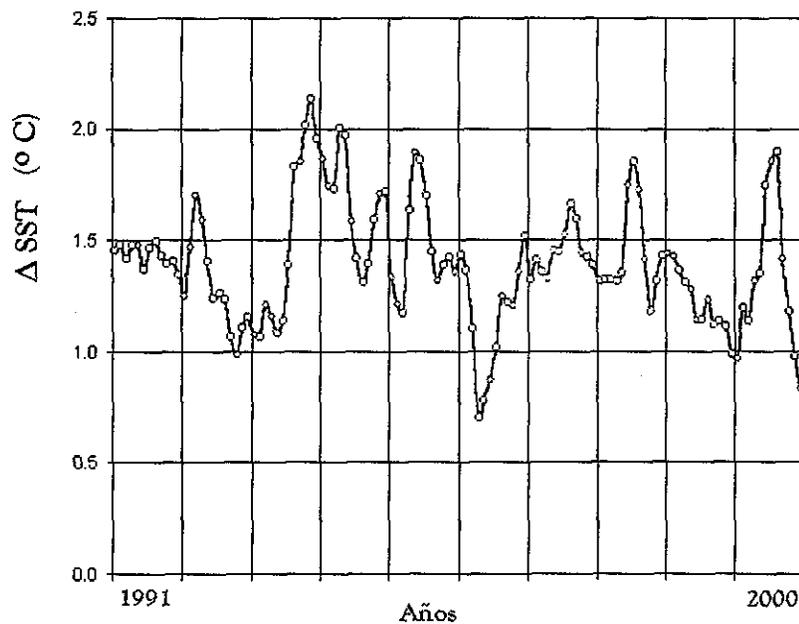


Figura 1.7 Anomalías medias mensuales de la SST sobre el Golfo de México en el periodo 1991-2000. Datos de NSIPP/NASA.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Finalmente, saber el comportamiento detallado de la actividad eléctrica en las escalas regional y local es importante, ya que provee indirectamente de una ubicación geográfica precisa de las corrientes descendentes por debajo de las nubes cumuliformes. Esto es relevante en el entendimiento de los fenómenos asociados con este tipo de flujo, como por ejemplo las ráfagas frontales (GF). El método de registro usado en la actualidad por la red de observatorios del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), no permite abordar este aspecto, pues no se establece la localización del destello. Además, se sigue aún la norma consistente en reportar relámpagos en una resolución de tiempo de un día, intervalo mucho mayor a la duración de las ráfagas frontales, que está entre minutos y horas.

II. Metodología

Se exploran los datos de relámpagos reportados por el sistema LIS entre el 1 de abril y el 31 de octubre. Esto por considerar que durante este periodo de siete meses se presentan las lluvias más intensas sobre los golfos de México. Por conveniencia, la exploración de la actividad eléctrica en los meses restantes del ciclo anual se remite a un posterior análisis. En cuanto a la cobertura en años, se toma el trienio 1998 a 2000. Esto en función de la información disponible del Centro Aeroespacial Marshall (MSFC) y la NASA.

El procesamiento de datos en cuanto a sus características espaciales consistió en la interpolación de N_r sobre una malla regular M de puntos longitud - latitud (λ'_j, θ'_j) . Esto es inmediato, pues cada dato viene referido a la longitud λ y latitud θ del sitio donde procede el destello. El algoritmo numérico de interpolación adoptado es el *Método de Kriging* (Oliver y Webster, 1990).

Para mayor claridad, se presenta a continuación como ejemplo concreto el análisis de la actividad eléctrica sobre el Golfo de México durante mayo de 2000.

Considérese los datos como términos de una serie de tiempo $\{S_i\}$. Esta serie corresponde a un subconjunto $W = \{(t_j, t_h, N_r)\}$, definido bajo los enunciados lógicos siguientes: $98.5^\circ \text{ W} \leq \lambda_i \leq 80.0^\circ \text{ W}$, $18.0^\circ \text{ N} \leq \theta_i \leq 31.0^\circ \text{ N}$, $t_a = 2000$, $t_m = 5$, $122 \leq t_j \leq 153$, $[00:00:00] \leq t_h \leq [24:00:00]$, $\Delta\tau > 0$, $N_r > 0$, $R_r > 0$.

En cuanto a la interpretación física de las observaciones, se considera en este y los demás casos, que $\Delta\tau$ y la frecuencia de relámpagos, son variables directamente relacionadas con la componente vertical de velocidad (ms^{-1}), dentro de las nubes de tormenta.

Adicionalmente, se parte del supuesto de que los resultados de los análisis de actividad de relámpagos pueden tomarse como parámetros. Estos parámetros podrán mostrar los límites de la tasa de cambio de la precipitación (mms^{-1}), razón de cambio en que se libera el calor ($\text{J kg}^{-1}\text{s}^{-1}$) latente (Browning, 1986), estructura térmica ($^\circ\text{C km}^{-1}$) vertical (Jorgensen

y LeMone, 1989) y distribución horizontal de la masa (kgm^{-2}) de la tormenta (Houze, 1993).

Adoptando como formas de subdivisión las secciones (Edwards y Weiss, 1996), es posible delimitar áreas sobre el mar que exhiben características análogas durante tormentas. Si convenimos en llamar “zona” al conjunto de estas áreas, entonces sobre todo el Golfo de México aparecerán cinco zonas: I a V (Figura 2.1). Vemos que como efecto de la interpolación, las zonas I y II presentan los gradientes más intensos. Los límites para estas dos zonas pueden fijarse en 96° W y 91° W y sobre los 24° N y 30° N. La intensidad de los movimientos verticales está relacionada con los relámpagos porque las corrientes ascendentes y descendentes transportan cargas eléctricas dentro de las nubes de tormenta (MacGorman y Rust, 1998).

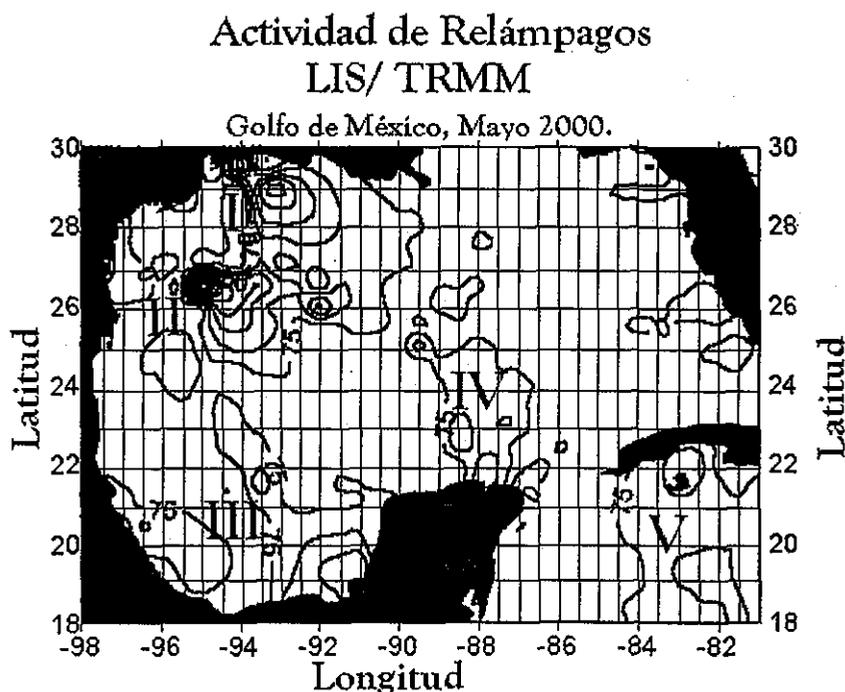


Figura 2.1 Isolíneas del número de relámpagos sobre la región del Golfo de México durante mayo de 2000. La numeración sugiere que en este caso, al menos cinco zonas quedaron delimitadas.

Se ha observado que en la atmósfera de esta región del Atlántico, se presentan más perturbaciones por debajo de los 21° N que por arriba de esta latitud (Clarke, 1997). Esto parece ser consistente con la forma de las isolíneas, pues la actividad eléctrica sobre las zonas III y IV se encuentra dispersa (Mackerras y Darveniza, 1994). Se ve que las tormentas durante este periodo mensual, se situaron sobre el mar y frente a las costas. Los límites para las zonas II y IV pudieran fijarse en 98° W y 90° W y 18° N y 21° N. También se les encuentra en el extremo oriental de la península de Yucatán (zona IV). En este sitio se hallan favorecidas por la convergencia de humedad inducida por las brisas (Krishnamurti *et al.*, 1995).

III. Resultados y Discusión

Golfo de México

Sobre la región del Golfo de México el número de relámpagos en el trienio 1998-2000, presentó uno o dos máximos relativos. Los promedios mensuales de los años 1998 (Figura 3.1) y 2000 (Figura 3.3) indican que se mantuvo una oscilación unimodal de N_f con un máximo en agosto. En cambio, en 1999 (Figura 3.2) se encontró un segundo máximo en mayo (mes = 5). Dado que sólo se cuenta con tres años de datos, estos resultados no alcanzan un significado climatológico. No obstante, se reportan ahora como una primera estimación de referencia, ante la falta de datos en el pasado. Como es común en climatología, el estado medio se podrá calcular sólo después de que se integren más observaciones sobre la región.

Continuando con lo observado durante el trienio 1998-200, se ve de las figuras 3.1 a 3.3, que la actividad de relámpagos en junio fue superior a lo encontrado en abril. Esto sucedió inclusive en 1999, el cual presentó variaciones en N_f , con respecto a 1998 y 2000. En 1999 se observó una distribución bimodal, cuyos máximos se localizaron en mayo y agosto: cerca de 3.5×10^5 destellos, valor que se mantiene como un máximo relativo de actividad mensual.

En la presente resolución temporal de un mes, es difícil discriminar la causa del efecto de la actividad eléctrica durante el quinto mes del año (mayo). Sin embargo, en cuanto a condiciones del océano, se ven diferencias en el comportamiento de la SST (Figura 3.4), como por ejemplo el medio grado menos en el máximo de agosto de 1999, así como la disminución de la rapidez de calentamiento del océano durante mayo. En cuanto a la distribución espacial de la actividad eléctrica, se encontró una región de máximos localizada en el norte del Golfo de México (arriba de 24° N). Se han reportado casos con una alta correlación entre las anomalías positivas de SST sobre el Golfo de México y máximos en el número de tormentas (Thompson, 1992). Estos casos fueron observados durante el otoño e invierno (Thompson *et al.*, 1994). A este momento, no están publicadas correlaciones entre la SST y el número de tormentas durante el verano.

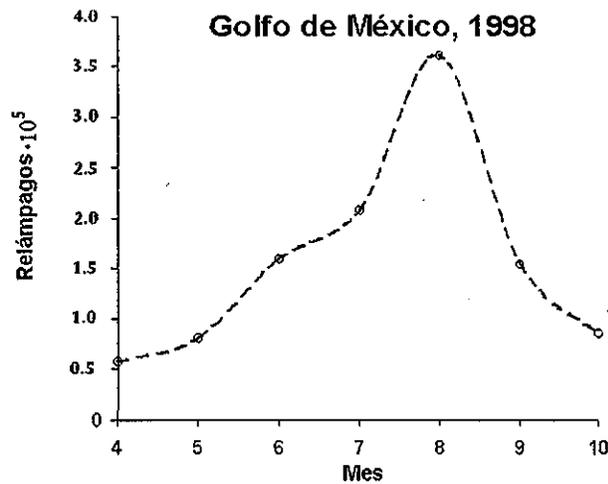


Figura 3.1 Distribución mensual de relámpagos durante 1998 en el Golfo de México. Datos del sistema LIS/TRMM.

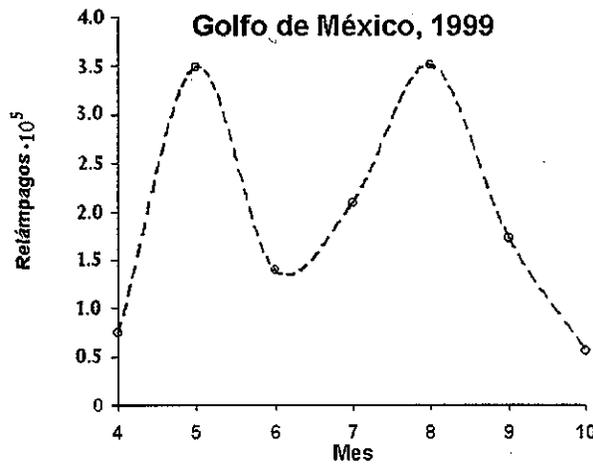


Figura 3.2 Distribución mensual de relámpagos durante 1999 en el Golfo de México. Datos del sistema LIS/TRMM.

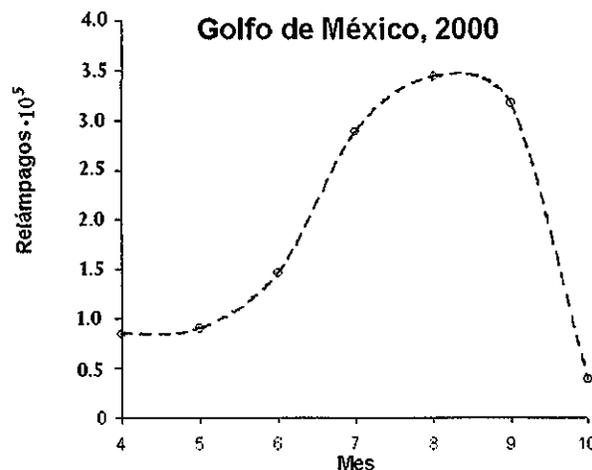


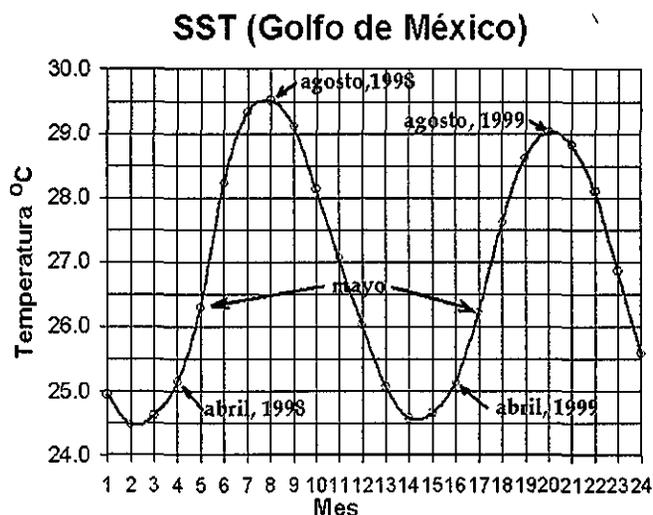
Figura 3.3 Distribución mensual de relámpagos durante el 2000 en el Golfo de México. Datos del sistema LIS/TRMM.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Con el objeto de realizar un análisis más detallado de la actividad eléctrica, se tomó una subdivisión del tiempo en pentadas. Esto significa que se contaron los relámpagos detectados por LIS dentro de la región del Golfo de México dentro de un periodo de cinco días. De acuerdo con lo fijado en el capítulo anterior, la caracterización está referida al intervalo [19,61].

En la primavera de 1998 (Figura 3.5), apareció la activación de los relámpagos a partir de la pentada veintitrés (en lo sucesivo P_{23}) y hasta la veintiséis (P_{26}). Durante un intervalo de cuatro pentadas (veinte días) se presentaron en las zonas aledañas, las primeras precipitaciones del año. Posteriormente, y de manera gradual, se fue incrementando la actividad de tormentas hasta alcanzar su máximo en P_{46} . Entre este periodo y P_{50} se estableció una condición de receso en la actividad de relámpagos. Aunque en esta última pentada la actividad fue máxima, la tendencia se manifestó como una decadencia en P_{61} . Es conveniente recordar, que sobre la República Mexicana se presentaron condiciones de sequía en 1998.

Durante 1999 (Figura 3.6) también aparecieron episodios relevantes en los relámpagos. Estos son de hecho congruentes con varios aspectos climatológicos bien conocidos de la precipitación, del centro y sureste de México. A partir de P_{23} se estableció un incremento significativo del número promedio de relámpagos, el cual se mantuvo más o menos constante hasta P_{27} .



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.4 Comportamiento de la SST sobre el Golfo de México de enero de 1998 a diciembre de 1999. Datos de NSIPP/ NASA.

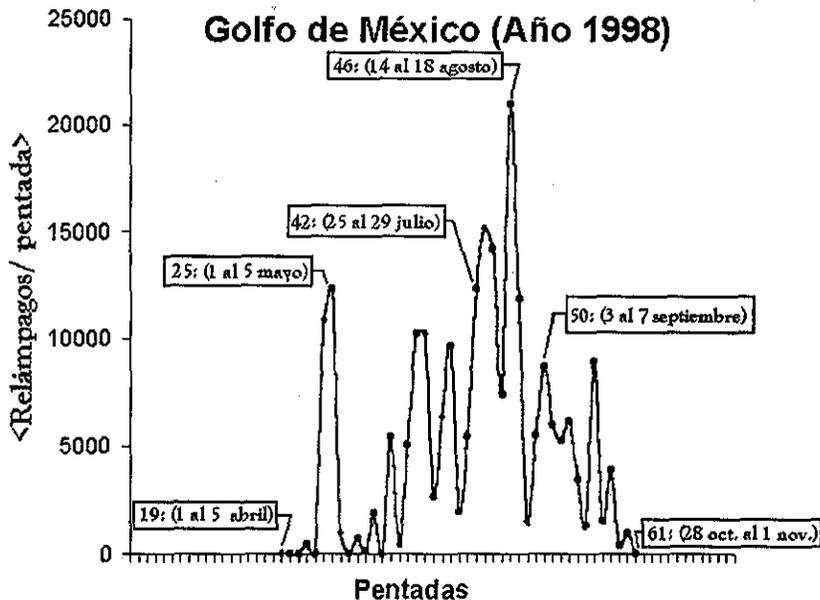
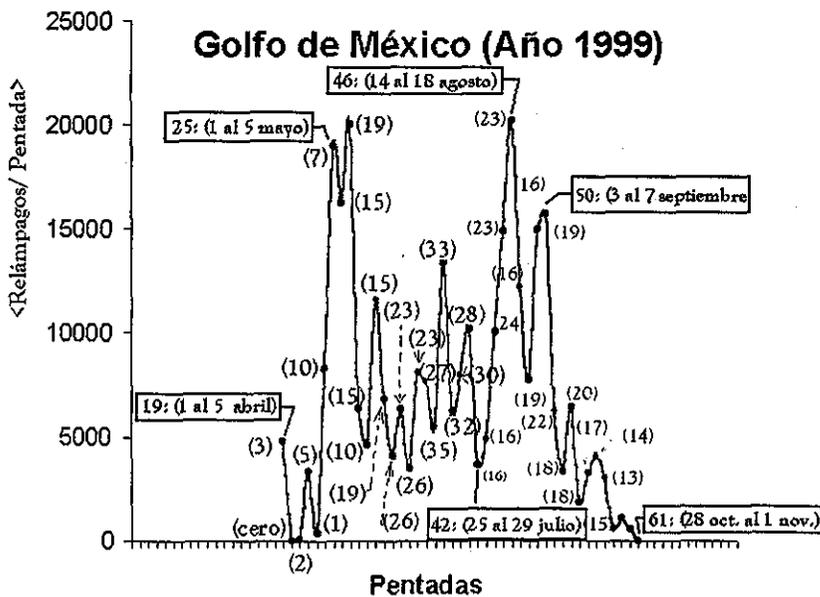


Figura 3.5 Promedio del número de destellos sobre la región del Golfo de México en 1998. Datos del sistema LIS/TRMM.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 3.6 Promedio del número de destellos sobre la región del Golfo de México en 1999. Entre paréntesis el número de tormentas por pentada. Datos del sistema LIS/TRMM.

Discriminando a partir de la localización y tiempo al que se presentan los relámpagos, ocurrieron un total de 52 tormentas eléctricas durante este periodo, correspondiente al 7% del total analizado, con un promedio de aproximadamente dos tormentas al día. En el intervalo precedente [19,22], sólo se observaron 10 tormentas (1.3 % del total) con un ritmo de crecimiento de 0.5 tormentas al día. Así pues, durante las tres pentadas iniciales de mayo, se verificaron niveles de actividad sólo comparables a los registrados por el sistema LIS/TRMM tres meses (diecinueve pentadas) después. Estos resultados surgieron como resultado de la combinación de imágenes infrarrojas del Satélite Ambiental Geoestacionario Operacional (GOES), con los datos de LIS. El espaciamiento temporal entre las imágenes analizadas fue de 15 minutos. Esto resultó conveniente para reconocer a la masa nubosa de donde procedían los destellos.

El primer criterio para discriminar tormentas eléctricas, se basó en la extensión de la masa cumuliforme y la temperatura sobre la cima de la nube ($T_c < -10^\circ \text{C}$). En casos donde la situación no estaba marcada con claridad se siguió un segundo criterio: considerar como tormenta eléctrica, a aquel grupo de relámpagos detectado dentro de un radio no mayor de 40 km y separado en el tiempo por menos de 45 minutos. En cuanto a la precipitación al oeste del Golfo de México, se pueden estudiar a profundidad los periodos de sequía o escasa lluvia, localizada antes y después de P_{45} (Figuras 3.7 y 3.8). Entre P_{43} y P_{49} se presentaron 137 tormentas eléctricas (18.6 %) con una tasa de crecimiento de 3.9 eventos día⁻¹.

Si comparamos ahora el patrón de actividad eléctrica sobre el golfo, con el correspondiente a las descargas registradas sobre el territorio del Estado de Veracruz, México (Figura 3.9), veremos que durante mayo, se presentan tan sólo la décima parte de la actividad eléctrica por tormentas que se verificó en julio. Se estima que a partir de P_{50} se comienzan a mitigar las tormentas eléctricas, con cambios moderados hasta la P_{61} . El número de tormentas eléctricas fue de 181, con el 24.6 % del total ocurridas en el periodo, con un promedio de 3.3 tormentas eléctricas al día.

Durante los primeros días de octubre (P_{55} y P_{56}) del año 1999 se presentó un evento de lluvia máxima sobre la región norte del Estado de Veracruz (México). Las poblaciones de Poza Rica [$97^\circ 28' \text{W}$, $20^\circ 33' \text{N}$, 150 m], Papantla [$97^\circ 19' \text{W}$, $20^\circ 27' \text{N}$, 298 m], Gutiérrez Zamora [$97^\circ 05' \text{W}$, $20^\circ 27' \text{N}$, 50 m], Barra de Czones [$97^\circ 12' \text{W}$, $20^\circ 43' \text{N}$, 50 m] y Tecolutla

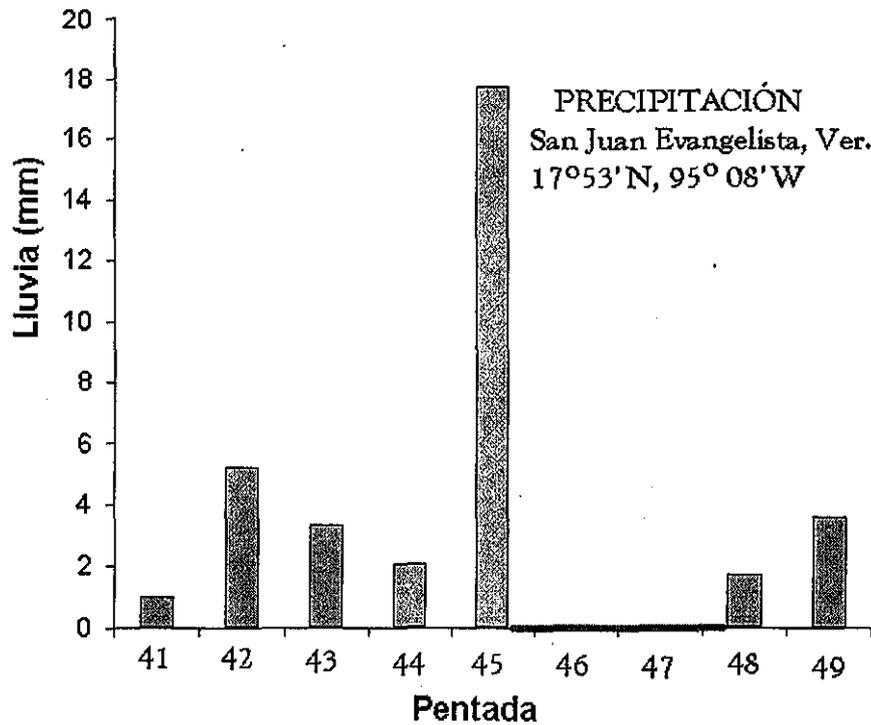


Figura 3.7 Precipitación media en San Juan Evangelista, Ver. en el intervalo de pentadas [41,49] de 1999. Datos de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y el SMN.

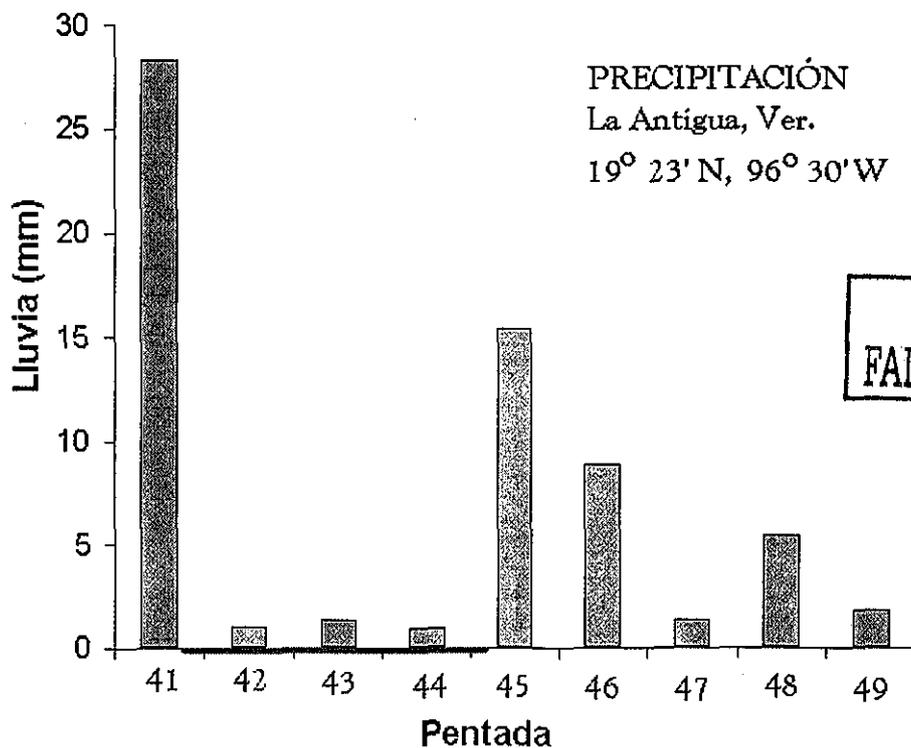
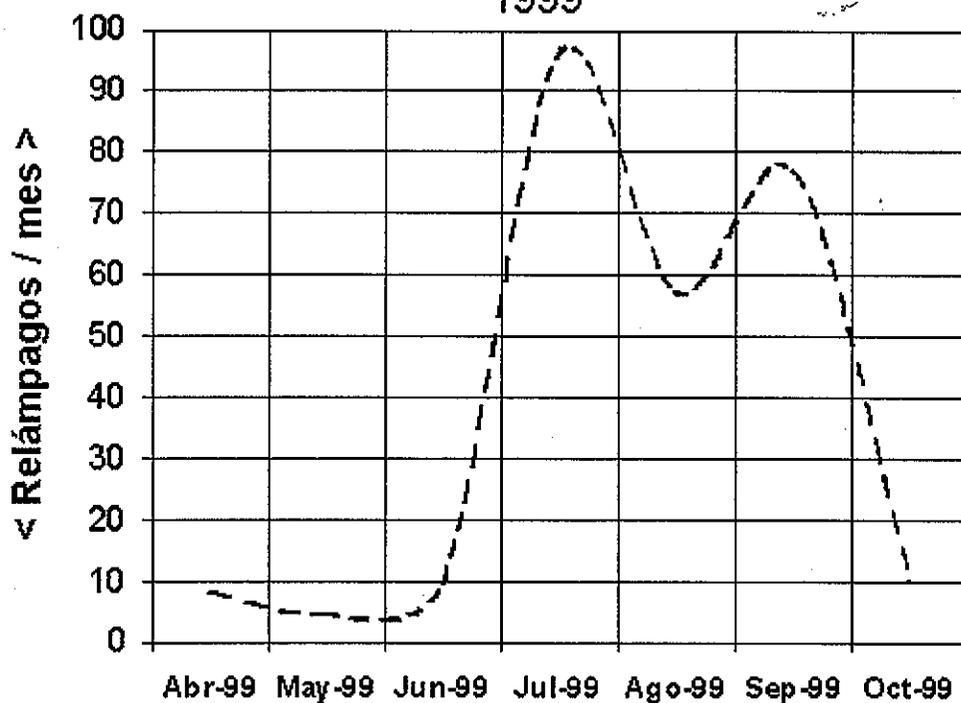


Figura 3.8 Precipitación media en La Antigua, Ver. en el intervalo de pentadas [41,49] de 1999. Datos de CNA/ SMN.

Actividad Eléctrica Media de las Tormentas
Estado de Veracruz
1999



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.9 Promedios de relámpagos entre abril y octubre de 1999, detectados por el sistema LIS/TRMM sobre el territorio del Estado de Veracruz (México).

[97° 02', 20°30' N, 3 m] fueron las más afectadas por inundaciones: en 48 horas (3 a 4 de octubre) se registraron 650 mm en Poza Rica.

En cuanto a la relación de este evento con la variable de actividad eléctrica, tenemos que durante las pentadas 55 y 56 se presentó un máximo relativo sobre la región del Golfo de México. De hecho, este pico está conformado por los valores de N_r sobre veinticinco días, que resulta más largo que cualquiera de los intervalos de variabilidad ocurridos en el verano.

Otro evento relevante ocurrió el 2 de junio de 1999 a las 16:15 UTC. Una imagen infrarroja de 8 km x 8 km de resolución (Figura 3.10), muestra un complejo de mesoescala sobre el extremo poniente de Cuba entre 88.5° W y 81.0° W, antes de arrojar precipitación sobre Quintana Roo (México). El compuesto resultante de la conversión de los tonos de gris de la imagen en un campo escalar de temperatura, más la incorporación de los emplazamientos de sus relámpagos, revelan un triple arreglo cumuliforme. La forma tipo "coma" del elemento localizado en el extremo derecho, sumado a su alta participación de descargas, sugiere que se trata de una masa nubosa en etapa de maduración. La exploración digital sugiere que los restantes elementos del arreglo están formados por nubes más "jóvenes", y por tanto de cimas menos frías. Los eventos de actividad eléctrica se presentan en el extremo sur y sureste de las nubes maduras, y en el centro de las torres de las nubes en estado inicial. Esto es debido a que en las celdas de tormenta, los flujos verticales ascendentes y descendentes se localizan viento abajo de la circulación en niveles medios.

El impulso de los flujos verticales aportan la energía cinética asociada con las colisiones entre gotitas de nube y partículas de hielo. Además, la fricción de las partículas de la nube con el aire húmedo, es un fenómeno que acelera la electrificación de las nubes de tormenta favoreciendo la generación de relámpagos.

El análisis de las tormentas aisladas sobre el Golfo de México, también aporta resultados significativos. Como ejemplo, se tiene la ocurrida en 87.5° W y 28.0° N el 8 de junio de 1999 a las 11:45 UTC. La estructura de la nubosidad se encuentra orientada de noreste a suroeste. Los emplazamientos de actividad eléctrica muestran también que el extremo de la nube viento abajo tiene preferencia por las descargas (figura 3.11). En la Figura 3.12, se aprecia un patrón típico de actividad

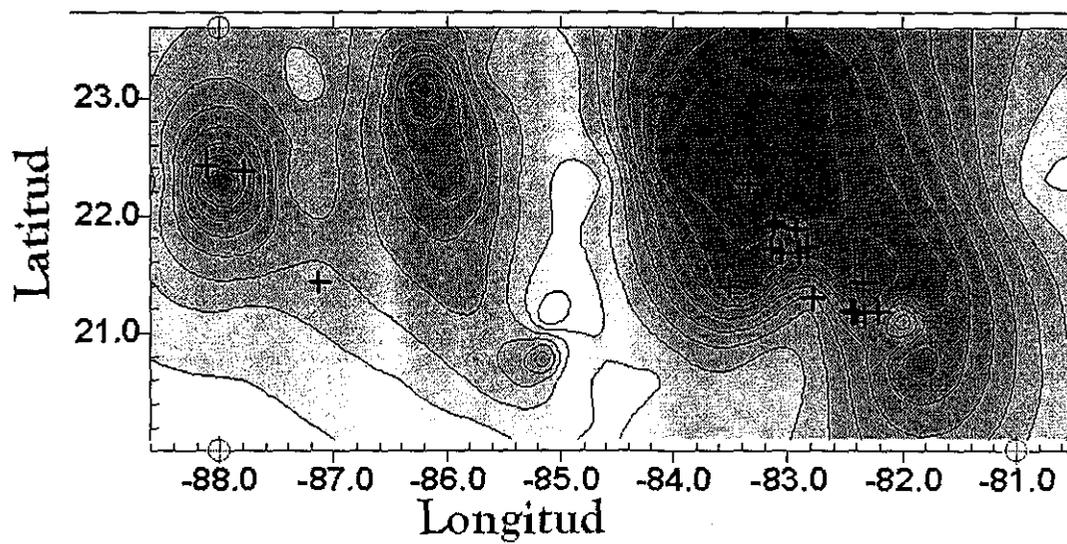
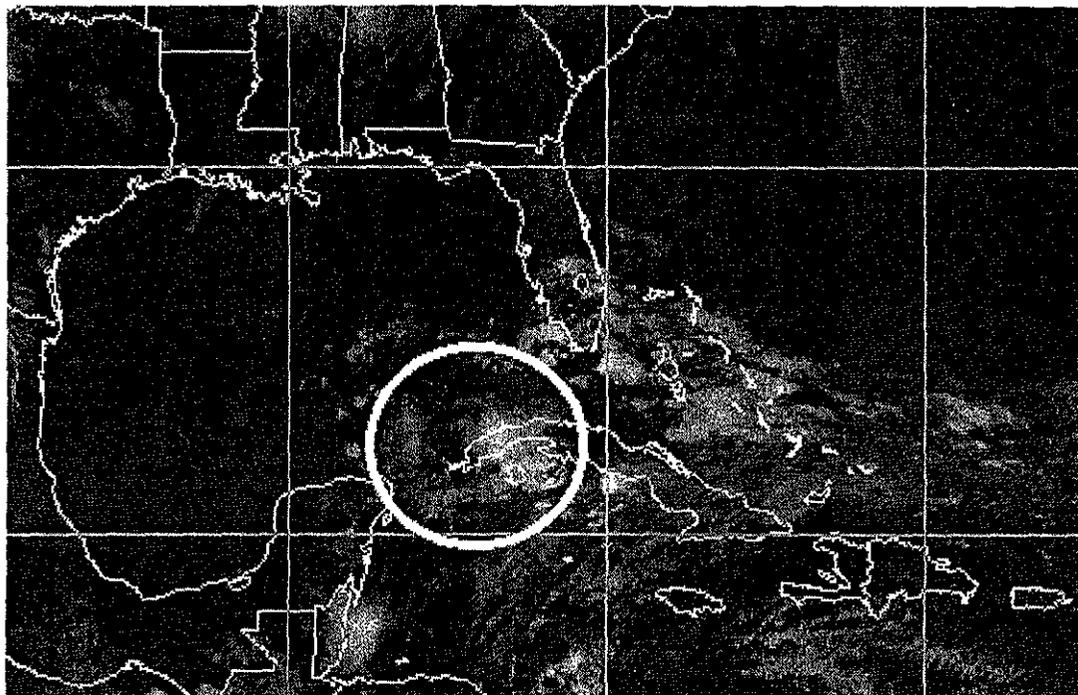


Figura 3.10 Imagen IR del satélite GOES-8 a las 16:15 UTC del 2 de junio de 1999. Las cruces (abajo) indican los sitios donde el sistema LIS/ TRMM percibió destellos de relámpagos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

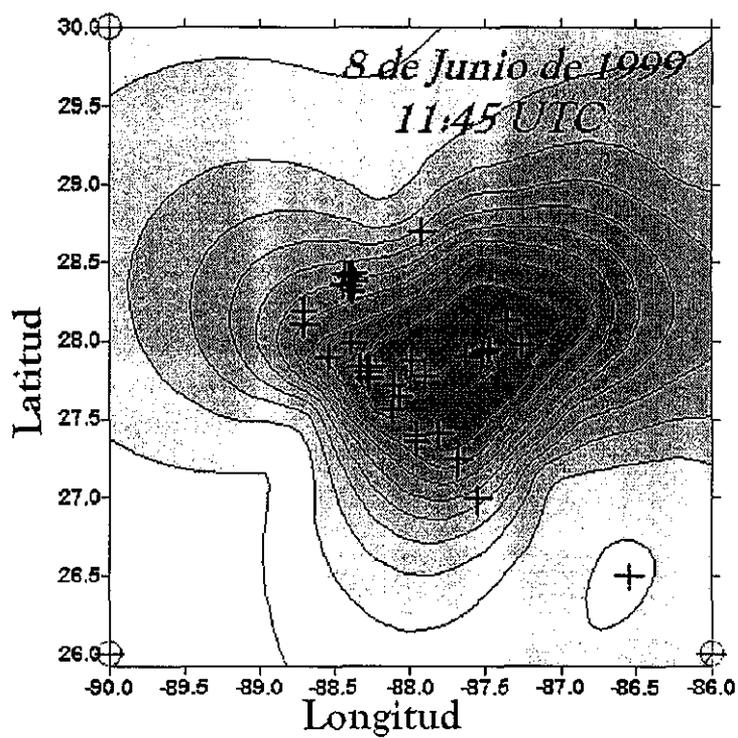
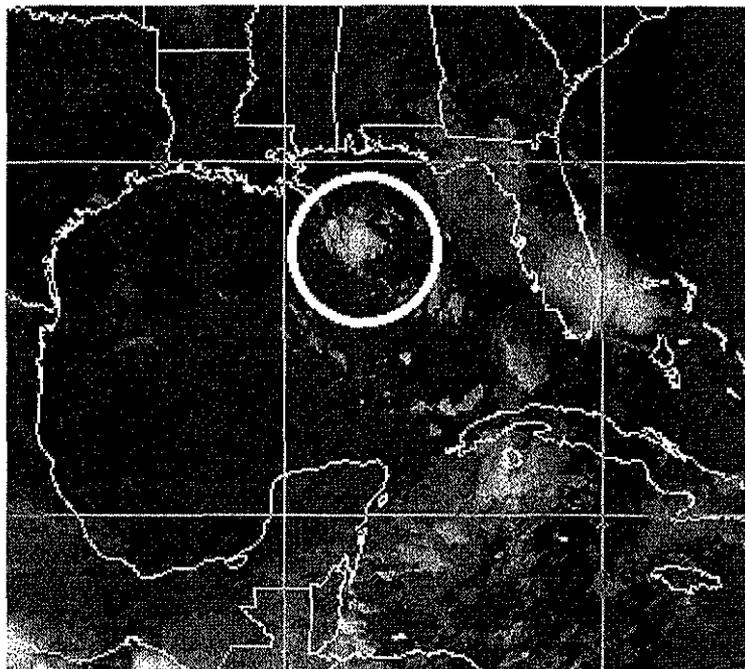


Figura 3.11 Imagen IR del satélite GOES-8 a las 11:45 UTC del 8 de junio de 1999. Las cruces (abajo) indican los sitios donde el sistema LIS/TRMM percibió destellos de relámpagos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

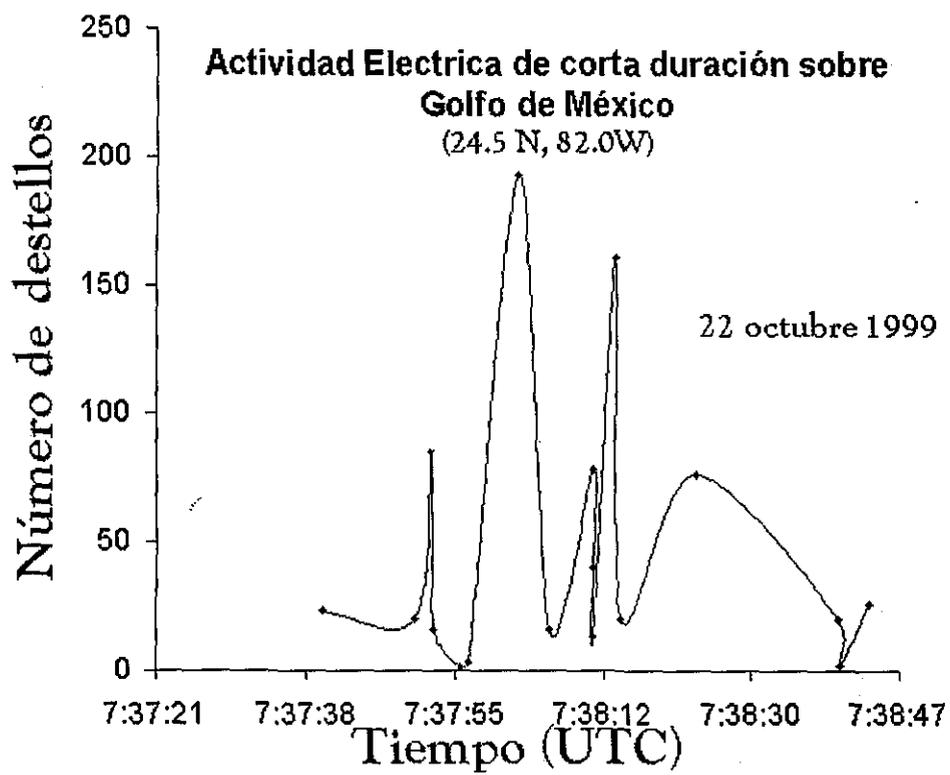


Figura 3.12 Actividad eléctrica de corta duración observada el 22 de octubre de 1999 sobre el Golfo de México. Datos del sistema LIS/TRMM.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

eléctrica de corta duración en el interior de una nube de tormenta. Hacia la etapa final de este proceso, se aprecia una descarga menos intensa y más prolongada que las anteriores.

En cuanto al tiempo en que se presentan las descargas eléctricas, se tiene por ejemplo, que las tormentas de las zonas I y II sucedieron entre las 18:00 UTC y la 01:00 UTC. En cambio, sobre las zonas III y IV se presentaron en un intervalo más estrecho: 00:00 UTC y 01:00 UTC.

Golfo de California

El número de relámpagos observado sobre la región del Golfo de California es del orden del encontrado sobre el Golfo de México. Considerando que esta última región, es aproximadamente doce veces más grande en extensión que el Golfo de California, resulta entonces que la actividad eléctrica es más intensa sobre el Golfo de California que sobre el Golfo de México.

Sólo 1998 presenta una disminución en la actividad de las tormentas en junio (Figura 3.13). Durante el año 1999, los relámpagos se iniciaron en junio y para octubre continuaban activos (Figura 3.14). Algo semejante ocurrió en 2000 (Figura 3.15). En los tres casos se manifestó sobre esta región una intensa actividad eléctrica, por lo que se puede considerar a la zona como muy prolífica en descargas. Esto implica la presencia de procesos convectivos más profundos.

En cuanto a su distribución espacial, se comprobó que los relámpagos se desarrollan principalmente sobre tierra firme, siendo un número reducido aquellas con emplazamientos sobre la superficie del mar (Figura 3.16). Estos últimos se presentaron en su mayoría hacia la mitad del verano, como los asociados con la tormenta del 16 de agosto a las 20:00 UTC (Figura 3.17).

Con información de LIS se ubicó el máximo relativo de las descargas alrededor de 110° W y 25° N aproximadamente. La combinación de la información derivada de la imagen infrarroja, con los datos del LIS, concuerdan con lo aportado por la teoría, pues sobre esta zona se

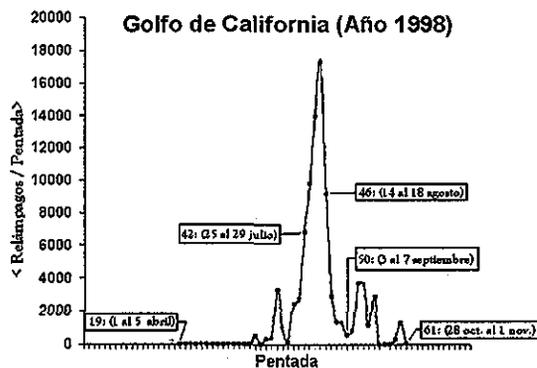


Figura 3.13 Promedio del número de destellos sobre la región del Golfo de California en 1998. Datos del sistema LIS/ TRMM.

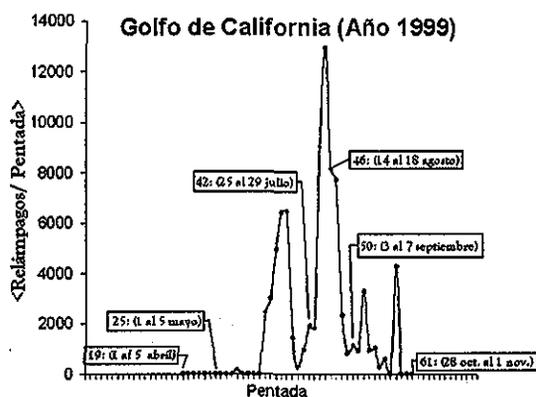


Figura 3.14 Promedio del número de destellos sobre la región del Golfo de México en 1999. Datos del sistema LIS/ TRMM.

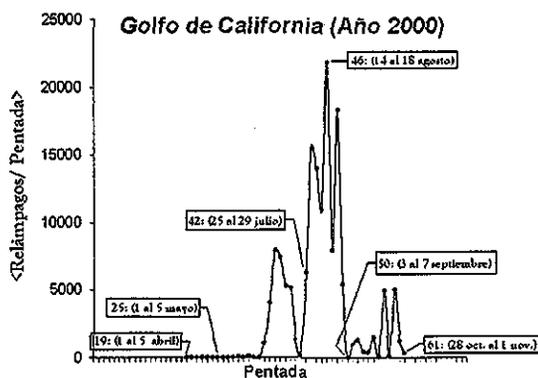


Figura 3.15 Promedio del número de destellos sobre la región del Golfo de California en el 2000. Datos del sistema LIS/ TRMM.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

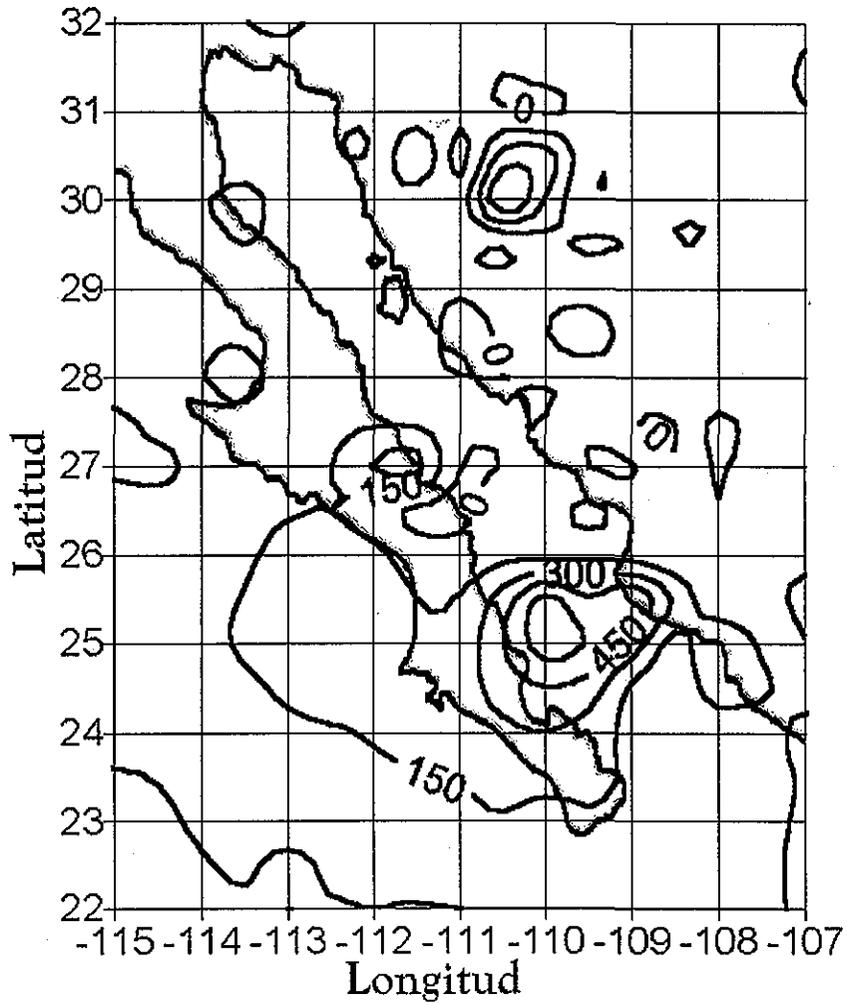


Figura 3.16 Isolíneas del número de destellos sobre la región del Golfo de California entre el 1 de abril y 30 de octubre de 1998. Datos del sistema LIS/ TRMM.

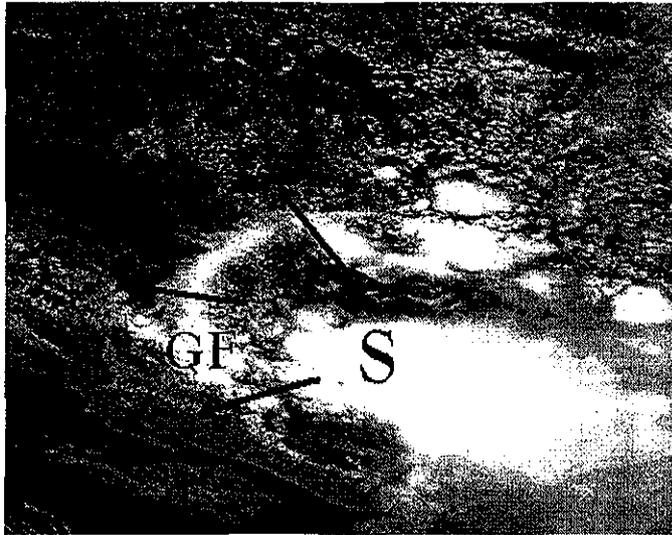


Figura 3.17 Imagen IR del satélite GOES-10. Se aprecia un frente (GF) asociado con una tormenta (S) sobre el Golfo de California el 16 de agosto de 1998 a las 20:00 UTC. Las flechas muestran la dirección de movimiento del sistema.

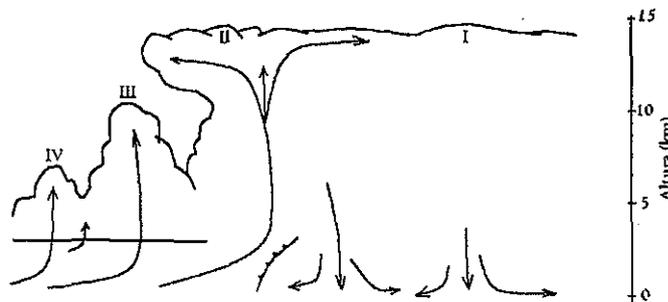


Figura 3.18 Corrientes ascendentes y descendentes dentro de una tormenta de cuatro celdas (I a IV), La escala (derecha) señala la profundidad de la convección de cúmulos. Fuente: Doswell, 1982.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

encuentra la cima del banco de nubes y la región del yunque. Entre las celdas I y II (Figura 3.18) se origina un frente frío de pequeña escala. La alta actividad de relámpagos es ocasionada por la electrificación inducida al interaccionar la corriente ascendente de la celda II con el flujo descendente de la celda I que entra en la etapa de disipación. Comparando en detalle el diagrama de la figura 3.18 con la figura 3.16 y la imagen de satélite de 3.17, se ve que las corrientes descendentes están por debajo del sitio marcado con "S" (110° W, 25° N). Este es precisamente el máximo relativo en la zona de la boca del Golfo de California.

Sólo durante uno de tres años de datos LIS/TRMM, se observó un máximo relativo de relámpagos en "S". No obstante, hay observaciones directas de circulación y de temperatura superficial del mar, que pudieran llevar a suponer que el máximo es recurrente: desde hace más de tres décadas, se ha venido confirmado la existencia de un remolino ciclónico de mesoescala (diámetro: 100 km, profundidad: 50-70 m, periodo de rotación: 9 días) en este sitio (Emilsson y Alatorre, 1997). La conexión entre tormentas y giros ciclónicos en la mesoescala, se debe entender como un mecanismo dinámico común en mares semicerrados, como son los golfos de México, Mar Mediterráneo y Mar Rojo.

Todo remolino en balance ciclostrófico establece divergencia horizontal. Por continuidad, la divergencia induce a su vez convergencia vertical (bombeo). A partir de la tendencia hacia el equilibrio entre la superficie del océano y la capa límite atmosférica (Betts y Ridgway, 1989), el agua a más baja temperatura dentro del remolino, favorece la formación de una "frontera de aire frío" (Rotunno y Klemp, 1985). La frontera de aire frío (θ_e baja) cercana a la superficie regula la convección de cúmulos, pues su menor *buoyancia* retarda el desplazamiento de las corrientes ascendentes, y por lo tanto de su rotación. De este modo, la rotación en niveles bajos no sobrepasa a la rotación en niveles medios, permitiendo que se desarrolle hasta una mayor altura la "pared" de la *supercelda* (Cotton y Antes, 1989).

Las superceldas producen más descargas que las desarrolladas por las nubes de un chubasco ordinario (corrientes ascendentes y descendentes débiles), o chubasco de corta duración (corriente ascendente débil y corriente descendente intensa).

En cuanto a la relación de la actividad eléctrica con la orografía de la región, se aprecia lo que pudieran ser dos efectos: incidencia de tormentas sobre bahías y en las cercanías de las montañas. Nuevamente y al respecto, el resultado será significativo si se mantiene con datos de futuras observaciones de relámpagos.

En la Figura 3.16 aparecen isolíneas cerradas sobre las bahías de Mulegé (112° W, 27° N), Santa Bárbara (109.5° W, 26.5° N) y Sebastián Vizcaíno (114.5° W, 28° N), esta última abierta a las aguas del Pacífico.

En relación con las montañas, destacan la zona del volcán de San Ignacio (113° W, 27.5° N) y la Sierra La Giganta, al sur de Mulegé, BCS.

Golfo de Tehuantepec

Durante 1998 y sobre la región del Golfo de Tehuantepec (Figura 3.19), apareció un déficit en la actividad de tormentas al inicio del ciclo primario, es decir, entre P_{19} y P_{29} , con respecto a los años 1999 y 2000. Adicionalmente, se identifican dos periodos de receso en el verano, uno entre P_{35} y P_{39} y el otro entre P_{49} y P_{53} . Explorando los resultados durante 1999, se identifica una diferencia negativa durante julio: en P_{42} también se verifican condiciones mínimas de actividad de relámpagos (Figura 3.20). Finalmente, en 2000, se presentó un ciclo de amplia variabilidad en la actividad eléctrica (Figura 3.21). Resulta clara la semejanza entre lo ocurrido en este periodo entre los Golfos de México y Tehuantepec. Esto no implica necesariamente que las tormentas eléctricas sobre el Golfo de México pasen a la región del Golfo de Tehuantepec, no obstante que los vientos fuertes sobre el Golfo de Tehuantepec, llamados Tehuanos o "Tehuantepequeros", son una prolongación de los "nortes" que pasan sobre el Golfo de México.

Como parte final de la discusión de resultados, se hace hincapié en que los análisis de actividad eléctrica, pueden contribuir al mejor entendimiento de procesos físicos que se desarrollan dentro de las nubes. Por un lado, es conocido el hecho de que la intensidad y frecuencia de las descargas está vinculada con la microfísica, pues según sugieren algunas teorías, el almacenamiento de cargas eléctricas es una función de la proporción que guardan las fases sólida y líquida de las partículas.

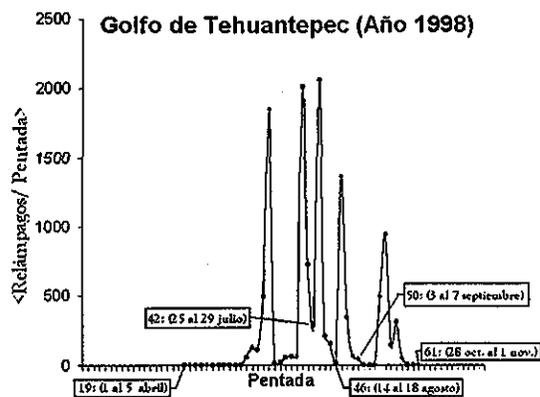


Figura 3.19 Promedio del número de destellos sobre la región del Golfo de Tehuantepec en 1998. Datos del sistema LIS/ TRMM.

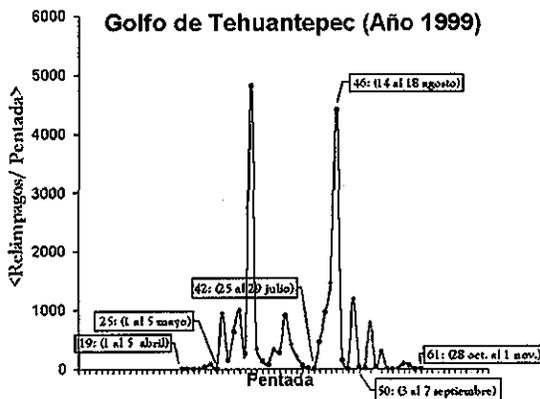


Figura 3.20 Promedio del número de destellos sobre la región del Golfo de Tehuantepec en 1999. Datos del sistema LIS/ TRMM.

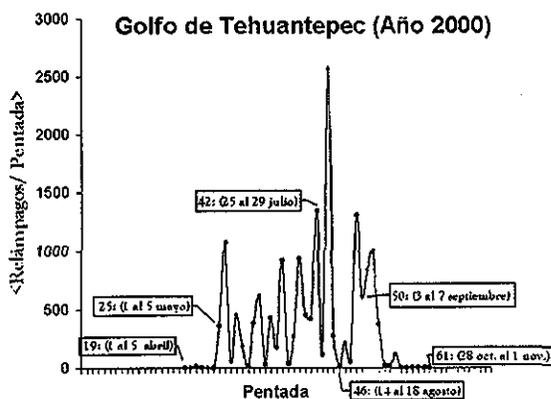


Figura 3.21 Promedio del número de destellos sobre la región del Golfo de Tehuantepec en el 2000. Datos del sistema LIS/ TRMM.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

También se ha establecido la hipótesis, de que los relámpagos se hallan acoplados con la tasa de generación de precipitación en las nubes cumuliformes. Se ha sugerido que la relación entre precipitación y relámpagos es más directa cuando predominan las partículas de hielo (Petersen y Rutledge, 1998).

De acuerdo con estas ideas, es clara la necesidad de contar con mediciones remotas de reflectividad (se puede considerar como una alternativa a las mediciones *in situ* de los espectros de partículas), si es que se quiere comparar objetivamente el contenido promedio de hielo (IWC), con la frecuencia e intensidad de las descargas.

La información más adecuada provendría entonces del sistema PR, como se ha demostrado recientemente (Petersen y Rutledge, 2001). Así para zonas sobre mar abierto en el Golfo de México y el Atlántico, se han encontrado nubes con contenido de hielo entre 0.18 y 0.20 gm^{-3} . Esto corresponde a una densidad media de relámpagos entre 1.5 y 2.0 destellos $\text{km}^{-2}\text{mes}^{-1}$. Sobre las albercas de agua caliente en el Pacífico oriental, ha sido detectado un IWC entre 0.12 y 0.14. El sistema LIS le asocia a estas zonas una densidad de relámpagos inferior a 0.5 destellos $\text{km}^{-1}\text{mes}^{-1}$. Finalmente, sobre la península de Florida el IWC es alto, del orden de 0.22 gm^{-3} , siendo la densidad de relámpagos 4.25 destellos $\text{km}^{-2}\text{mes}^{-1}$.

Sobre otro aspecto asociado con la nubosidad y la precipitación, corresponde a las contribuciones significativas de los análisis de relámpagos, pues las descargas determinan espacios y tiempos donde se presenta el fenómeno de la convección. Dado que la estructura de la información resulta 4 – dimensional, pueden - en principio- captarse con cierto nivel de detalle, algunas particularidades del proceso de liberación de calor latente. Como es bien conocido, el calor latente liberado hacia la atmósfera durante la convección, es una magnitud que no puede ser medida directamente.

Nesbit *et al.* (2000), utilizando tres meses de datos detectados por el sistema LIS sobre el cinturón tropical, hallaron que la frecuencia de relámpagos sobre los océanos es más baja que sobre continentes.

Los mapas de actividad de relámpagos indican que sobre la región del Golfo de México (figura 3.22) pueden distinguirse cinco zonas de actividad eléctrica, a través de la densidad de destellos.

Si se realiza ahora una comparación de este producto con el compuesto medio anual de radiación saliente de onda larga (OLR), resultan (Figura 3.23) claramente relacionadas las zonas 1 y 2, de escasa densidad de destellos con el sector $OLR > 270 \text{ Wm}^{-2}$, y la zona 5 de actividad máxima con los sectores $257.5 \text{ Wm}^{-2} < OLR < 260.0 \text{ Wm}^{-2}$.

Incorporando la precipitación media (figura 3.24), se observa también correspondencia con el patrón de actividad eléctrica, especialmente en zonas costeras y marítimas cercanas a las penínsulas de Yucatán y Florida.

Según se ha reportando en trabajos especializados, el Golfo de México no se considera una región importante en cuanto a procesos convectivos (Horel *et al.*, 1989; Monreal Gómez y Salas De Leon, 1997).

La aportación de los mares regionales de México en cuanto a la energía disponible para los procesos de convección atmosférica, es variada. Los estudios realizados sobre el Golfo de California indican que las corrientes superficiales dominantes son fundamentalmente de marea (Lavín *et al.*, 1997). Tradicionalmente, se suponía que la circulación en el Golfo de California era causada principalmente por procesos locales, pero recientemente ha surgido evidencia que indica que, en la escala anual, la acción del océano Pacífico a través de la boca del golfo es superior al forzamiento local.

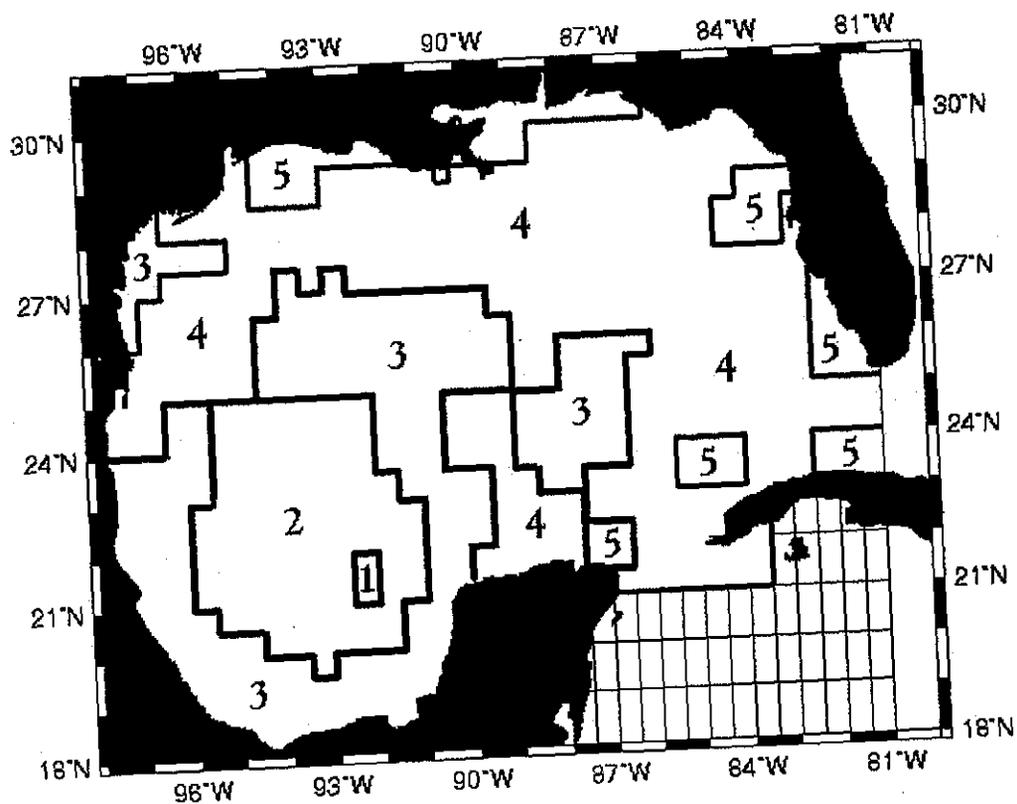


Figura 3.22 Se identifican cinco zonas de actividad eléctrica sobre el Golfo de México. Fuente: Petersen & Rutledge, 2001.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

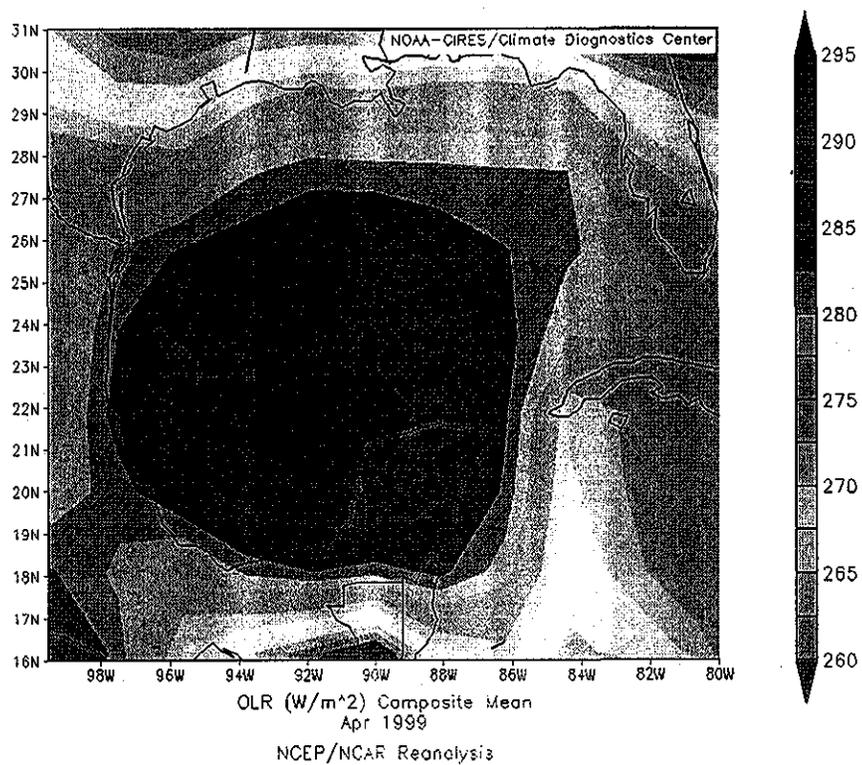


Figura 3.23 Radiación saliente de onda larga (OLR) sobre la región del Golfo de México. Centro de diagnósticos climáticos NOAA-CIRES.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

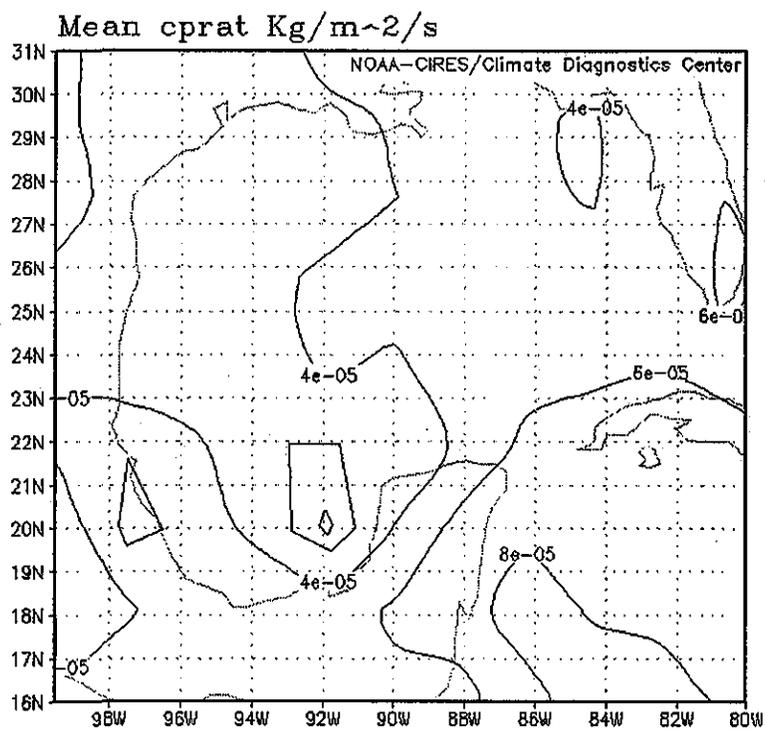


Figura 3.24 Tasa de precipitación promedio calculada por el modelo de reanálisis NOAA/ CIRES sobre el Golfo de México.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

IV. Conclusiones y problemas abiertos

Los datos del instrumento LIS/ TRMM, resultan útiles para caracterizar tormentas en regiones marítimas tropicales. En los eventos del 2 y 8 de junio de 1999, se encontró afinidad entre la intensidad y distribución espacial de los relámpagos de tormentas multicelulares, en acuerdo con los conceptos generalmente aceptados.

No obstante que la actividad eléctrica sobre el Golfo de México es ligera comparada con el Golfo de California, se presentan relámpagos desde la mitad de la estación de primavera y hasta el inicio del otoño. La similitud del Golfo de Tehuantepec con el Golfo de México en cuanto a descargas es alta: en ambas se presentan rasgos de un periodo de receso de la actividad a mitad del verano (canícula), claramente observada sólo en uno de tres años de datos.

Es importante concluir en este punto, que durante el verano las regiones citadas tienen una dinámica diferente, pues como ha sido observado a partir de varios sistemas meteorológicos, en la zona del Golfo de Tehuantepec la precipitación sigue un comportamiento directamente asociado con la proximidad de la ITCZ. Por otra parte, en la zona del Golfo de México, la precipitación se halla relacionada con la presencia de perturbaciones atmosféricas, como las ondas del este y los ciclones tropicales.

Aunque con incertidumbres por la forma de operación del TRMM, y la baja representatividad climática de la información de LIS, varios aspectos de la previsión del tiempo y variabilidad climática, puedan desarrollarse sobre sistemas de observación de nubes, distintos a los radares en superficie. Específicamente, las inundaciones repentinas y el granizo, son fenómenos de alta frecuencia cuya previsión en México evidentemente falla. Tomando los casos de tormenta con estas características, y relacionándolas con la frecuencia e intensidad de sus relámpagos, se puede llegar a inferir qué tipo de sistemas de mesoescala están asociados con estas condiciones adversas.

Con un sistema operativo de detección de relámpagos, la función de los radares en superficie aún sería necesaria. La información que recaban sobre las velocidades de las vientos dentro de las nubes de tormenta es

detallada y precisa. La localización de las descargas que efectúa el sistema LIS, sólo proporciona una visión aproximada del número de celdas de tormenta y de los rangos de velocidades.

La ausencia de una red de detección y monitoreo de relámpagos desde la superficie de la República Mexicana, impide que en este momento se discriminen los eventos intranube de los nube-tierra.

Problemas abiertos:

Golfo de México:

La relación entre actividad eléctrica, precipitación y SST es compleja. Aunque existan temperaturas elevadas sobre el mar y también condiciones óptimas de humedad, la precipitación está más relacionada con los movimientos verticales de la atmósfera. De este modo, resulta en un problema abierto incluir a los movimientos verticales dentro del análisis de las tormentas.

Golfo de California:

Prevalece como problema abierto, la combinación de la información de radares que operan sobre la zona del alto Golfo de California con los datos del sistema LIS/TRMM. Esto conducirá a resultados importantes para el entendimiento de la formación de tormentas severas. Los análisis de la circulación local, pueden dar lugar a un escenario dinámico lo suficientemente preciso.

Golfo de Tehuantepec:

Debido a la proximidad del Golfo de Tehuantepec con las reservas térmicas de mar abierto, resulta un problema por resolver, si las albercas de agua caliente del Pacífico, influyen en la modulación de la actividad eléctrica. Con respecto a actividades en el campo, para esto sería necesario analizar observaciones en un amplio periodo. En cuanto a modelación, el trabajo consistiría en reproducir las condiciones observadas a través de experimentos numéricos.

V. Referencias

Betts, A.K., y Ridgway, W. 1989 "Climatic equilibrium of the atmospheric convective boundary layer over a tropical ocean". *J. Atmos. Sci.*, 46, 2621-2641.

Browning, K.A., 1986 "Conceptual models of precipitations systems" *Wea. Forecast*, 1, 23-41.

Christian, H.J., 1999 "Optical detection of lightning from space", *Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity*, Guntersville, Alabama, June 7-11, pp. 715-718.

Christian, H.J., Blakeslee, R. J., Goodman, S.J., Mach, D.A., Stewart, M.F., Buechler, D.E., Koshak, W.J., Hall, J.M., Boeck, W.M., Driscoll, K.T. y Bocippio, D.J. 1999 "The lightning imaging sensor", *Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity*, Guntersville, Alabama, June 7-11, pp. 746-749.

Christian, H.J., Blakeslee, R. J., Goodman, S.J. y Mach, D.A., 2000 "Algorithm theoretical basis document (ATDB) for the lightning imaging sensor (LIS)", *MSFC/ NASA Technical Report*, 53 pp.

Clarke, J., 1997 "Atlantic pilot atlas: pilots charts and regional weather conditions for the North Atlantic, South Atlantic, Caribbean and Mediterranean". *International Marine*, 5, 3, 223-239.

Cotton, W.R. y Anthes, R. A. 1989 "Storm and Cloud Dynamics", *Academic Press. Inc.*, 593 pp.

Cummins K.L., Krider, E.P. y Malone, M.D. 1998 "The U.S. National Lightning Detection Network and applications of cloud-to-ground lightning data by electric power utilities", *IEEE Trans. On Electromag. Compat.*, 40, 4, 275 pp.

Doswell, C. A., 1982 "The operational meteorology of convective weather. Vol. I: Operational Mesoanalysis & Vol. II: Storm Scale Analysis", NOAA Technical Memorandum NWS NSSFC-5 & ERL ESG-15, 169 pp.

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 Storms*, San Francisco CA, pp. 19-23.

Emilsson, I. y Alatorre, M.A. 1997 "Evidencias de un remolino ciclónico de mesoescala en la parte sur del Golfo de California", *Contribuciones a la oceanografía física en México. Monografía Número 3, Unión Geofísica Mexicana*, pp. 173-182.

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

Gary, C. 1991 "Lightning and storm phenomena", Document Gimelec, Paris, 281 pp.

Horel, J.D., Hahmann, A.N. y Geisler, J.E. 1989 "An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas", *J. Climate*, 2, 1388-1403.

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.

Houze, R.A. Jr., 1993 "Cloud dynamics". *Internat. Geophys. Series, Vol. 53*, Academic Press, New York, 675-685.

Jorgensen, D.P. y LeMone, M.A., 1989 "Vertical velocity characteristics of oceanic convection", *J. Atmos. Sci.*, 46, 621-640.

Krishnamurti, T.N., Roy Bhowmik, S.K., Oosterhof, D., Rohaly, G. y Surgi, N., 1995 "Mesoscale signatures within the tropics generated by physical initialization", *Mon., Wea. Rev.*, 123, 2771-2790.

Lavín, M.F., Beier, E. y Badan, A. 1997 "Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: escalas estacional e interanual", *Contribuciones a la oceanografía física en México. Monografía Número 3, Unión Geofísica Mexicana*, 141-171.

MacGorman, D. R. y Rust, W.D., 1998 "The electrical nature of storms". Oxford University Press, 244 pp.

Mackerras, D. y Darveniza, D., 1994 "Latitudinal variation of lightning occurrence characteristics", *JGR*, 99, D5, 10813-10821.

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.

Nesbit, S.W., Zipser, E.J. y Cecil, D.J. 2000 "A census of precipitation features in the tropics using TRMM: radar, ice scattering, and lightning observations", *J. Climate*, 13, 4087-4106.

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.

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

Petersen, W. A. y Rutledge, S. A., 1998 "On the relationship between cloud-to-ground lightning and convective rainfall", *J. Geophys. Res.*, 103, 14025-14040.

Petersen, W. A. y Rutledge, S. A., 2001 "Regional variability in the tropical convection: observations from TRMM", *J. Climate*, 14, 2001, 3566-3586.

Ray, P.S., MacGorman, y Rust, W.D. 1987 "Lightning location relative to storm structure in a supercell storm an a multicell storm" *J. Geophys. Res.* 92, 5713-5724.

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

Simpson, J.E. 1994 "Sea breeze and local winds". Cambridge University Press, London, 381 pp.

Simpson, J., Kammerow, C., Tao, W.K. & Adler, R. 1995 "On the tropical rainfall measuring mission (TRMM)" *Meteor. Atmos. Phys.*, 60, 19 – 36.

Sturtevant, J. S., 1994 "The severe local storm forecasting primer", Weather Scratch Meteorological Service, 197 pp.

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.

Thompson, R.L., J.M. Lewis, y Maddox, R.A. 1994 "Autumnal return of tropical air to the Gulf of Mexico's coastal plain". *Wea. Forecasting*, 9, 348-360.

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

Anexo A

“Símbolos y Variables”

Variables, símbolos y operadores	Descripción	Unidades
i	Subíndice. Posición inicial.	-
j	Subíndice.	-
f	Posición final.	-
F_d	Densidad de destellos	$\text{km}^{-2} \text{mes}^{-1}$
M	Conjunto de puntos de malla en el Método de Kriging.	-
N_r	Número de destellos por unidad de área y por unidad de tiempo.	-
R_r	Radiancia.	$\text{J m}^2 \text{sr}^{-1}$
$\{S_i\}$	Serie tiempo.	-
t_a	Tiempo.	Año calendario
t_h	Tiempo.	Hora UTC [hh: mm : ss.s]
t_j	Tiempo.	Día Juliano
t_m	Tiempo.	Mes calendario
T_{\max}	Temperatura máxima.	$^{\circ}\text{C}$
T_{\min}	Temperatura mínima.	$^{\circ}\text{C}$
T_a	Amplitud de la temperatura del aire en superficie	$^{\circ}\text{C}$
T_c	Temperatura en la cima de las nubes	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta\tau$	Intervalo de duración de los destellos.	Segundos
λ	Coordenada de longitud.	Grados
θ	Coordenada de latitud.	Grados
$\langle \quad \rangle$	Promedio.	-
$[\quad , \quad]$	Intervalo de pentadas.	-
'	Sistema de referencia "primo".	-

Anexo B

“Abreviaturas”

Abreviatura	Significado
Alt	Altitud sobre el nivel medio del mar
BCS	Baja California Sur (México)
CNA	Comisión Nacional del Agua (México)
CERES	Energía Radiante de la Tierra y Nubes
DEF	Diciembre - Enero - Febrero
E	Este. Golfo de México
EUA	Estados Unidos de América
GF	Frente Frío de pequeña escala
GOM	Golfo de México
GOES	Satélite Ambiental Geoestacionario Operacional
I, II, III, IV	Zonas. Celdas de tormenta
IR	Espectro Infrarrojo
IWC	Contenido de hielo en las nubes
Lat	Latitud
LIS	Sensor de Relámpagos por Imágenes
Lon	Longitud
MSFC	Centro Aeroespacial <i>Marshall</i>
N	Norte
NW	Golfo de California
NASA	Agencia Nacional de Aeronáutica y del Espacio
NLDN	Red Nacional de Detección de Relámpagos
NOAA	Administración Nacional del Océano y la Atmósfera
NSIPP	Proyecto de Predicción Estacional e Interanual de la NASA
OLR	Radiación emergente de onda larga
PR	Radar de precipitación de la TRMM
S	Tormenta. Golfo de Tehuantepec
SMN	Servicio Meteorológico Nacional (México)
SST	Temperatura de la Superficie del Océano
Δ SST	Anomalía de la SST
TMI	Generador de Imágenes por Micro-ondas de la TRMM
TRMM	Misión de Monitoreo de la Lluvia Tropical
UTC	Tiempo Universal
Ver.	Veracruz (México)
VIRS	Escáner Visible e Infrarrojo
W	Oeste