



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA**

**"DESCARGAS ELÉCTRICAS DE NUBE A TIERRA EN MÉXICO Y ÁREAS  
OCEÁNICAS ADYACENTES: UN ESTUDIO PRELIMINAR USANDO DATOS  
DE LA RED MUNDIAL WWLL"**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS  
(FÍSICA DE LA ATMÓSFERA)**

**PRESENTA:**

**OLIVIA RODRIGUEZ LOPEZ**

**DIRECTORA DE LA TESIS:  
DRA. GRACIELA BINIMELIS DE RAGA**

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

**NOMBRE:** Olivia Rodriguez

**FECHA:** 28/02/07

**FIRMA:** [Signature]



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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 la Dra. Graciela Binimelis de Raga directora de este trabajo, por darle respuesta a todas aquellas dudas que surgieron durante el mismo, por brindarme apoyo en mi estancia en su grupo de trabajo así como apoyar mi forma de trabajo este último año.

Al Dr. René Lobato por brindarme su apoyo incondicional y sus comentarios que ayudaron siempre a mejorar mi aprendizaje y día a día me impulsan a seguir creciendo en todos los ámbitos de mi vida.

A los doctores Ricardo Prieto, Ernesto Caetano y Fernando García por la revisión de este trabajo, todos sus comentarios y sugerencias han sido muy valiosos, mejoraron mi trabajo y dejan en mí un gran aprendizaje.

A mis compañeros y amigos del Centro de Ciencias de la Atmósfera en especial a Michel, Julio, Adriana, Berenice, Julio Rojas, Rosa.

A Sergio Abarca que fue quien me invito a involucrarme en el tema y me dio las bases para iniciar mi trabajo.

Al grupo de Hidrometeorología del IMTA especialmente a Fernando Oropeza, Antonio Salinas, Martín Montero, José Luis Pérez, José Alfredo Mundo, Yolanda Santos, Rodrigo, Chch, Artemio, por su apoyo incondicional, comentarios y sugerencias a mi trabajo y en la vida diaria.

A Indalecio Mendoza por su colaboración y ayuda en la parte de programación.

A mis padres Manuel y Francisca por todo su amor, apoyo y sobre todo confianza en todo lo que emprendo.

A mis hermanos Adán y Rosalba por creer en mí y alentarme siempre a seguir adelante. Y a mis niños Alone, Monse y Manuel porque siempre que me ven me regalan una sonrisa.

## Dedicatoria

A José Luis Solis Aguirre por emprender una vida a mi lado, además de estar conmigo en todas esas noches de desvelo donde no quedaban las cosas, donde la desesperación me agobiaba y muchas veces quería tirar la toalla y darme por vencida y nunca permitirlo. Por sus comentarios que por simples que él los viera en ese momento eran cruciales para concluir algo. GRACIAS MI AMOR POR ESTAR A MI LADO Y SENTIRTE ORGULLOSO DE MI.

## Índice

Votos aprobatorios	i
Agradecimientos	ii
Dedicatoria	iii
Índice	iv
Resumen	vi
Lista de figuras	vii
Capítulo 1 Introducción	
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema	1
1.3 Importancia y aplicación de estudiar el tema	2
1.4 Antecedentes	3
1.5 Objetivo general	4
Capítulo 2 Descargas eléctricas y electrificación	
2.1 Conceptos Generales	5
2.2 Procesos de generación y separación de cargas en nubes convectivas	7
2.3 Distribución de cargas en nubes convectivas	8
2.4 Procesos que producen descargas eléctricas NT (-)	9
2.5 Descargas eléctricas positivas NT (+)	11
2.6 Evolución de las descargas con el tiempo	13
2.6.1 Fase de desarrollo y madurez de la convección	13
2.6.2 Fase de disipación	15
2.7 Descripción de la ionósfera y ondas electromagnéticas	16
Capítulo 3 Instrumentación y localización de descargas	
3.1 Red mundial de localización de descargas eléctricas	20

3.2 Componentes de la fuente de datos	21
3.2.1 Acceso a Internet	21
3.2.2 Sitio adecuado	21
3.2.3 Instrumentos de recepción y transmisión	22
3.2.4 Cobertura de la red WWLL	24
3.3 Método de localización de las descargas eléctricas	25
3.3.1 Teoría básica	25
3.4 Participación de México en la red	28
Capítulo 4 Resultados	
4.1 Resultados en la escala mensual	30
4.1.1 Región 1	30
4.1.2 Región 2	32
4.1.3 Región 3	33
4.1.4 Región 4	35
4.1.5 Región 5	35
4.2 Variación espacial para las cinco regiones	53
4.3 Variación diurna	60
Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones	
5.1 Conclusiones	63
5.2 Recomendaciones	66
Bibliografía	67

## Resumen

El trabajo que se detalla en esta tesis tuvo como objetivo realizar un estudio preliminar de descargas eléctricas a tierra sobre el territorio de la República Mexicana y sus mares adyacentes.

Se analizaron dos años de observaciones (2004 - 2005) obtenidas con la Red Mundial de Detección de Descargas Eléctricas (WWLL, por sus siglas en inglés) para determinar patrones espaciales de las descargas de nube a tierra asociadas a diferentes sistemas convectivos. El área de estudio se dividió en 5 regiones, las cuales se denominaron Caribe, Golfo, Pacífico Norte, Pacífico Sur y República Mexicana, respectivamente. En estas regiones los fenómenos meteorológicos observados son ligeramente diferentes. La región del Pacífico Norte se ve raramente afectada por la presencia de ciclones tropicales, sin embargo la precipitación en dicha región se asocia al llamado "Monzón de Norte América". La región del Pacífico Sur es fuertemente influenciada por la zona de convergencia intertropical (ZCIT, por sus siglas en inglés), mientras que las regiones del Caribe y Golfo se ven ampliamente influenciadas por los ciclones tropicales, que también afectan la región del Pacífico Sur. En la región de la República Mexicana se ve claramente una liga directa con los sistemas montañosos.

Los resultados obtenidos muestran una variabilidad mensual interesante en las 5 regiones de estudio, mostrando una distribución monomodal en el Pacífico Norte. Todas las otras regiones presentan una distribución de frecuencia ancha y, en ocasiones de forma bimodal (tales como la República Mexicana y la región Caribe). Estas distribuciones reflejan el diferente origen de la convección que es responsable de las descargas de nube a tierra en cada una de las regiones.

La densidad de las descargas de nube a tierra en las 5 regiones fue de 7.37 descargas por  $\text{km}^2$  por año para 2004, mientras que para 2005 fue de 8.58 descargas por  $\text{km}^2$  por año.

La variación diurna indica un máximo número de descargas de nube a tierra avanzada la tarde y noche (hora local). El sector continental presenta su máximo a las 18:00 horas mientras que todas las regiones oceánicas presentan una extensa distribución y máxima por la noche (entre las 21:00 horas y 24:00 horas). Lo cual concuerda con la presencia de fenómenos que traen consigo precipitación.



## Lista de figuras

Figura 2.1 Distintos tipos de descargas atmosféricas

Figura 2.2 Esquematación de separación de cargas.

a) Teoría de la precipitación

b) Teoría de la convección

Figura 2.3 Modelos de distribución de cargas en nubes convectivas

Figura 2.4 Esquematación de la evolución de una descarga:

a) Muestra la señal detectada en el golpe preliminar en la formación de la guía escalonada

b) Forma de onda asociada a la primera descarga de retorno. Los pequeños pulsos que la preceden fueron favorecidos por diversos pasos de la guía escalonada justo antes de la conexión entre ésta y la descarga de conexión. La primera descarga de retorno es precisamente la que emplean la mayoría de los sistemas comerciales de detección de rayos.

c) Señal de una descarga de retorno superior

Figura 2.5 Descargas positivas en una nube convectiva

Figura 2.6 Fases de desarrollo y madurez de los rayos

Figura 2.7 Fase de disipación de los rayos en nubes convectivas

Figura 2.8 Perfiles verticales de conductividad eléctrica (sima), temperatura (T) y densidad de electrones ( $ne \cdot m^{-3}$ ) en la atmósfera.

Figura 2.9 Circuito eléctrico global

Figura 3.1 Antena VLF

Figura 3.2 Preamplificador y fuente de alimentación

Figura 3.3 Ubicación de las antenas que conforman la red mundial WWLL en todos los continentes

Figura 3.4 Descarga típica en tiempo y espacio, (Uman, 1983)

Figura 3.5 Ubicación de la antena en ciudad universitaria, UNAM

Figura 3.6 Regiones de estudio: 1) Territorio continental de México, 2) Región caribe, 3) Región Golfo de México, 4) Región Pacífico Norte, 5) Región Pacífico Sur

Figura 4.1 Descargas eléctricas para las cinco regiones de estudio en 2004 y 2005:

- A) Enero,
- B) Febrero
- C) Marzo
- D) Abril
- E) Mayo
- F) Junio
- G) Julio
- H) Agosto
- I) Septiembre
- J) Octubre
- K) Noviembre
- L) Diciembre

Figura 4.2 Variación mensual de descargas eléctricas para la región 1, con un total para 2004 de 385,018 y para 2005 de 554,195.

Figura 4.3 Variación mensual de descargas eléctricas para la región 2, con un total de para 2004 de 76,668 y para 2005 de 150,857.

Figura 4.4 Variación mensual de descargas eléctricas para la región 3, con un total de descargas en 2004 de 128,685 y para 2005 de 144,589.

Figura 4.5 Variación mensual de descargas eléctricas para la región 4, con un total en 2004 de 5,062 y para 2005 de 7,287.

Figura 4.6 Variación mensual de descargas eléctricas para la región 5 con un total en 2004 de 152,314 y para 2005 de 63,378.

Figura 4.7 Densidad de la distribución de descargas eléctricas para 2004 y 2005

Figura 4.8 Variación diurna del número total de descargas en las cinco regiones de estudio (2004 y 2005)

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Generalidades

Desde la antigüedad el hombre mostró su interés, temor o admiración por el fenómeno de las “descargas eléctricas”, y así se encuentran muchos mitos relacionados con el tema. Zeus, padre de todos los dioses griegos, y Júpiter, dios de los romanos, eran quienes lanzaban rayos desde el cielo. Thor, dios nórdico, forjaba los rayos a golpe de martillo sobre su yunque mientras se desplazaba en su carro entre las nubes. En la mitología vasca, Ortiz, el dios del cielo, es también el dios de las tormentas y Aidegaxto es el genio que lanza los rayos. La denominación vasca más generalizada para el rayo es tximistarri. Los clásicos como Heráclito, Anaxágoras y Aristóteles, establecían la naturaleza ígnea del rayo, sustentándose principalmente en las interacciones que se producen entre los elementos fuego, tierra y agua.

No fue hasta el año 1752 en el que Benjamín Franklin estableció de una forma científica la naturaleza eléctrica del rayo. Franklin determinó experimentalmente que las cargas situadas en la parte inferior de las nubes eran de signo negativo. Llegado a este punto, el propio Benjamín Franklin diseñó el primer sistema de protección frente a los rayos, denominado pararrayos. Este sistema conducía a tierra los rayos que caían sobre las construcciones, que de esta manera se veían a salvo de los mismos.

### 1.2 Descripción del problema

La energía de las ondas electromagnéticas en la banda VLF (3-30 Khz.) generadas durante las descargas eléctricas pueden ser detectadas a miles de kilómetros del origen (Crombie, 1964), dado que sufren poca atenuación dentro de la guía de onda formada por la Tierra y la capa baja de la ionosfera. El uso de ancho de banda de esta región del espectro electromagnético para la localización de descargas en redes multi-estacionales es discutida por Cummins and Murphy (2000) y Dowden et al. (2002). Dichas redes determinan

el tiempo de arribo del grupo de onda (Time of Group Arrival, TOGA) a cada estación. En cada sitio de la red se determina la progresión de la fase en función de la frecuencia.

En la actualidad las redes para localización de descargas están en funcionamiento en muchas regiones del mundo, usando múltiples estaciones para su localización. Como la red mundial de localización de descargas eléctricas (WWLL) actualmente cubre algunas de las limitaciones de los satélites o de los sistemas regionales de detección de descargas eléctricas. Es una red de muy bajo costo en su funcionamiento y proporciona datos de descargas eléctricas en cualquier parte de mundo y eventualmente se espera que proporcione una cobertura global en tiempo real. Para una localización más exacta se requiere que un mínimo de cuatro estaciones detecten la descarga con un tiempo residual de menos de 30  $\mu$ s (Rodger et al., 2004a, 2005). Sin embargo cuando el número de estaciones aumenta se disminuye la incertidumbre en la localización (Rodger et al. 2005).

Además de la red de localización de descargas eléctricas WWLL que se describe en este trabajo en la actualidad existen redes para la detección de descargas eléctricas alrededor del mundo como: National Lightning Detection Network (NLDN) en los Estados Unidos; Lightning Position and Tracking System (LPATS) en Alemania; en Australia opera una red comercial de 7 sensores de LPATS TOA. En el territorio español existen 13 sensores a cargo del Servicio Meteorológico Español.

### **1.3 Importancia y Aplicación de estudiar el tema**

La importancia de las descargas eléctricas para estudios climáticos es cada vez más reconocida (Williams, 2005). Las descargas son una evidencia llamativa de los procesos microfísicos y de electrificación que ocurren en las nubes. Se relacionan directamente al granizo, gotitas dentro de la nube y a la intensificación de la precipitación en la superficie. La distribución espacial y temporal de las descargas eléctricas proporciona evidencia de la evolución de la actividad convectiva.

El sistema de detección de descargas eléctricas tiene una gran variedad de aplicaciones tanto como científicas como comerciales y en riesgos ambientales. Científicamente proporciona un mejor entendimiento de la actividad eléctrica global (Volland, 1984) y un mejor seguimiento de tormentas severas a nivel global. Asimismo, los datos promedio estacionales o anuales pueden interpretarse como un indicador de variabilidad y potencial cambio climático (Schlegei et al., 2001). Los datos de distribución global de tormentas eléctricas (es decir, de tormentas en las cuales se observan descargas eléctricas) pueden ser extremadamente útiles en la estimación directa de impactos regionales y locales en la atmósfera global (Rodger, 1999). La estimación de descargas eléctricas en áreas con poca cobertura de radar puede usarse para estimar lluvia convectiva (Tapia et al., 1998). Datos globales de descargas eléctricas pueden usarse en el sector comercial (p. e., navegación) o en el sector ambiental (p. e., dirección del fuego en bosques, inicialización y actualización de modelos de pronóstico del tiempo).

#### **1.4 Antecedentes**

En los últimos años se han venido realizando una serie de estudios e investigaciones con información de descargas eléctricas en muchas partes del mundo y con diferentes objetivos arrojando los siguientes resultados.

La variación de la actividad de las descargas eléctricas sobre días, meses y años ha sido estudiada por varios autores para ciertas regiones del planeta. Sobre el Oeste del Océano Pacífico, Petersen and Rutledge (1996) y Orville Silver (1997) encontraron que las descargas eléctricas de nube a tierra presentan un pico bien definido entre las 0200 y 0400 del tiempo local (LT), un máximo secundario a las 1500 LT y un mínimo centrado cerca de las 1200 LT.

La variabilidad mensual también es bien conocida, particularmente en algunas regiones. En latitudes medias, la actividad de las descargas eléctricas sobre tierra es máxima en el verano y mínima en el invierno (Finke and Hauf, 1996; Orville and Silver, 1997), mientras que en regiones tropicales tiene dos picos

(Orville and Silver, 1997; Pinto et al., 1999). Sin embargo, debido a la falta de observaciones por períodos largos, la variabilidad anual es menos conocida (Orville, 1994; Orville and Silver, 1997).

La distribución geográfica de las descargas eléctricas de nube a tierra ha sido estudiada por varios autores. Orville and Silver (1997) reportan que la densidad anual varía de 9 a 13 descargas por  $\text{km}^2 \text{ año}^{-1}$  para los Estados Unidos en un período de 1989 a 1997. Orville and Huffines (1999) tienen resultados publicados para Estados Unidos de 1989 a 1997, Hodanish et al. (1997) para el estado de la Florida de 1986 a 1995, Finke and Hauf (1996) para el sur de Alemania de 1992 a 1994 encontraron una densidad mayor que 6 descargas por  $\text{km}^2$  y por año. En contraste, los resultados de Pinto et al. (1999) para Brasil en 1993, indican una densidad máxima mucho mayor, correspondiente a 15.5 descargas por  $\text{km}^2$  y por año, con un porcentaje de 35% de descargas positivas y un pico medio de corriente de 17.8 kA en dichas descargas, mientras que las descargas negativas presentan mayor corriente (30.9 kA). Rivas et al. (2001) encontraron que para la Península Ibérica las densidades de descargas positivas, negativas y totales son 3.1, 0.2 y 3.3 descargas por  $\text{km}^2$  y por año, es decir mucho menores que en Estados Unidos, Alemania y Brasil.

### **1.5 Objetivo General**

En este trabajo se propone realizar un estudio preliminar de las descargas de nube a tierra sobre México y áreas oceánicas adyacentes. Usando 2 años (2004-2005) de datos de la red mundial de localización de descargas eléctricas (WWLL), tomando como descarga aquella que fuera detectada por un mínimo de 4 estaciones. Dicho estudio pretende analizar tanto la distribución temporal a escalas mensuales y diurnas como los patrones espaciales a escala mensual.

## Capítulo 2

### Descargas Eléctricas y Electrificación

#### 2.1 Conceptos Generales

El rayo es producto de la unión violenta de las cargas positivas y negativas, constituyendo una descarga eléctrica a través de gases de baja conductividad. Los rayos pueden ocurrir dentro de una misma nube, de nube a nube o de nube a tierra (Figura 2.1).

De manera general, las nubes están cargadas negativamente en su base y positivamente en su parte superior. Por inducción electrostática la tierra obtiene carga positiva inmediatamente debajo de tal nube. Estableciéndose así una diferencia de potencial enorme, y produciéndose la descarga eléctrica cuando se vence la rigidez dieléctrica del medio (aire seco mas vapor de agua). Simultáneamente con la descarga eléctrica, se producen relámpagos y truenos que son manifestaciones a distintas longitudes de onda del mismo fenómeno. Aproximadamente la mitad de las descargas eléctricas a nivel mundial constituyen descargas simples y la otra mitad corresponden a rayos compuestos por descargas múltiples de rápida sucesión.

Así como en la nube se forman centros de carga, algo similar ocurre en la superficie, pues hay suelos más conductores que otros, considerando que las cargas en tierra se mueven según la inducción que impone la nube. Dado que la nube puede cubrir grandes superficies terrestres, su influencia electrostática será importante. Puede haber de este modo muchos centros de carga.

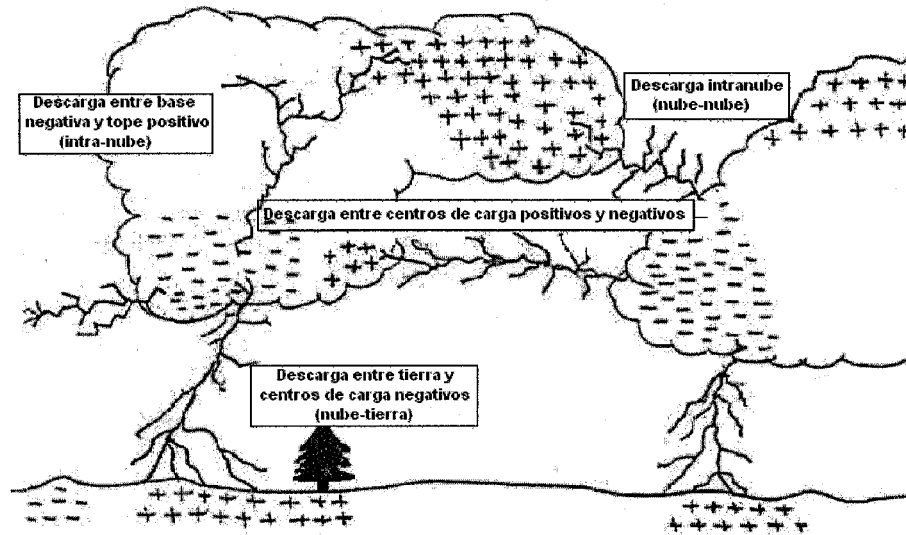


Figura 2.1.- Distintos tipos de descargas atmosféricas

En una nube convectiva los mecanismos de generación y separación de cargas tienden a aumentar la energía eléctrica del sistema. Cuando el campo eléctrico o el potencial superan un valor crítico, se produce el rayo o descarga eléctrica que tiende a reducir la energía con una redistribución de las cargas eléctricas en la nube, en el suelo y en la atmósfera. Durante un corto período de tiempo la energía electrostática acumulada es liberada en forma de energía electromagnética (relámpago visible mas ondas de radio), energía acústica (trueno) y energía calorífica. El efecto neto de las corrientes generadas es el del transporte de cargas negativas hacia el suelo y positiva a niveles altos de la atmósfera.

La acumulación local de cargas produce dos tipos de descargas: las NN (dentro de la nube o entre nube y nube) y las NT (nube a tierra). Normalmente existe una proporción de mayor que 5 a 1 en favor de la ocurrencia de NN frente a la de NT, ya que los procesos de carga son producidos dentro de la nube y la disminución de la presión con la altura favorece la aparición de los NN. Podemos subdividir los del tipo NT en positivos (descargas NT(+)), o negativos (descargas NT(-)), según sea el origen de la descarga y de los centros que lo generen.



## 2.2 Procesos de generación y separación de cargas en nubes convectivas

Respecto a los procesos de generación y separación de cargas, respectivamente se ha dado un nuevo enfoque a las teorías que tratan de explicar la electrificación de las nubes. Actualmente no se hace una clasificación basándose en la influencia (teorías inductivas) o (teorías no inductivas) del campo eléctrico de buen tiempo (Williams, 1989). Estas teorías se basaban en el posible efecto (o no) del campo eléctrico terrestre como elemento fundamental en la generación de cargas. Aunque en la actualidad no se han abandonado por completo tales teorías, los modelos e hipótesis que se manejan son los asociados con el papel de la precipitación y de la convección (Charles, 1985).

En la teoría de la precipitación (Figura 2.2a) se parte de un estado en el que la nube es capaz de producir gotas de agua lo suficientemente grandes para que no puedan ser mantenidas por las corrientes ascendentes. Por efecto de la gravedad las gotas de agua caen interaccionando con las partículas sólidas y líquidas de menor tamaño que aún siguen ascendiendo. Las colisiones producen una separación de cargas parecida a la que ocurre por frotamiento: las mayores quedan cargadas negativamente y las pequeñas positivamente. Las corrientes aéreas y la gravedad tienden a separarlas del lugar donde se generaron.

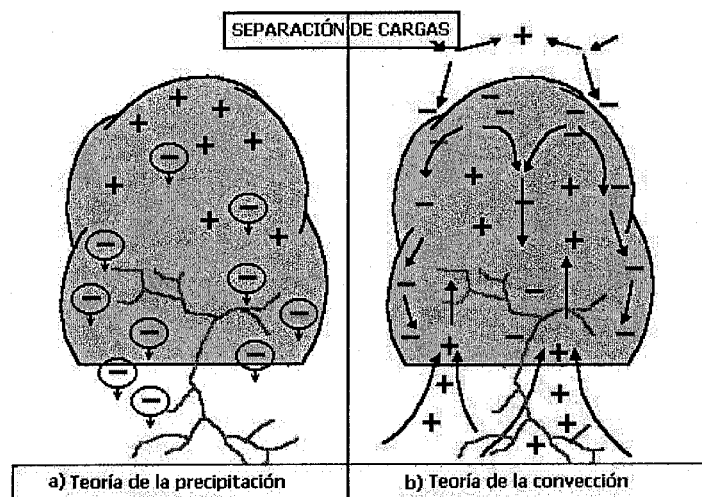


Figura 2.2 Esquematización de la separación de cargas. a) Teoría de la precipitación. b) Teoría de la convección.

En los procesos de electrificación por convección (Figura 2.2b) no es necesaria la presencia de la precipitación: basta que existan fuertes corrientes ascendentes que puedan extraer las cargas positivas que se han acumulado en ciertas zonas cercanas a la superficie terrestre por debajo de la nube. Estas corrientes se transportan a niveles más altos por el lado ascendente, que se encuentra en el interior de la nube, mientras que en niveles superiores los rayos cósmicos ionizan las moléculas del aire. Las cargas negativas así generadas son atraídas por las positivas de la nube, formando una especie de "capa pantalla" a la vez que son transportadas por las corrientes descendentes de la periferia. Formando así una especie de dipolo positivo (Williams, 1989).

### **2.3 Distribución de cargas en nubes convectivas**

Desde un inicio, se pensó en la estructura dipolar para la distribución de cargas en las nubes convectivas para explicar la formación de rayos. En 1752, Benjamín Franklin sugirió una ambigüedad sobre el signo de la carga en la parte alta de las nubes. En los años 20's Wilson, tras realizar observaciones a cierta distancia de numerosas tormentas llegó a la conclusión de que la estructura básica de una nube tormentosa era la de un dipolo positivo, es decir, la carga positiva en los niveles altos. Otras mediciones, llevadas a cabo en la misma época por George C. Simpson determinando la carga en las gotas de lluvia que llegaban al suelo, indicaban que el dipolo era de tipo negativo. En ambos casos la estructura dipolar era la que se planteaba para explicar las características del sistema eléctrico complejo de una tormenta que da origen a descargas.

MODELOS DE DISTRIBUCIÓN DE CARGA EN UNA NUBE CONVECTIVA

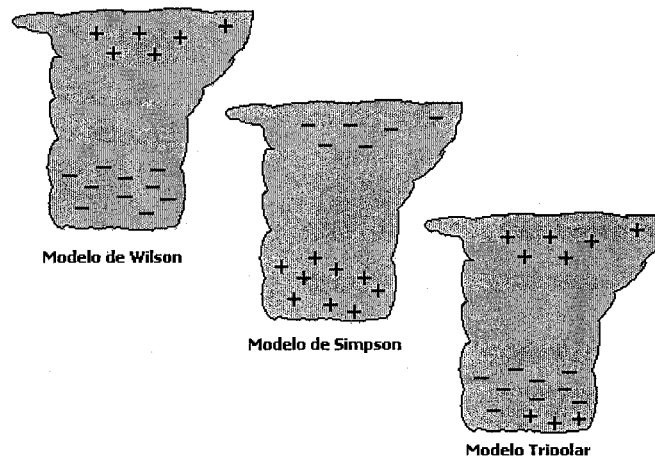


Figura 2.3 Modelos de distribución de cargas en nubes convectivas.

Desde la controversia Wilson-Simpson en los años veinte, han transcurrido muchos años de observaciones a través de las cuales se ha podido establecer que la estructura básica de las nubes tormentosas no es dipolar, sino tripolar (Figura 2.3). Podría parecer que el modelo de convección conducía, de forma más natural, a la estructura tripolar, debido al flujo de cargas positivas hacia la base de la nube que podría explicar el núcleo secundario de cargas positivas. Sin embargo, mediciones recientes de la intensidad de esta corriente indican que dicho flujo es demasiado débil para explicar la velocidad de carga de la nube. Es por ello que se intentó una posible explicación del modelo tripolar a través de la teoría de la precipitación (Williams, 1989).

#### 2.4 Procesos que se producen en descargas eléctricas NT (-)

La generación de la descarga comienza, en la gran mayoría de los casos, entre la región principal de carga negativa dentro de la nube y la superficie terrestre (cargada positivamente por inducción). La chispa tiende a seguir un camino, que se va creando por impulsos sucesivos desde la nube a tierra. Es la llamada guía escalonada ("step leader"), como se muestra en la Figura 2.4, que con arranques y paradas sucesivas va acercándose a tierra.

El proceso es invisible a nuestros ojos, pues no transporta gran cantidad de carga y no es brillante. suele ramificarse mucho, y la mayoría de las ramas no llegan al suelo. El resultado final es la existencia de un camino ionizado de mínima resistencia.

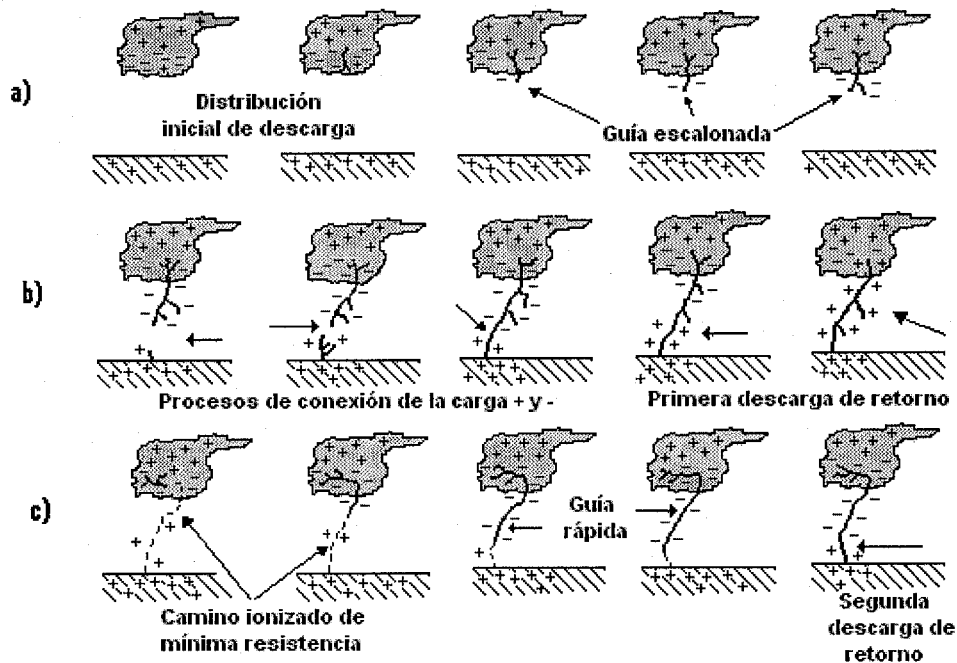


Figura 2.4 Esquematización de la evolución de una descarga; a) Muestra la señal detectada en el golpe preliminar en la formación de la guía escalonada; b) Forma de onda asociada a la primera descarga de retorno. Los pequeños pulsos que la preceden fueron producidos por diversos pasos de la guía escalonada justo antes de la conexión entre ésta y la descarga de conexión. La primera descarga de retorno es precisamente la que emplean la mayoría de los sistemas comerciales de detección de rayos; c) Señal de una descarga de retorno superior.

Cerca de la superficie terrestre se va generando, poco a poco y sobre ciertos puntos llamados de descarga, una acumulación de cargas positivas (descarga de conexión) que son las primeras en conectar con la guía escalonada descendente, llegando a cerrar el circuito nube a tierra.

Se produce en este momento la primera descarga de retorno ("return stroke"), que se desplaza desde la tierra a la nube transportando gran cantidad de carga en el canal y, en un tiempo muy pequeño, aumentando enormemente la

temperatura del aire y liberando gran cantidad de energía calorífica y electromagnética, con los efectos luminosos y sonoros asociados.

En la mayoría de los casos, cuando la primera descarga de retorno ha desaparecido, baja otra guía, pero esta vez sin pausa. Es la llamada guía rápida

("dart leader") que baja de una sola vez de forma no pulsante. Posteriormente a su llegada al suelo aparece una segunda descarga de retorno (menos energética que la primera) y así sucesivamente hasta unas 5 o 10 veces en promedio (se han llegado a detectar hasta 42 descargas de retorno por un mismo camino Uman (1987). Para el ojo humano todo sucede tan rápido que lo que se observa es un solo destello.

No obstante que las tormentas en las cuales se observan rayos son altamente variables en su intensidad, dimensiones, composición y estructura eléctrica, se pueden hacer algunas generalizaciones acerca de ellas:

- La actividad eléctrica suele venir asociada con fuertes corrientes ascendentes y precipitaciones, por lo que se asocia a nubosidad de tipo cumuliforme. No suele estar asociada con nubosidad de tipo estratiforme y nunca con cirrus aislados.
- La mayor actividad se observa sobre tierra y en zonas tropicales.
- En las latitudes más altas, la frecuencia de los rayos decrece debido a la disminución en la convección.

La mayoría de los rayos se observan en nubes con contenidos de gotas de agua y de hielo, aunque han habido algunas observaciones en nubes de agua líquida solamente (Uman, 1987). Se han observado también rayos en nubes que están completamente por debajo de temperaturas de 0° C.

### **2.5 Descargas Eléctricas Positivas NT (+)**

Las descargas producidas desde centros de cargas positivas en la nube (Figura 2.5) son capaces de engendrar rayos de polaridad diferente a los NT (-) clásicos, son considerados como descargas positivas de nube a tierra, NT (+). En nubes que generan descargas de este tipo, el campo eléctrico estaría

invertido con respecto al caso de descargas negativas. Las diferencias fundamentales de rayos producidos por NT(+), a diferencia de aquellos producidos por NT(-), son:

- Transportan cargas positivas a tierra (10 veces más que los NT (-)).
- Generan corrientes eléctricas y campos más intensos que los normales en las descargas NT (-), siendo de signos opuestos.
- La dirección de propagación de la guía y de la descarga de retorno es inversa a la NT (-). La mayoría de las veces sólo se genera una descarga de retorno, en lugar de múltiples. Se han detectado casos en los que no aparece la guía inicial escalonada.
- Están asociados a fenómenos convectivos severos (superceldas, líneas de turbonada, etc.) y a ciertas fases de desarrollo de tormentas o sistemas convectivos de mesoescala (preferentemente en sus fase de disipación), ya que una zona generadora de NT (+) es la asociada a las áreas de lluvia estratiforme de las nubes tormentosas pues las cargas positivas son transportadas desde la zonas de desarrollo más activas.
- El número de descargas positivas es mayor en las tormentas de meses fríos que en los meses cálidos, ya que la separación horizontal de cargas es mayor y la distancia entre las cargas positivas y la tierra es menor.

## DESCARGAS POSITIVAS EN UNA NUBE CONVECTIVA

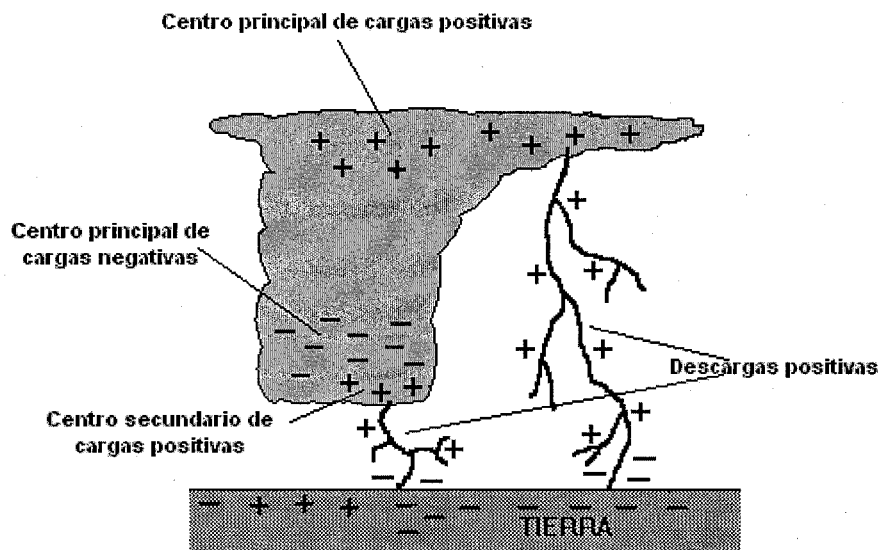


Figura 2.5.- Descargas positivas en una nube convectiva

## 2.6 Evolución de las descargas con el tiempo

### 2.6.1 Fases de desarrollo y madurez de la convección

Es un hecho que los núcleos convectivos en su estado de desarrollo son sistemas que no suelen producir descargas NT (Figura 2.6). En general, el primer rayo surge cuando se detectan los primeros ecos de radar en altura, esto es cuando los núcleos convectivos se empiezan a organizar. Las primeras descargas que se producen son del tipo NN.

Después de alcanzar su estado maduro los NT (-) comienzan a incrementarse rápidamente, tendiendo a agruparse en las cercanías de las áreas de fuerte desarrollo vertical y posteriormente, dentro de la zona de intensidad de precipitación más marcada (el radar puede no indicar precipitación en el suelo y ya se han producido los primeros NT). Cuando se observa una tormenta a distancia se pueden llegar a detectar descargas desde la parte más elevada de los cumulonimbus (Cb), bien desde la zona asociada al yunque o en la parte alta y delantera más activa de las celdas, alcanzando el suelo con facilidad. La fase de madurez de la nube convectiva se caracteriza por un incremento del número de descargas con el tiempo, hasta un máximo de actividad eléctrica. A

la vez sigue creciendo la zona estratiforme y comienzan a aparecer descargas fuera de la zona convectiva propiamente dicha.

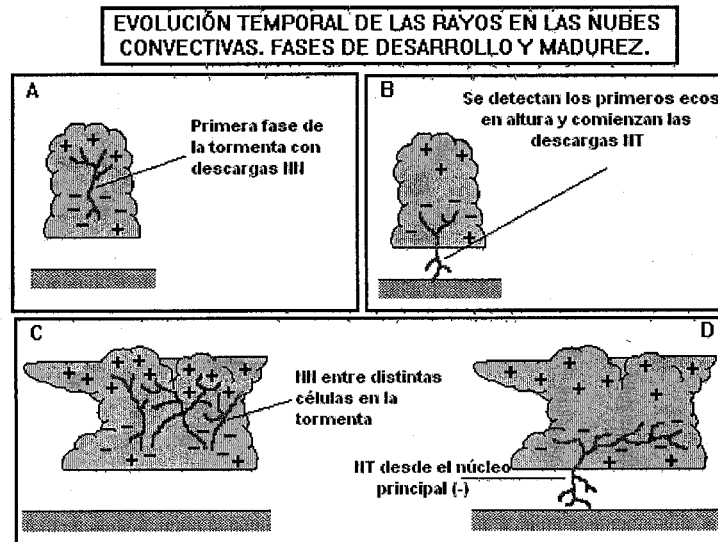


Figura 2.6.- Fases de desarrollo y madurez de los rayos

En la Figura 2.6 se observa esquemáticamente la evolución de las descargas en las nubes convectivas, desde las NN en una misma nube a las NN de diferentes elementos convectivos, llegando a los NT. En la primera fase el transporte y transferencia de cargas se realiza en la propia celda y en la vertical con NNs (Fig. 2.6A). Posteriormente comienzan a aparecer los primeros NT (-) (Fig. 2.6B), cuando se detectan los primeros ecos en altura, incrementándose rápidamente y agrupándose en la zona más activa de la nube. Cuando la estructura nubosa adquiere mayor grado de organización comienzan a ganar extensión horizontalmente, generándose los primeros NN entre diferentes elementos celulares (Fig. 2.6C), mientras los NT siguen agrupados en la zona más activa del sistema (Fig. 2.6D). En menor número y frecuencia aparecen en la zona de lluvia estratiforme, donde algunos elementos convectivos pueden estar involucrados.



## 2.6.2 Fase de Disipación

En la fase de disipación de las nubes convectivas, la actividad de las descargas NT (-) comienza a disminuir notablemente, mientras que las NN permanecen casi constantes. Además, las descargas NT tienden a tener una componente más horizontal que vertical. Con anterioridad suelen presentarse los NT (+) en las zonas de desarrollo, pero es en la fase de disipación cuando suelen aumentar, coincidiendo con el transporte de cargas positivas generadas en la zona convectiva y llevadas al área estratiforme por la circulación dentro de la nube.

Cuando el sistema llega a poseer, una amplia región estratiforme por la cizalladura, rica en pequeños cristales de hielo cargados positivamente, se pueden observar los primeros NT (+) y (NN) fuera de las zonas convectivas.

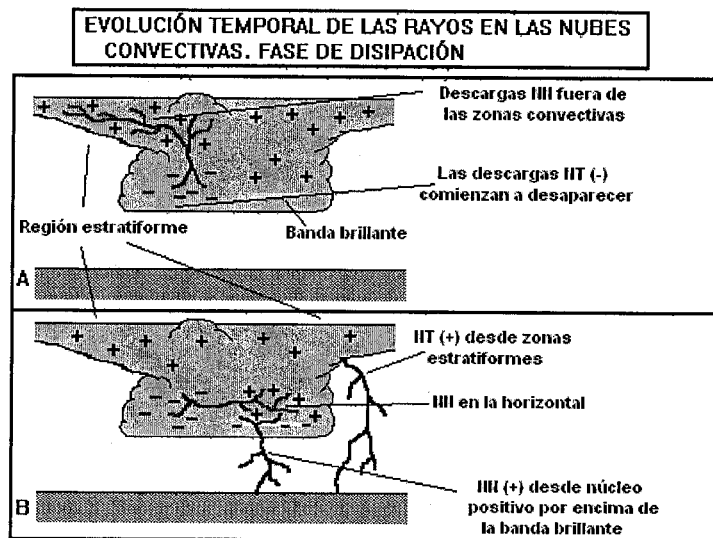


Figura 2.7.- Fase de disipación de los rayos en nubes convectivas.

En la fase de disipación del sistema (Fig.2.7) se observa que disminuyen drásticamente los NT (-), produciéndose a intervalos de tiempo cada vez mayores y sin ofrecer una estructura celular nítida. Por el contrario, las descargas horizontales siguen manteniendo más actividad que las anteriores, alcanzando gran extensión en la horizontal.

En la fase final se ha observado que las descargas horizontales entre núcleos positivos y negativos se producen en una zona que se encuentra sobre una capa que se denomina, por su señal en radar, banda brillante. Esta zona se caracteriza por un aumento considerable en la reflectividad, debido a que los hidrometeoros sólidos cuando caen por gravedad, comienzan a derretirse al cruzar la isoterma de 0C. Las descargas horizontales se generan entre el núcleo de cargas negativas de las células más activas y una aparente zona de cargas positivas que en el mismo nivel se ha formado en las partes de disipación de la tormenta. Se aprecia la existencia de un núcleo de cargas negativas en la misma banda brillante y otro núcleo positivo sobre ella. Esta especie de "acoplamiento positivo" se ha tratado de explicar por el hecho de que en la fase de disipación los movimientos descendentes transportan hacia abajo los cristales de hielo cargados positivamente.

## **2.7 Descripción de la ionosfera y las ondas electromagnéticas**

La ionosfera, es una capa que se observa en la atmósfera caracterizada por un brusco aumento de la conductividad eléctrica, localizada a partir de los 80 Km de altitud. En dicha capa los gases están ionizados al haber perdido los electrones más periféricos que quedan libres circulando entre iones positivos, negativos y moléculas neutras. Sus características comienzan a ser parecidas a las de un conductor metálico. Podemos considerar a la ionosfera como un conductor casi perfecto en cuyo interior, debido a la gran conductividad, el campo eléctrico es nulo y sus superficies externas son equipotenciales.

En la Figura 2.8 se representan los perfiles atmosféricos desde el punto de vista térmico y eléctrico. La ionósfera coincide con la mesosfera y termosfera. (Varios autores, 1986)

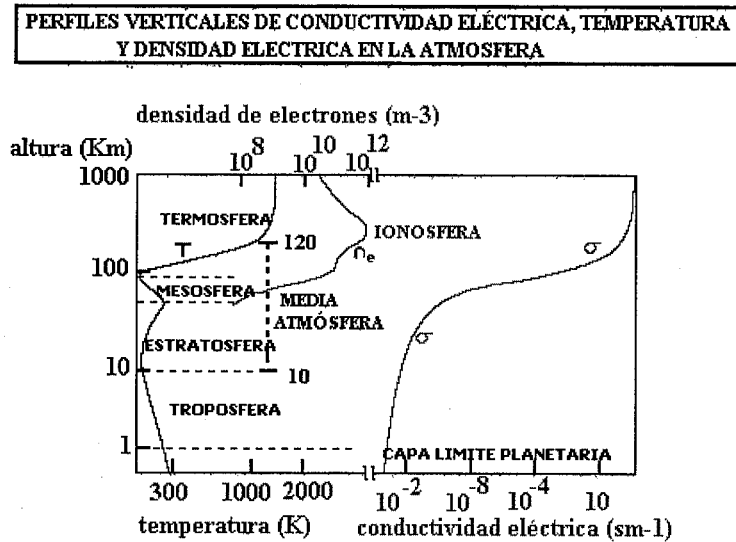


Figura 2.8 Perfiles verticales de conductividad eléctrica ( $\sigma$ ), temperatura ( $T$ ) y densidad de electrones ( $n_e \cdot m^{-3}$ ) en la atmósfera.

El modelo eléctrico que generalmente se asocia a la atmósfera es el de un condensador esférico. Su cara interna sería la superficie terrestre, cargada negativamente, y la externa la ionosfera, cargada con signo opuesto. El campo eléctrico ( $E$ ) presente en ausencia de tormentas eléctricas disminuye con la altura (es mayor en las cercanías de la superficie terrestre y nulo en la ionosfera) ya que el aire no es un dieléctrico perfecto ( $E$  sería constante) al poseer cargas debido a procesos de ionización.

Las tormentas eléctricas son extremadamente complejas y no existe un modelo generalmente aceptado que pueda ser utilizado para calcular la corriente liberada por ellas en el circuito eléctrico global. En la Figura 2.9 se supone una distribución dipolar en la nube, con un núcleo de cargas positivas en la cima y otro de negativas en la base. Este modelo es el más simple y por consiguiente más utilizado a la hora de explicar el circuito eléctrico global. La gran mayoría de las nubes que se forman en la atmósfera se disipan sin producir ni precipitación ni rayos. Los iones que se mueven rápidamente dentro de la nube son atrapados por partículas de hielo más grandes, de forma que decrece la

conductividad eléctrica de la nube con respecto al aire que le rodea, así que la corriente de "buen tiempo" queda alterada en las cercanías de la nube. A medida que la velocidad vertical en la nube aumenta, se observa que la electrificación aumenta. La fuerte electrificación generalmente comienza con el desarrollo rápido, tanto horizontal como vertical, de un cúmulo de buen tiempo a un cúmulunimbus.

**CIRCUITO GLOBAL SIMPLIFICADO**

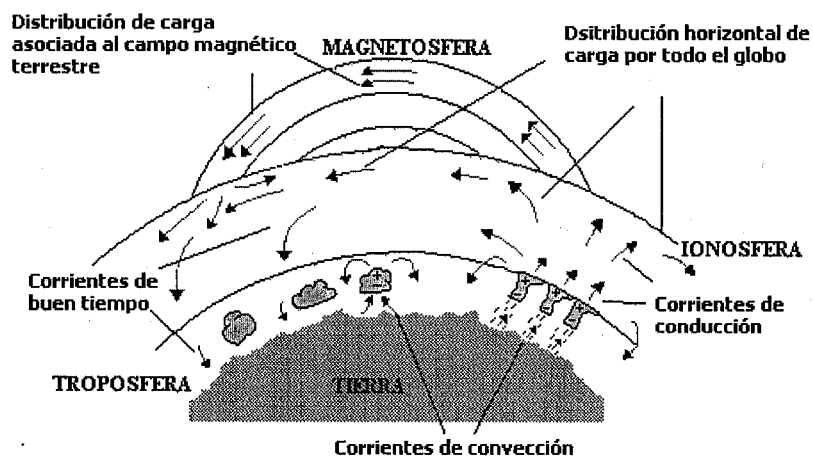


Figura 2.9 Circuito Eléctrico Global

Las ondas electromagnéticas pueden propagarse a lo largo de líneas geomagnéticas en la ionosfera teniendo probabilidad de viajar en la magnetosfera. La forma de las ondas electromagnéticas depende de la carga eléctrica almacenada dentro del canal y de sus características, tales como la longitud, diámetro y orientación del mismo. Una onda electromagnética vista desde la troposfera no es usualmente caracterizada por un canal de ionización producido por una descarga eléctrica visible. En la tabla 2.1 se describe el espectro radioeléctrico, donde se indica (marcado en negritas) el canal donde viajan las ondas electromagnéticas.

Tabla 2.1 Descripción del espectro radioeléctrico en función del rango de frecuencias.

Rango de Frecuencias	Designación por su Frecuencia	Longitud de Onda	Designación por su Longitud
<b>3kHz a 30kHz</b>	<b>VLF Frecuencias muy bajas</b>	<b>100km a 10km</b>	<b>Miriamétricas</b>
30kHz a 300kHz	LF Frecuencias bajas	10km a 1km	Kilométricas
300kHz a 3000kHz	MF Frecuencias Medias	1km a 100m	Hectométricas
3MHz a 30MHz	HF Frecuencias Altas	100m a 10m	Decamétricas
30MHz a 300MHz	VHF Frecuencias muy Altas	10m a 1m	Métricas
300MHz a 3000MHz	UHF Frecuencias Ultra Altas	1m a 10cm	Decimétricas
3GHz a 30GHz	SHF Frecuencias Súper Altas	10cm a 1cm	Centimétricas
30GHz a 300GHz	Frecuencias Extremadamente Altas	1cm a 1mm	Milimétricas

## Capítulo 3

### Instrumentación y localización de descargas

#### 3.1 Red Mundial de Localización de Descargas Eléctricas

La red mundial de localización de descargas eléctricas (World Wide Lightning Location, WWLL por sus siglas en inglés) es una asociación de sitios receptores que registran datos que permiten la localización de las descargas por todo el mundo. Consiste actualmente de 28 sitios receptores de descargas eléctricas en operación (como se puede ver en la Tabla 3.1). Fue iniciada por R. Dowden, en la Universidad de Otago y LF\*EM (Nueva Zelanda) y es manejada actualmente por R. Holtzworth en la Universidad de Washington<sup>1</sup>. Cada uno de estos sitios transmite a una computadora de proceso central (CPC) con precisión de microsegundos, el tiempo de arribo exacto en ese sitio de las ondas electromagnéticas de muy baja frecuencia producidas en otro lugar por descargas denominadas "sferics" en inglés. Con esta información de todos los sitios y la posición exacta de estos (dentro de algunos cientos de metros), se puede determinar la posición de la descarga con una precisión en el espacio de sólo algunos kilómetros.

El diseño del receptor es relativamente sencillo y sirve para detectar descargas tan lejanas como 10,000 kilómetros. Sin embargo, la localización precisa de la descarga utilizando el método del tiempo de arribo del grupo de onda (TOGA, por sus siglas en inglés, Time of Group Arrival) requiere de por lo menos 5 sitios que detecten la misma descarga (Dowden et al., 2002). La radiación de la descarga a una frecuencia de aproximadamente 10 kHz (correspondiente a 30 km de longitud de onda) se denomina "spherics" en inglés, que se traducirá en este trabajo como "esféricas". En tales frecuencias, el pulso viaja a través del mundo en la guía de onda formada por la base de la ionosfera y la superficie de la Tierra (principalmente el océano). Así, los sitios de recepción pertenecientes a una red mundial pueden estar separados por varios miles de kilómetros,

---

<sup>1</sup> <http://webflash.ess.washington.edu>

siendo lo óptimo 3,000 km de separación, para hacer más probable la detección. El número de estaciones requerido para cubrir el mundo entero es de alrededor de 50, pero en la actualidad se cuenta con poco más del 50 % del objetivo.

Los investigadores a cargo de los sitios receptores, ubicados principalmente en universidades e institutos de investigación, reciben mensualmente los datos con las localizaciones de descargas eléctricas del mundo entero en discos compactos (CDs). Estos datos mundiales se reciben entre 2 a 6 semanas después del evento, lo cual es adecuado para fines de investigación o para comparar con otros fenómenos. Para fines de pronóstico del tiempo a corto plazo se pueden obtener los datos casi en tiempo real a cambio de un costo moderado. La red WWLL hace uso de Internet para transmitir los datos de cada estación al procesador central, así como para transmitir los datos a los usuarios que los requieran en un muy corto plazo.

## **3.2 Componentes de la Fuente de Datos**

### **3.2.1 Acceso a Internet**

La red WWLL funciona en "tiempo real". El tiempo de arribo de cada pulso es transmitido por Internet a las computadoras de proceso central (CPCs) en Nueva Zelanda y Estados Unidos de América inmediatamente. El contenido del paquete de los datos y la energía de los pulsos deben de arribar en segundos a las CPCs. La ocurrencia de los pulsos y el índice de transmisión de datos es cerca de 300 por minuto. Se pueden transmitir un total de 2 GB de datos por mes.

### **3.2.2 Sitio Adecuado**

Los sensores que utilizan las antenas de la WWLL detectan dentro de la banda del campo eléctrico "VLF" (Very Low Frequency), tales como las que se pueden usar en regiones (urbanas) como los campus de las universidades y de los institutos de investigación, con tal de que no se monten en azoteas de edificios eclipsados por otras antenas o alambres, o por edificios próximos que sean más altos. Las condiciones ideales de la antena están cerca de un borde o una

esquina de la azotea de un edificio alto, lejos de otras antenas, mástiles de metal o postes de banderas. Debe de estar de preferencia dentro del alcance del acceso a Internet.

### 3.2.3 Instrumentos de recepción y transmisión

- El hardware de la estación o sitio consta de los siguientes instrumentos:  
Antenas VLF omnidireccionales (en azimut): Se utilizan antenas verticales de lazo (chicote) cerrado (figura 3.1), que son sensibles solamente al campo eléctrico VLF y que se pueden utilizar en áreas como los campus de las universidades o centros de investigación.

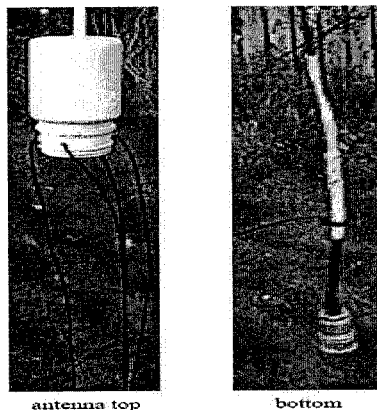


Figura 3.1 Antena VLF

- Preamplificador VLF: Para una antena vertical de lazo (chicote) se necesita un preamplificador que tiene una alta oposición a la corriente alterna.
- Fuente de alimentación del preamplificador: Esta es parte de la unidad de servicio (SU). El SU se debe montar dentro del edificio, generalmente cerca de la computadora. La conexión del preamplificador al SU es vía cable, el cual tiene por lo menos 5 conductores, de los cuales 4 alambres son aislados en un protector trenzado.



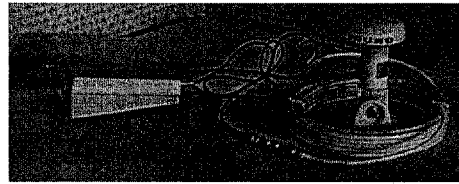
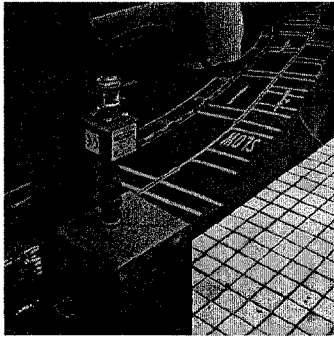


Figura 3.2 Preamplificador y fuente de alimentación

- GPS (“Global Positioning System”): Puesto que la localización mundial de descargas eléctricas (WWLL) depende de la sincronización exacta del tiempo de arribo de los pulsos en un sitio y de la posición exacta, se requieren dos señales del GPS.
- Computadora: Requiere de un procesador Pentium II (como mínimo), con una tarjeta de sonido estereofónica que incorpora un convertidor sigma-delta A/D (de analógico a digital), mejorando su rendimiento hasta obtener un muestreo de 48 kS/s. Se le debe instalar la última versión de Red Hat Linux.

### 3.3 Cobertura de la red WWLL

La distribución de antenas de la red WWLL en la actualidad alrededor del mundo se presenta en la figura 3.3. La Tabla 3.1 presenta una lista detallada de los sitios que conforman dicha red, actualizada a noviembre de 2006.

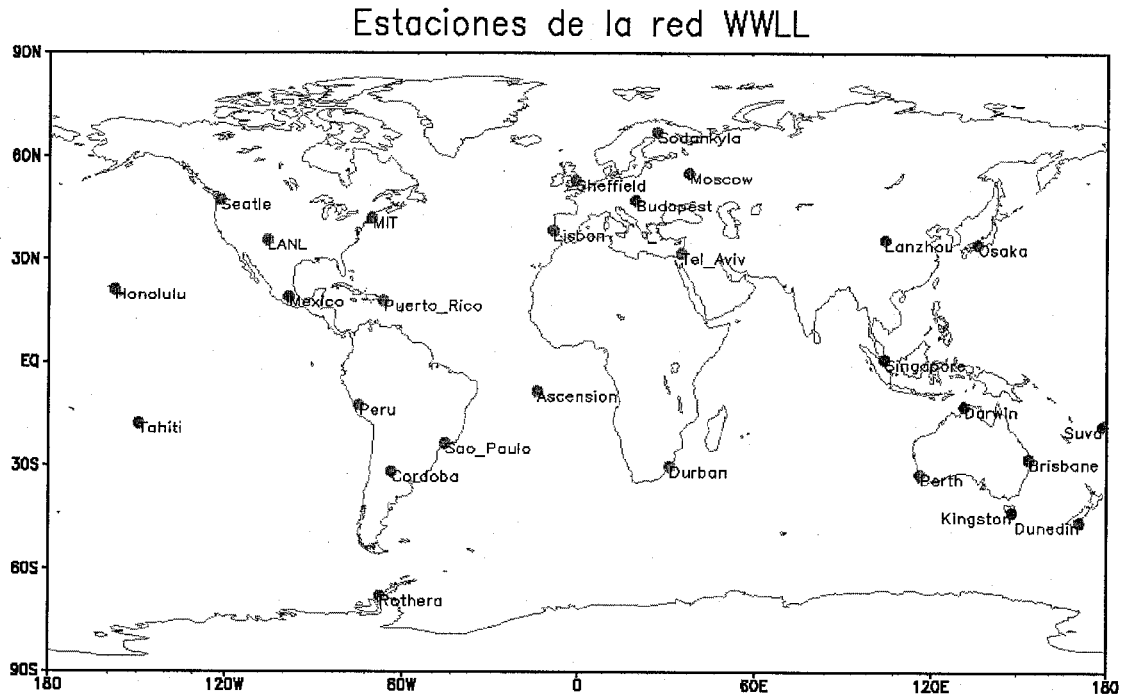


Figura 3.3 Ubicación de las antenas que conforman la red mundial WWLL en todos los continentes.

Tabla 3.1 Descripción detallada de las estaciones: latitud (N), longitud (E) y sitio físico de las antenas.

Localización	Latitud (N)	Longitud ( E )	Sitio
Dunedin	-45,9	170,5	Universidad de Otago
Darwin	-12,4	130,9	Territorio Norte de la Universidad
Brisbane	-27,6	153,1	Universidad de Griffith
Perth	-32,1	115,8	Universidad de Murdoch
Osaka	34,8	135,5	Universidad de Osaka
Singapore	1,3	103,8	Universidad Nacional de Singapore
Budapest	47,5	19,1	Universidad Eotvos
Seattle	47,7	-122,3	Universidad de Washington
MIT	42,4	-71,1	Instituto de Tecnología de Massachussets
Durban	-29,9	31,0	Universidad de Natal
Sao Paulo	-23,2	-45,9	INPE
Suva	-18,1	178,4	Universidad del Pacífico Sur
LANL	35,9	-106,3	Laboratorio Nacional los Álamos
México	19,3	-99,2	Universidad Nacional Autónoma de México
Tahiti	-17,6	-149,6	Universidad de la Polinesia Francesa
Tel Aviv	32,1	34,8	Universidad de Tel Aviv
Moscow	55,5	37,3	ISMIRAN
Sheffield	53,4	-1,5	Universidad de Sheffield
Lisbon	38,8	-9,1	Instituto Meteorológico de Portugal
Puerto Rico	18,2	-67,1	Universidad de Puerto Rico
Córdoba	-31,4	-64,2	Universidad Nacional de Córdoba
Honolulu	21,3	-157,8	Universidad de Hawaii
Rothera	-67,6	-68,1	British Antarctic Survey
Lanzhou	36,0	103,9	Academia de Ciencias Chino
Ascensión	-8,0	-14,4	British Geological Survey and BAS
Kingston	-43,0	147,3	División Antártico Australiano
Peru	-12,1	-75,3	Universidad Nacional de Peru
Sodankyla	67,4	26,4	Sodankyla

### 3.3 Método utilizado en la localización de descargas eléctricas

#### 3.3.1 Teoría Básica

La corriente en una descarga típica alcanza su valor máximo alrededor de  $2\mu\text{s}$  y decae a la mitad del pico alrededor de  $40\mu\text{s}$  (Uman, 1983), dando lugar estos resultados a pulsos cortos de aproximadamente  $100\mu\text{s}$  que cubren una banda muy ancha, como la de frecuencias VLF (Figura 3.4). Sin embargo, Lee (1989) precisa que toda la energía de esta descarga viene con un valor, el cual estaría sobre los 2 km más bajos de esta frecuencia (VLF 10-100km), siendo sólo una pequeña fracción de longitud de onda de esta banda.

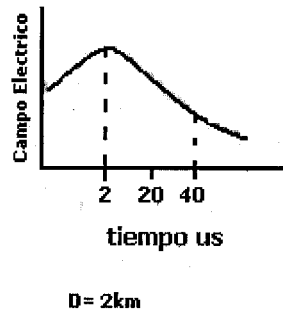


Figura 3.4 Descarga típica en tiempo y espacio, Uman (1983)

En el rango,  $r$ , del movimiento de la descarga y en el tiempo,  $t$ , el campo eléctrico de la onda,  $E$ , puede expresarse en función de componentes de Fourier:

$$E(r, t, \omega) = \sum A(\omega) \cos(\phi(\omega)) \quad (1)$$

donde para cada frecuencia,  $\omega$ , la fase se puede expresar como:

$$\phi(\omega) = \omega t - k(\omega)r + \phi_0 \quad (2)$$

El vector de onda que apunta en dirección de la propagación de la onda,  $k$ , es dependiente de la frecuencia pero no depende de la fase inicial,  $\phi_0$ . Puesto que la componente vertical del movimiento de la corriente domina la propagación del VLF en la guía de onda tierra-ionosfera (Lee, 1989) en los primeros cientos de metros, esperaríamos  $\phi_0$  en la ecuación (2) fuera cero o  $\pi$ . Sin embargo, el valor de  $\phi_0$  no tiene ninguna consecuencia, como puede verse en la ecuación (3). Diferenciando con respecto a la frecuencia en cualquier tiempo,  $t$ , y rango,  $r$ , se puede encontrar que:

$$\frac{d\phi}{d\omega} = t - r \frac{dk}{d\omega} = t - \frac{r}{v_g(\omega)} \quad (3)$$

donde  $v_g(\omega)$  es la velocidad de grupo dependiente de la frecuencia.

De la definición de velocidad de grupo, el tiempo  $t_g(\omega)$  corresponde al tiempo de propagación del grupo de onda de la descarga eléctrica desde el origen hasta el receptor, y se calcula como  $r/v_g(\omega)$ , donde  $r$  corresponde a la distancia entre el origen y el receptor. Este tiempo de recorrido depende de la frecuencia. Se puede calcular de la ecuación (3) que  $d\phi/d\omega$  es cero cuando  $t = t_g(\omega)$ . Sin embargo, es más simple medir  $d\phi/d\omega$  en un solo tiempo,  $t_0$ . Entonces

$$t_g(\omega) = t_0 - \frac{d\phi}{d\omega} \quad (4)$$

$t_0$ , es tiempo absoluto (UTC) determinado del GPS.

Si la energía espectral de las ondas electromagnéticas que denominamos "esféricas" fue concentrada siempre en una estrecha banda centrada en la frecuencia  $\omega_a$ , podríamos utilizar la ecuación (4) para determinar el TOGA a partir de la pendiente de la fase,  $d\phi/d\omega$ , en  $\omega_a$  y en el tiempo  $t_0$ .

Por lo tanto, podemos definir el TOGA de una onda electromagnética en el instante en que la línea de regresión de la fase versus frecuencia, sobre una banda especificada, tiene pendiente igual a cero. Este instante depende de la banda de frecuencia especificada.

Cabe hacer notar que TOGA es tiempo absoluto en UTC mientras que  $t_g(\omega)$  toma el tiempo de viaje (en frecuencia  $\omega$ ) del movimiento de la descarga eléctrica al receptor VLF. Si el movimiento del relámpago ocurre en tiempo absoluto,  $t_s$ , en UTC, la relación es

$$TOGA = t_s + \overline{t_g}(\omega) \quad (5)$$

Donde, la barra implica un promedio sobre la banda 3-30 kHz. La ecuación (5) no sirve como definición práctica de TOGA, ya que no se sabe ninguno de los tiempos inicialmente, y éstos sólo pueden ser calculados después de que se determina el movimiento de la descarga eléctrica.

En el método utilizado por la red WWLL, son necesarios los datos de por lo menos 4 estaciones para la localización de las coordenadas de la componente de ultra baja frecuencia (3-30 kHz) de la descarga eléctrica a tierra (Dowden et al. 2002; Lay et al. 2004). La incertidumbre en la determinación de las coordenadas varía con la localización alrededor del mundo (dependiendo de la distancia entre estaciones en la red), variando desde 4 hasta 14 km en la región de estudio y con una eficiencia en la detección del 70%, según lo mostrado por Rodger et al. (2004; 2005). Dicha incertidumbre se reduce a 4-6 km cuando se utilizan 5 estaciones en la determinación de las coordenadas, por lo que en el presente estudio se usó esta última opción.

### **3.4 Participación de México en la red WWLL**

A finales del 2003 entró en funcionamiento la estación de México la cual se encuentra en la azotea del edificio principal del Centro de Ciencias de la Atmósfera (Figura 3.5), ubicado en Ciudad Universitaria a una altura de 2235 msnm, a una latitud de 19.32 grados y una longitud de -99.17 grados.



Figura 3.5 Ubicación de la antena en Ciudad Universitaria, UNAM.

En este estudio se analizaron 2 años de datos (2004 y 2005) para determinar patrones espaciales y temporales sobre el territorio continental de México y sobre las áreas oceánicas adyacentes, las cuales fueron divididas en 4 sub-regiones como se puede ver en la Figura 3.6:

- Territorio continental de México (etiquetado con 1)
- Región Caribe (etiquetado con 2, 12.5° - 17.0° N, 83.0°-63.5° W)
- Región Golfo de México (etiquetado con 3, 18.0°-27.5° N, 97.0°-85.5° W)
- Región Pacífico Norte (etiquetado con 4, 20.0°-31.0° N, 117.0°-105.0° W)
- Región Pacífico Sur (etiquetado con 5, 10.5°-17.5° N, 105.0°-92.5° W)

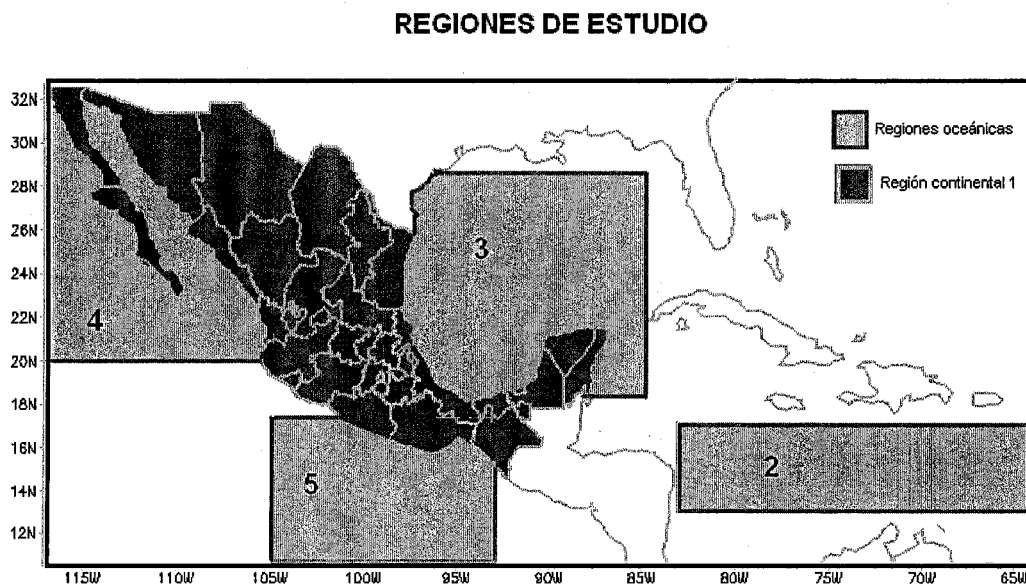


Figura 3.6 Regiones de estudio. 1) Territorio Continental de México; 2) Región Caribe; 3) Región del Golfo de México; 4) Región Pacífico Norte; 5) Región Pacífico Sur.

## Capítulo 4

### Resultados

#### 4.1 Resultados en la escala mensual

Se presentan los resultados mensuales para cada año en función de las cinco regiones consideradas. Se estandarizó el número de descargas eléctricas en un área de 50 x 50 km. En cada una de las regiones existen diferentes sistemas o fenómenos que las afectan y se presenta una descripción detallada por región.

##### 4.1.1 Región 1

Climatológicamente, los meses de invierno-primavera (diciembre, enero, febrero, marzo, abril) sobre el territorio continental nacional se caracterizan por condiciones secas en su mayor parte, con afectaciones de sistemas meteorológicos de gran escala que se desarrollan en latitudes medias. Dichos fenómenos afectan principalmente el norte del país, aunque en ocasiones se propagan hasta muy al sur, sobre el Golfo de México y el sureste mexicano, provocando lluvias desde Veracruz hasta Yucatán (Magaña, 1999).

Podemos ver en la Figura 4.1 que, para los meses de diciembre (Figura 4.1L), enero (Figura 4.1A), febrero (Figura 4.1B) y marzo (Figura 4.1C) del 2004, el número de descargas es mínimo; sin embargo, para los mismos meses del 2005, el número de descargas aumenta para la Península de Yucatán y Chiapas. En el mes de abril (Figura 4.1D) encontramos que hay un mayor número de descargas en el 2004 que en el 2005. Esta diferencia en la densidad de descargas en los meses de invierno se le puede atribuir al paso de los sistemas frontales. Los frentes fríos registrados para estos meses, según el Servicio Meteorológico Nacional, fueron 34 en 2004 y 30 en 2005.

Cabe destacar que el número de descargas observadas en mayo (Figura 4.1E) de 2005 fue del 16% del total acumulado en ese año, mientras que para 2004



fue sólo del 3%. Estas observaciones indican un inicio temprano de la temporada de lluvias sobre territorio nacional asociada a la temporada de ciclones tropicales 2005, que fue la más activa y destructiva del registro histórico. Toda esta actividad de descargas en este mes se observa principalmente en la región de la Sierra Madre Oriental, con mayor concentración sobre los estados de Oaxaca, Chiapas y de la Península de Yucatán.

Durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre, se encuentra bien establecida la temporada de lluvias en el territorio nacional, las cuales están directamente asociadas a las descargas eléctricas. En los meses de julio, agosto y septiembre podemos ver claramente la presencia del llamado Monzón de Norteamérica en el noroeste de México. Ya en los meses de octubre (Figura 4.1J) y noviembre se observa una disminución importante del número de descargas, en acuerdo con el inicio del fin de la temporada de fenómenos tropicales.

En la figura 4.2 se presenta la distribución de frecuencia del número total de descargas correspondiente al sector continental en función del mes. Se puede ver claramente la correlación de las descargas en las estaciones de lluvias y secas. La frecuencia máxima de descargas de nube a tierra se observa en agosto-septiembre para ambos años. Se ve un aumento significativo en la frecuencia durante mayo 2005 lo cual podemos relacionar con la distribución en la figura 4.1.E correspondiente a mayo, y el inicio temprano de las lluvias. Sin embargo, en 2005 hay una disminución entre el 5 y 10% de la frecuencia durante los meses más lluviosos (agosto-septiembre) con respecto a 2004. Según los reportes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la temporada de ciclones tropicales para el 2004 tres sistemas tropicales impactaron directamente sobre México, mientras que en el 2005 impactaron 7 por el Océano Atlántico y uno por el Océano Pacífico.

La precipitación sobre tierra es frecuentemente resultado de la convección forzada por la orografía, con influencia de tormentas tropicales que penetran a tierra. Las regiones meridionales de México se ven influenciadas por la convección asociada a la ITCZ (Zona de Convergencia Intertropical).

#### 4.1.2 Región 2

En este estudio se observó que la convección sobre regiones oceánicas tiene gran actividad de descargas eléctricas, mostrando variación en algunos de los meses analizados para la región Caribe. En los primeros meses - enero (Figura 4.1A), febrero (Figura 4.1B) y marzo (Figura 4.1C) - la actividad de las descargas es casi nula en esta región, aumentando a partir de abril (Figura 4.1D). En mayo (Figura 4.1E) del 2005 se observa una densidad de descargas considerable, lo cual tiene una posible relación con la actividad eléctrica presentada sobre la Península de Yucatán en las gráficas anteriores, así como con el inicio temprano de la actividad ciclónica.

La temporada de ciclones tropicales en el 2004 empezó en agosto, por lo cual, para los meses de mayo (Figura 4.1E), junio (Figura 4.1F) y julio (Figura 4.1G) la actividad osciló alrededor del 13% únicamente del total anual. Por otra parte, para estos mismos meses, en el 2005 se observa una mayor densidad de descargas (42%), dado que ya se había iniciado la temporada con la presencia de dos fenómenos tropicales. Uno de ellos, la tormenta tropical Arlene, con una mayor aportación en cuanto a lluvia y, por consiguiente, densidad de descargas para junio, lo cual se aprecia claramente en la Figura 4.1F correspondiente a junio 2005.

Aunque en julio (Figura 4.1G) de 2005 se presentaron tres huracanes (Cindy, Dennis y Emily) que afectaron la región, el número de descargas observado no es tan elevado como el de junio, que fue solo el 5%. En agosto (Figura 4.1H) de 2004 se presentó el huracán Charly, lo cual puede justificar que el número de descargas sea mayor que en agosto de 2005, durante el cual no se observó ningún sistema tropical en la región Caribe.

En septiembre (Figura 4.1I) se observa una mayor actividad en el 2004 que en el 2005, dado que se presentó el huracán Iván en 2004, con una larga vida (22 días). En octubre (Figura 4.1J) se observa una distribución amplia, teniendo mayor número de descargas en el 2005, cuando esta región fue afectada por los huracanes Stan, Wilma y Beta, así como la tormenta tropical Alpha. En el

mes de noviembre (Figura 4.1K) no se presentó ningún ciclón tropical en esta zona, aunque todavía se observa actividad eléctrica asociada a convección; sin embargo, ya para diciembre (Figura 4.1L) la actividad es mínima.

En la figura 4.3 podemos observar que sobre el sector Caribe se presenta solo un pico en el mes de septiembre en la distribución de frecuencias durante 2004, mientras que en el 2005 hubo un aumento perceptible de actividad en mayo – junio y un cambio en el máximo de la distribución al mes de octubre. Aquí podemos plantear la hipótesis que esta distribución en la frecuencia esta ligada directamente a la actividad de tormentas tropicales, como se describió en las graficas de la figura 4.1.

El número total de descargas en el 2005 fue de 150,857, casi el doble que en el 2004 que fue de 76,668, aunque la variación mensual en porcentaje es muy similar, salvo junio 2005 y septiembre 2004, como ya se indicó.

#### **4.1.3 Región 3**

Esta es una región que se ve afectada por descargas a lo largo del año. Se encontró una amplia concentración de descargas eléctricas en la zona adyacente al sur de Veracruz, Tabasco y Campeche, relacionada con el período en que se presentó la actividad ciclónica de 2004 reportada por el SMN de julio a noviembre. Durante los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y abril (Figura 4.1 J, A, B, C, D) la actividad de descargas eléctricas estaría asociada al paso de frentes fríos.

Para el año 2005, igual que en el 2004 los meses de diciembre a abril pudieran asociarse a frentes fríos. El aumento del número de descargas en mayo (Figura 4.1E) se asocia a la actividad que se presentó en la región de la Republica Mexicana, asociada al inicio temprano de las lluvias sobre el continente en dicho año. Ya para junio la tormenta tropical "Bret" tocó tierra, afectando el litoral del Golfo de México como se ve en la figura correspondiente a este mes.

En julio (Figura 4.1G) se presentó la depresión tropical "Cindy", afectando la parte norte de Quintana Roo (figura 4.5.G); poco tiempo después se presentó el huracán "Emily" y, finalmente para este mes, la tormenta tropical "Gert". Todos estos sistemas contribuyeron a incrementar la cantidad de descargas presentadas en esta región, con una mayor frecuencia registrada frente a las costas del sur de Veracruz, Tabasco y Campeche.

En agosto (Figura 4.1H) la tormenta tropical "José" tocó tierra a finales de agosto con lluvias considerables sobre el estado de Veracruz, lo cual se correlaciona con las observaciones generalizadas de descargas en casi todo el dominio. Sin embargo para septiembre (Figura 4.1I) vemos que la mayor concentración de descargas se presenta frente a las costas de Quintana Roo, Campeche y sur de Veracruz.

La actividad de descargas para el mes de octubre (Figura 4.1J) es mínima, lo cual es extraño, ya que el huracán "Stan" tocó la costa de Quintana Roo, como tormenta tropical y, Después de cruzar la Península de Yucatán, siguió su trayectoria sobre el Golfo de México. En este mismo mes se presentó uno de los huracanes más intensos de la temporada (Wilma), y aunque su trayectoria recurvó hacia el noreste, dejó mucha precipitación en la zona.

En la figura 4.4 podemos ver la distribución de frecuencia en la región del Golfo de México que es muy diferente en el 2005 que en el 2004. Marzo y mayo de 2005 tienen un aumento considerable en la frecuencia, y de hecho mayo 2005 presenta el máximo en la distribución, lo cual se relaciona con el aumento en la frecuencia sobre la parte continental de México (Figura 4.1). La precipitación en este sector tiene una componente de latitudes medias durante los meses de invierno, con convección asociada a sistemas frontales. Mientras que la convección de primavera es también asociada con frentes pero también con sistemas de mesoescala desarrollada en los estados del sureste.

#### 4.1.4 Región 4

En esta región podemos ver que, para los meses de diciembre a mayo (Figura 4.1L, A, B, C, D, E), en ninguno de los dos años estudiados hubo actividad eléctrica.

El mayor número de descargas eléctricas se presenta en los meses en los que climatológicamente ocurre la estación de lluvias, principalmente en los meses de agosto a septiembre (Figura 4.1H, I) frente a las costas de Sinaloa y Nayarit. El patrón espacial sobre el mar es muy similar en los dos años, a diferencia de las otras zonas oceánicas ya mencionadas. Las descargas se observan sólo en zonas próximas a la costa en estas latitudes, lo cual implica que hay una relación con la convección desarrollada en tierra.

En la figura 4.5, la distribución de frecuencias en la región del Pacífico Norte es bastante angosta y con un pico bien definido en agosto 2004 y septiembre 2005. Aunque las distribuciones son muy similares en los dos años, el número total de descargas eléctricas a tierra disminuyó de un año a otro en un 83%. La precipitación en esta región se asocia a la presencia del Monzón de Norteamérica.

#### 4.1.5 Región 5

En esta región se puede ver que en toda la línea de costa encontramos valores altos de descargas, sugiriendo una influencia del forzamiento orográfico en la actividad convectiva sobre el mar adyacente al territorio mexicano. Cabe resaltar que el Golfo de Tehuantepec es la zona dentro de esta región que presenta mayor número de descargas.

La actividad para los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y abril (Figura 4.1L, A, B, C, D) en ambos años es mínima. Ya para el mes de mayo (Figura 4.1E) vemos mayor presencia de descargas eléctricas en 2005, lo que puede estar asociado a la presencia del huracán "Adrian" que se desarrolló frente a las costas de Belice y Guatemala, pudiendo afectar a esta región. Asimismo, la

distribución de descargas sobre esta región marina pudiera estar ligada con lo presentado en este mismo mes sobre el territorio continental de México. Se observa que la actividad más intensa se presenta más lejos de la costa, contrario a lo que pasa en la región del Pacífico Norte. Es posible en este caso que la mayor influencia esté dada por la zona de convergencia intertropical, en lugar de estar relacionada con convección sobre tierra.

Ya para la temporada de ciclones tropicales en el Océano Pacífico, en el mes de junio (Figura 4.1F) de 2004 no se presentó ningún sistema que pudiera estar relacionado. Sin embargo, en el 2005 las tormentas tropicales "Calvin" y "Dora" registraron la mayor concentración de descargas comparada con la de 2004. La distribución para julio (Figura 4.1G) es parecida, con una disminución en 2005.

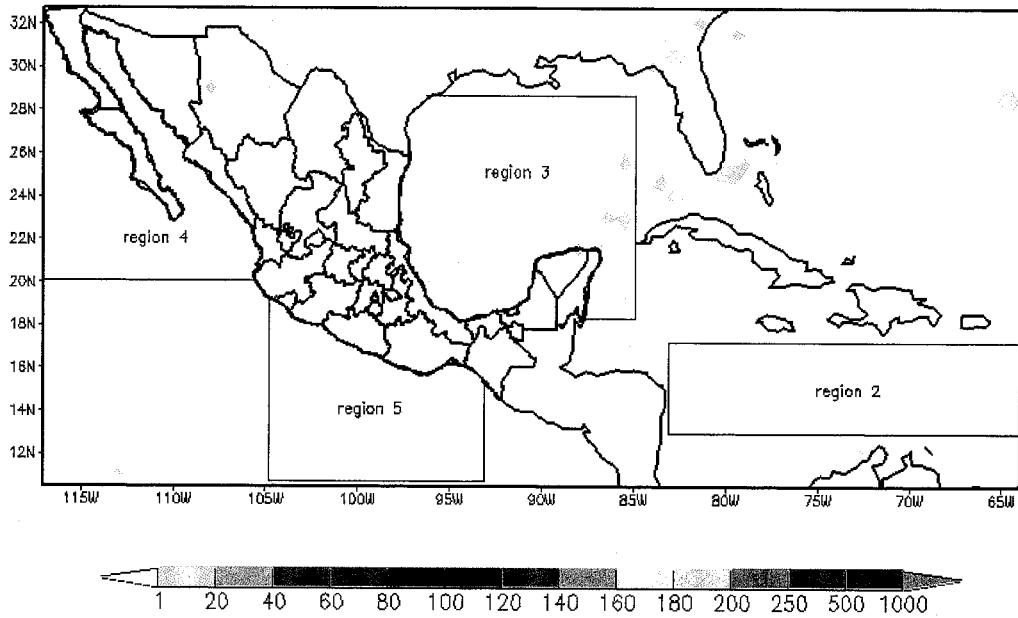
En agosto (Figura 4.1H) de 2004 vemos que fue mucho mayor la densidad de descargas que en 2005. En este mes hubo varios sistemas tropicales que pasaron alejados de la zona de estudio, pero que pudieron haber influenciado la distribución de descargas. Es interesante notar que en este mes (para ambos años) se puede relacionar lo que se observa en esta zona con lo que ocurre en la región del Pacífico Norte (4.1H). Se observa un máximo en la densidad de descargas a lo largo de la costa, que parece tener origen en la zona del Pacífico Sur y propagarse hacia el norte a medida que avanza el verano. En el mes de septiembre (Figura 4.1I) se observó además la presencia de los huracanes "Howard" y "Javier" en el 2004, lo cual generó grandes cantidades de lluvia y, por consiguiente, descargas eléctricas.

En octubre (Figura 4.1J) de 2004 la tormenta tropical "Lester" pasó muy cerca de la línea de la costa, frente a Oaxaca y Guerrero, con el consiguiente incremento en la distribución espacial de descargas. Sin embargo, en el 2005 la máxima actividad de descargas se presenta frente a las costas de Guerrero, relacionada con el huracán "Otis" que se presentó a finales de septiembre y principios de octubre en esa región. Hacia el fin del año las descargas son mínimas en este sector.

En la figura 4.6 la frecuencia de descargas presenta una distribución mucho más ancha en ambos años que en el sector Pacífico Norte. Además el patrón dentro de la estación de lluvias es diferente en ambos años. Durante el 2004, el patrón indica el inicio de la precipitación convectiva en junio (lo cual coincide con el inicio climatológico de las lluvias), con el pico observado durante agosto. En contraste en 2005, hay una alta incidencia de acontecimientos en mayo, con posible relación con lo ocurrido en la parte continental para el mismo mes, con una disminución en julio respecto del año anterior. La precipitación convectiva en esta región se asocia al paso de las ondas del este y al desarrollo de tormentas tropicales, como en el caso de la región del Caribe. Durante los meses de diciembre, enero y febrero no se observa (casi nula) actividad en ninguno de los dos años, al igual que en las otras zonas oceánicas presentadas.

A)

### Descargas Electricas JAN 2004



### Descargas Electricas JAN 2005

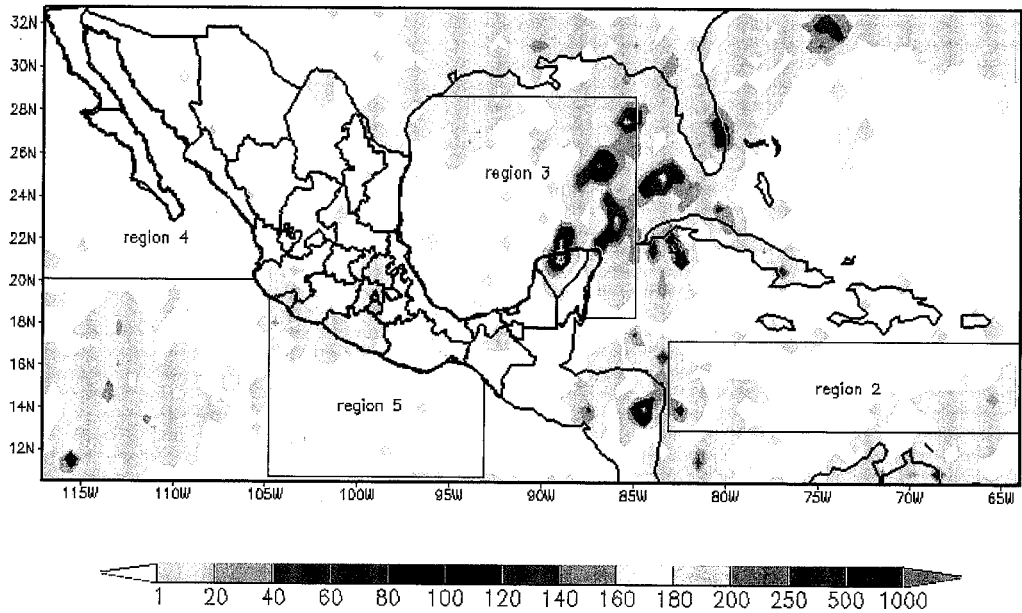
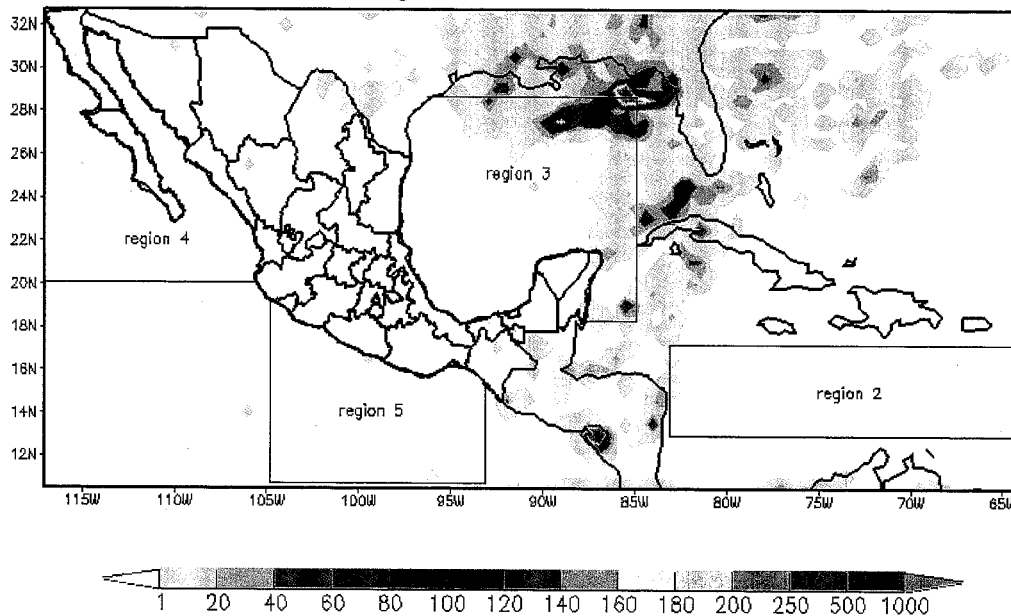


Figura 4.1 Descargas eléctricas para las cinco regiones de estudio en 2004 y 2005: A) enero



B)

### Descargas Electricas FEB 2004



### Descargas Electricas FEB 2005

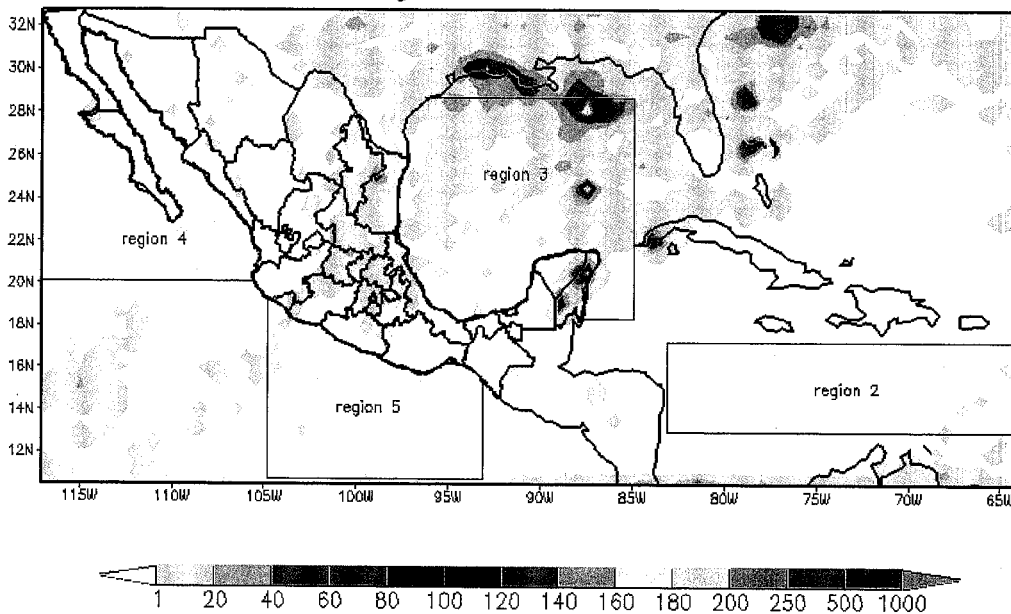
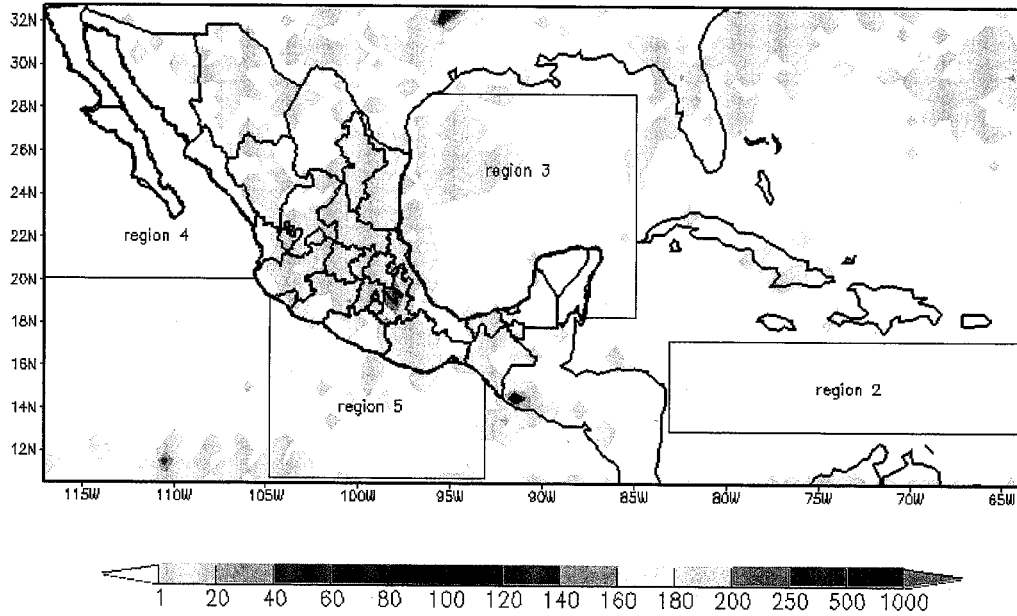


Figura 4.1 continuación: B) febrero.

c)

### Descargas Electricas MAR 2004



### Descargas Electricas MAR 2005

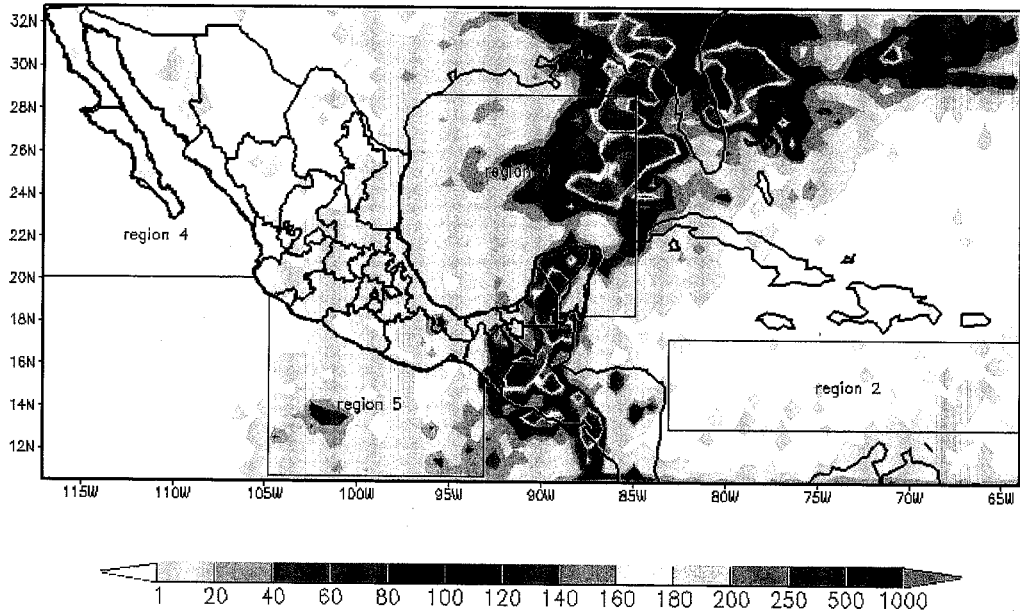
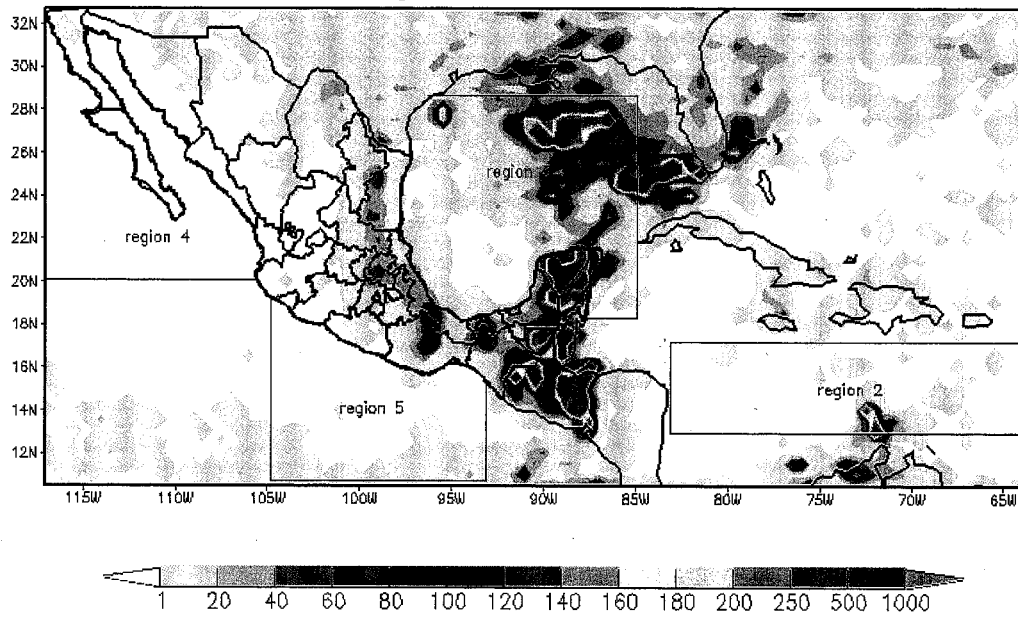


Figura 4.1 continuación: C) marzo.

D)

### Descargas Electricas APR 2004



### Descargas Electricas APR 2005

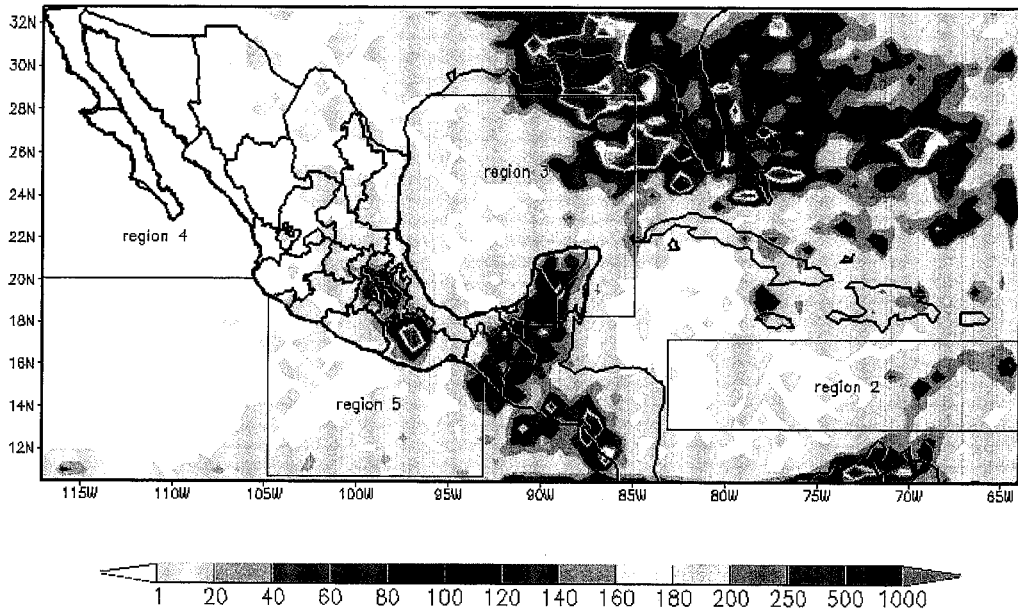
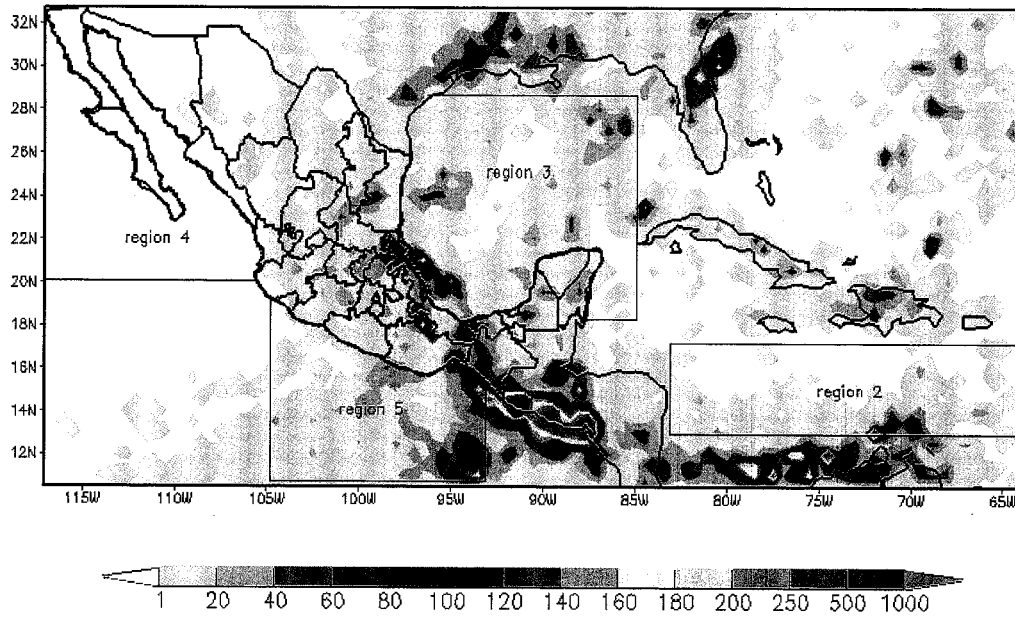


Figura 4.1 continuación: D) abril.

E)

### Descargas Electricas MAY 2004



### Descargas Electricas MAY 2005

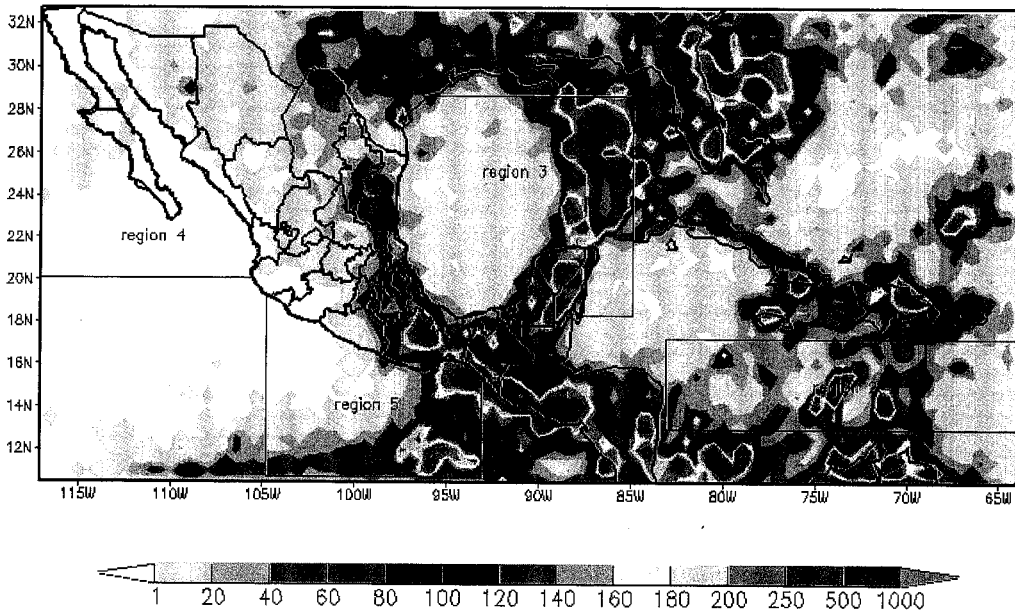
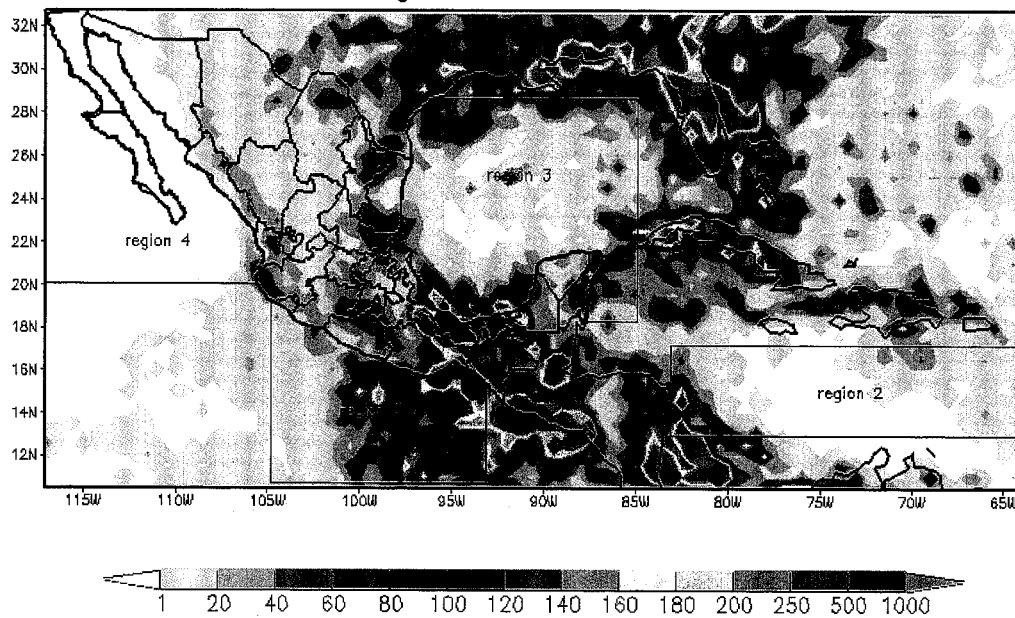


Figura 4.1 continuación: E) mayo.

F)

### Descargas Electricas JUN 2004



### Descargas Electricas JUN 2005

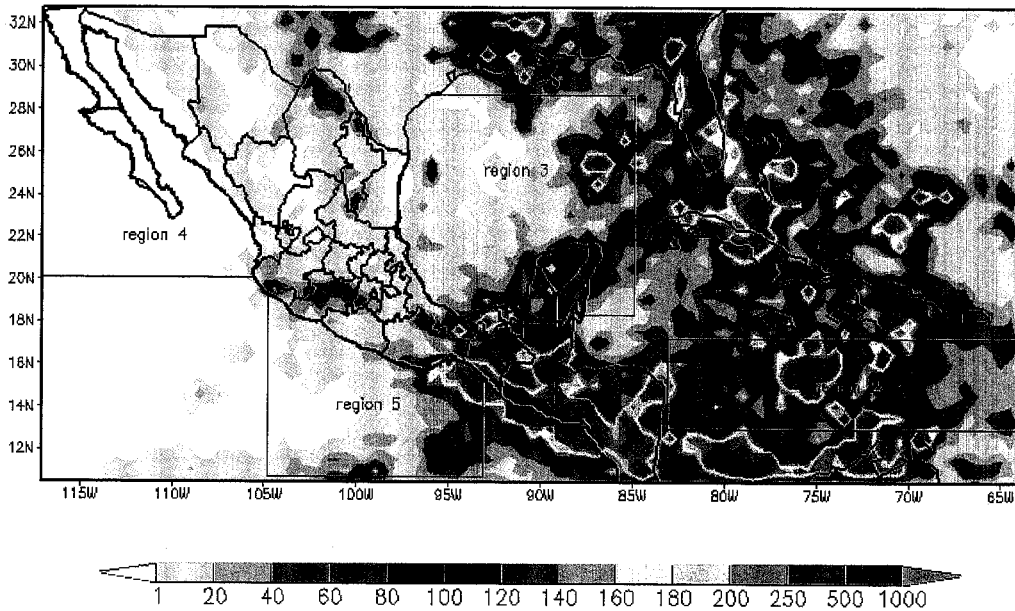
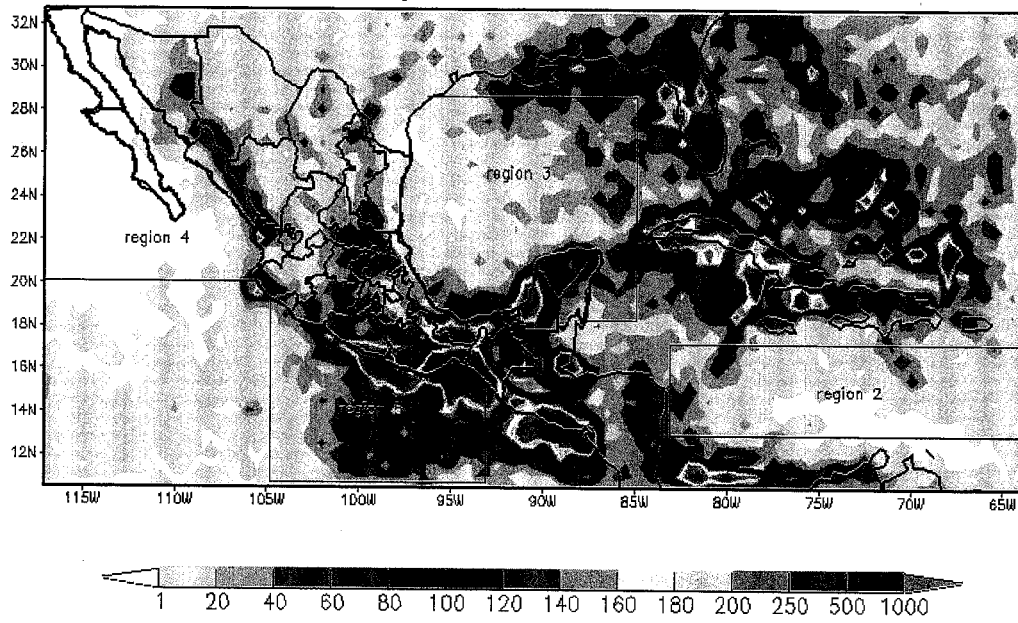


Figura 4.1 continuación: F) junio.

G)

### Descargas Electricas JUL 2004



### Descargas Electricas JUL 2005

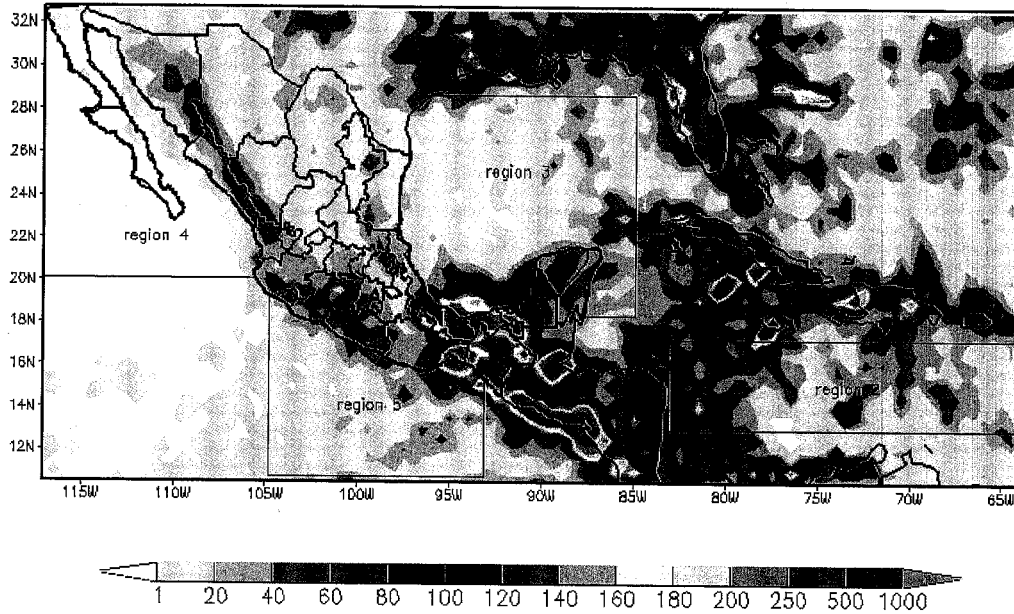
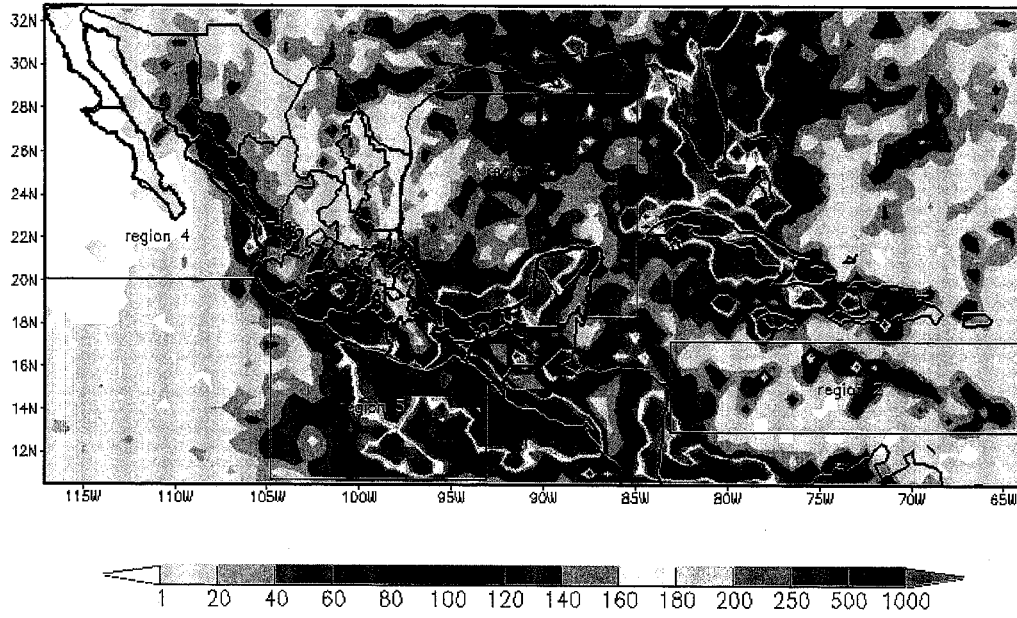


Figura 4.1 continuación: G) julio

H)

Descargas Electricas AUG 2004



Descargas Electricas AUG 2005

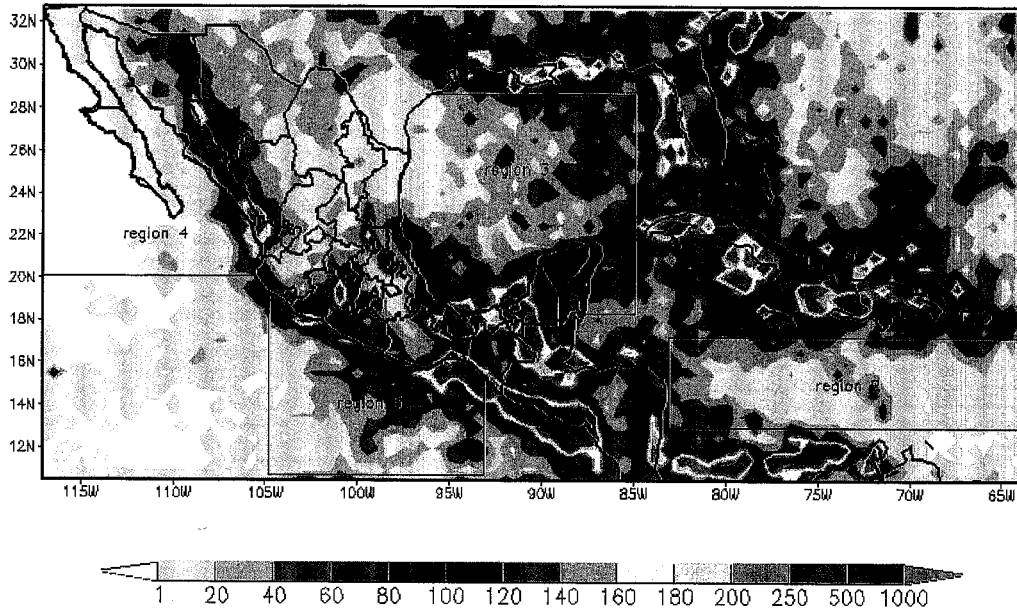
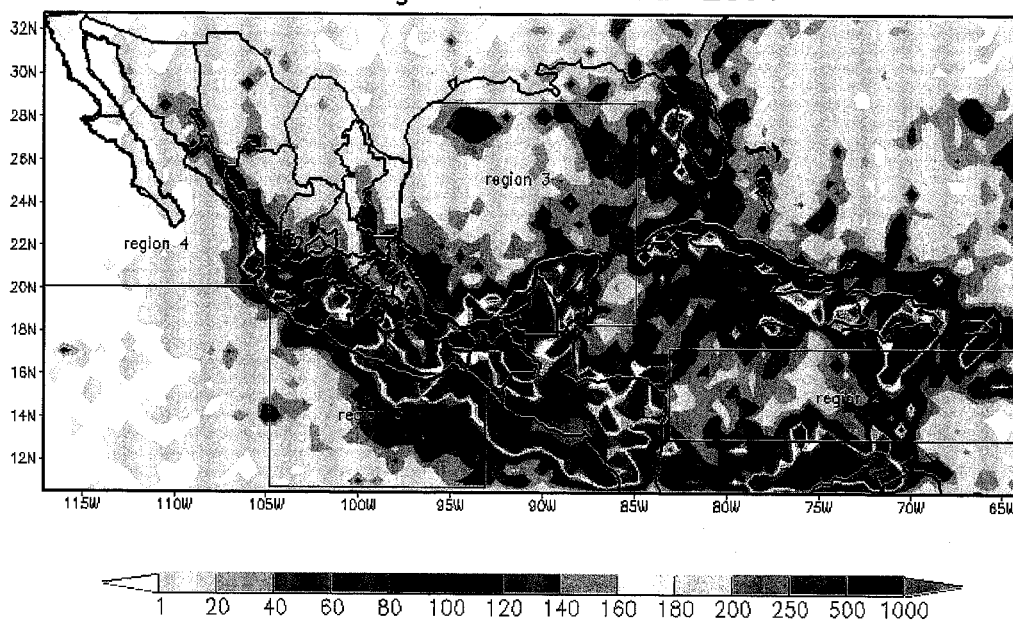


Figura 4.1 continuación: H) agosto

I)

### Descargas Electricas SEP 2004



### Descargas Electricas SEP 2005

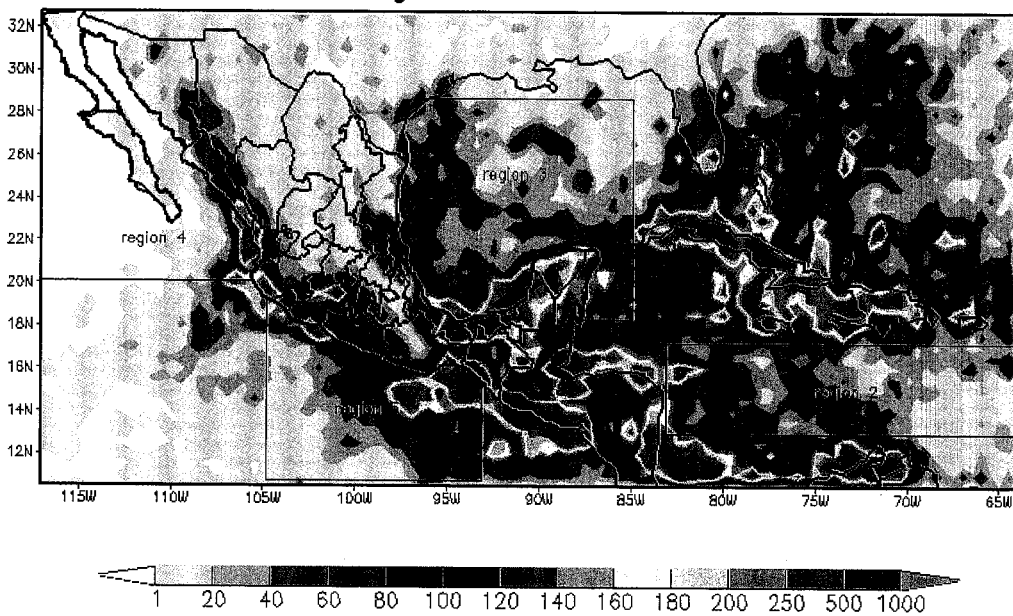
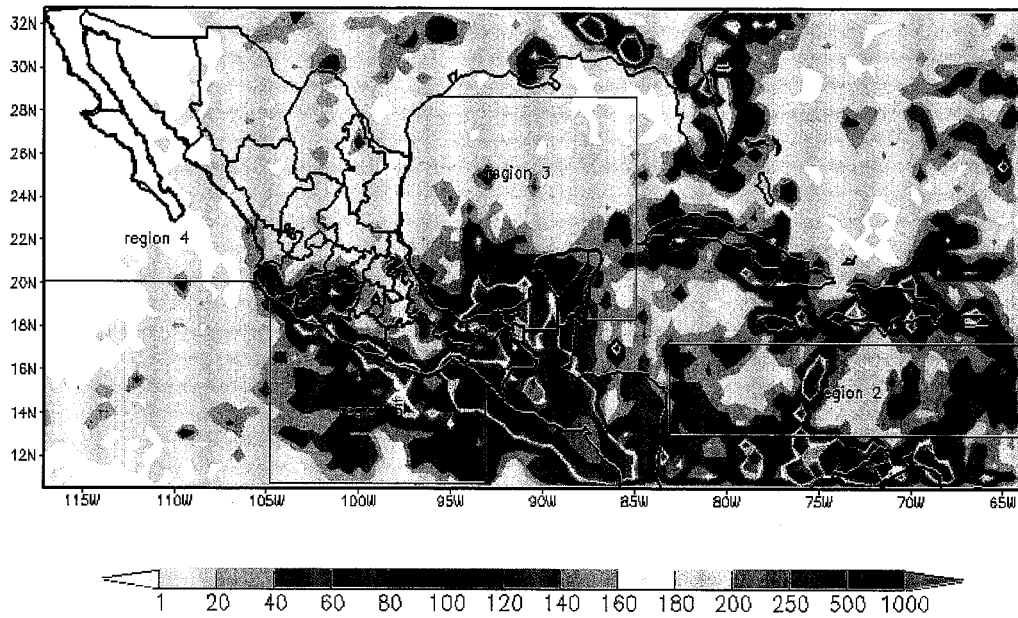


Figura 4.1 continuación: I) septiembre.



J)

### Descargas Electricas OCT 2004



### Descargas Electricas OCT 2005

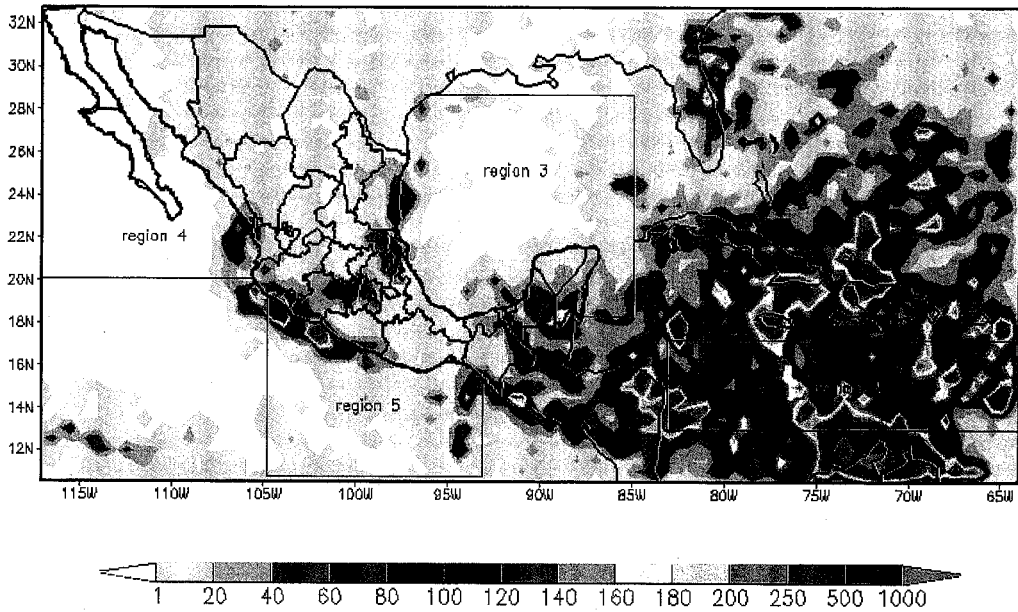
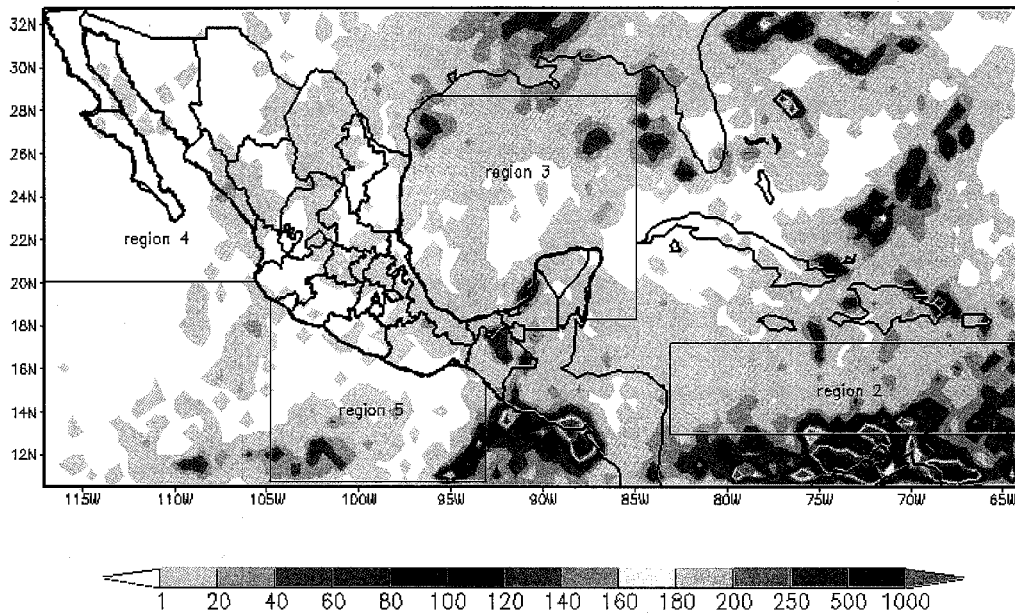


Figura 4.1 continuación: J) octubre.

K)

### Descargas Electricas NOV 2004



### Descargas Electricas NOV 2005

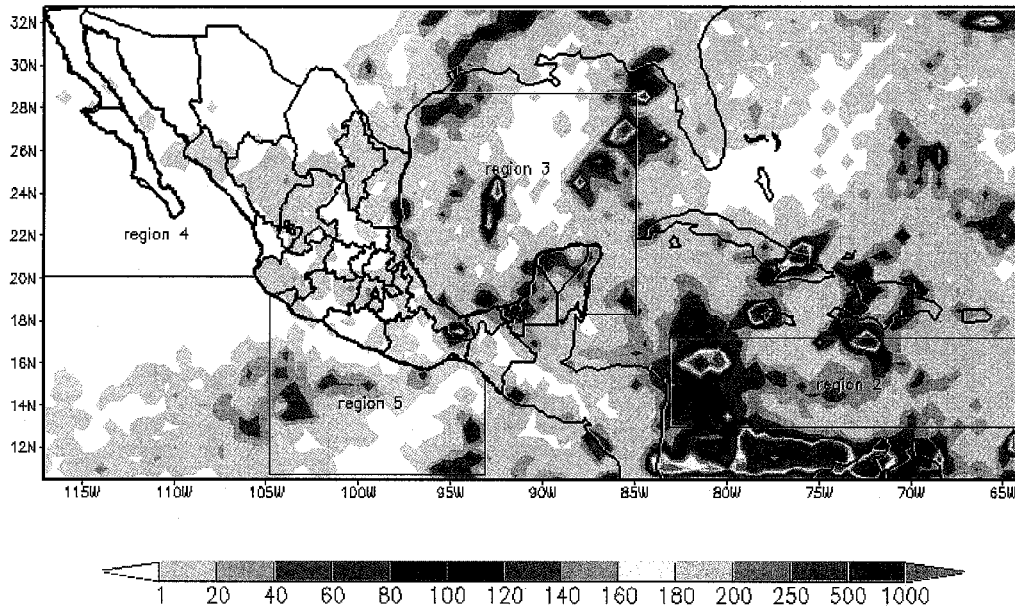
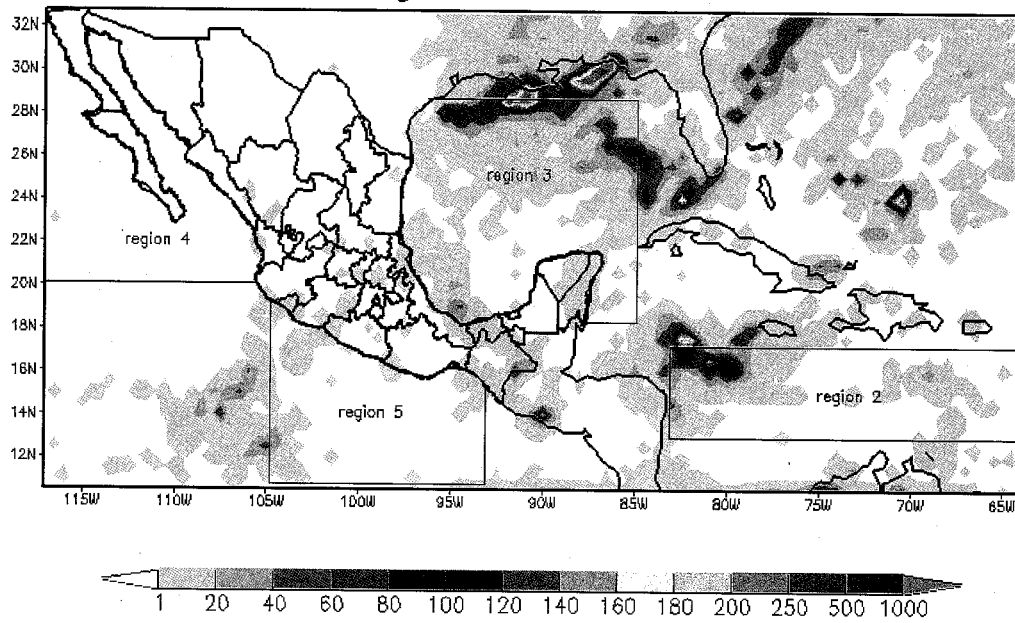


Figura 4.1 continuación: K) noviembre.

L)

### Descargas Electricas DEC 2004



### Descargas Electricas DEC 2005

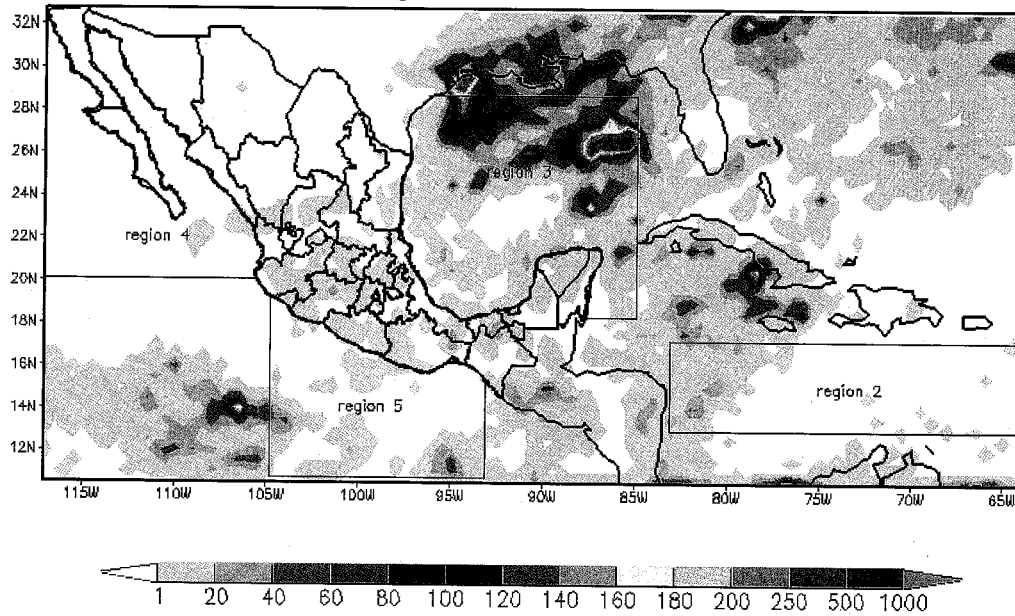


Figura 4.1 continuación: L) diciembre.

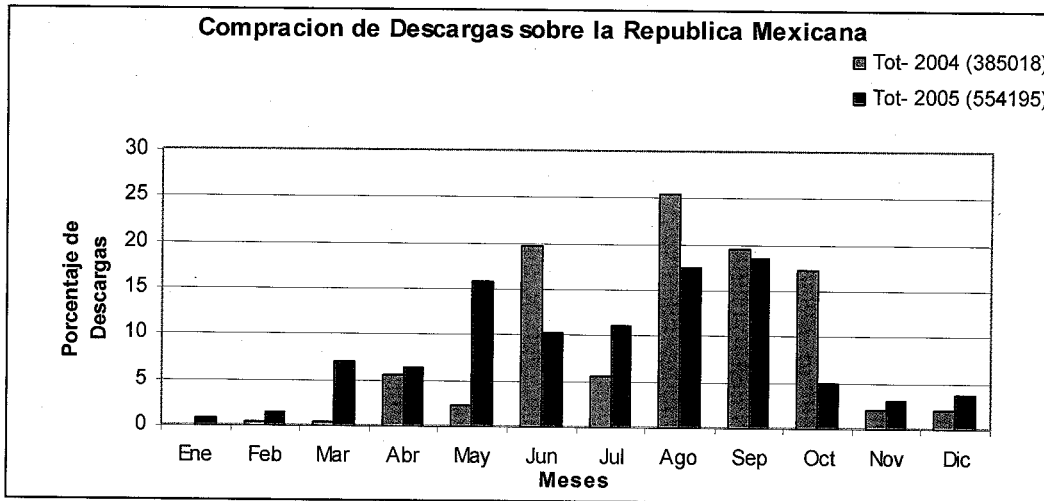


Figura 4.2 Variación mensual de descargas eléctricas para la región 1, con un total para 2004 de 385,018 y para 2005 de 554,195.

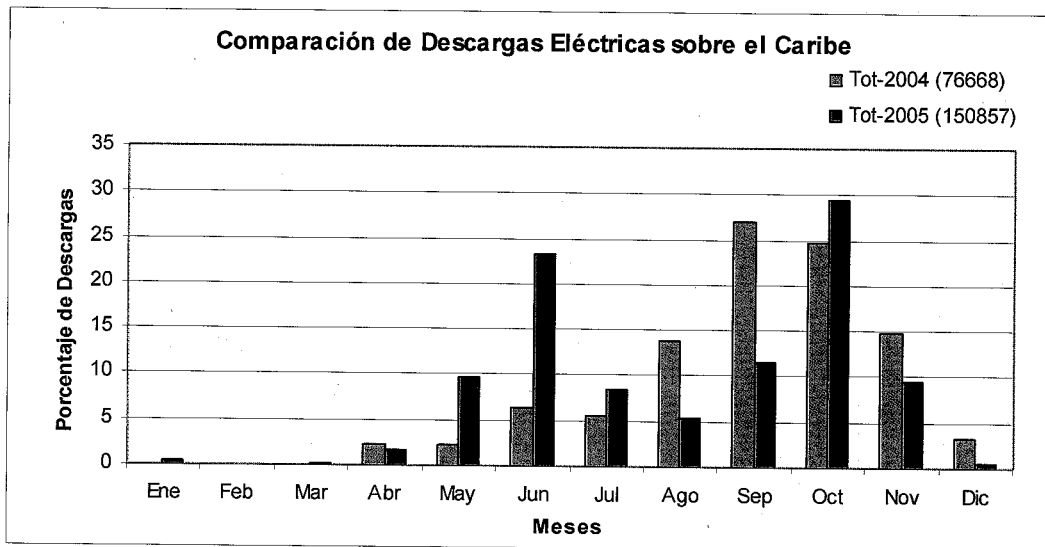


Figura 4.3 Variación mensual de descargas eléctricas para la región 2, con un total de para 2004 de 76,668 y para 2005 de 150,857.

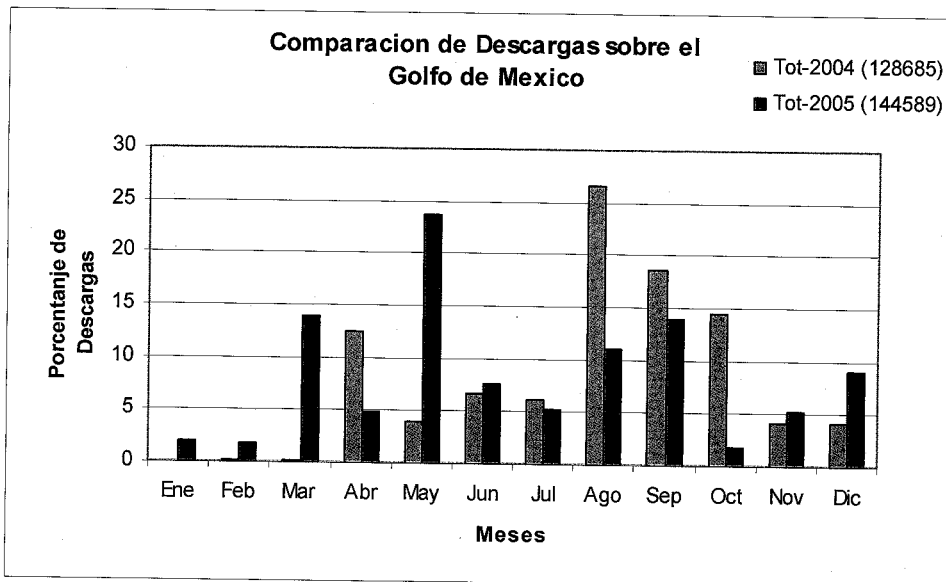


Figura 4.4 Variación mensual de descargas eléctricas para la región 3, con un total de descargas en 2004 de 128,685 y para 2005 de 144,589.

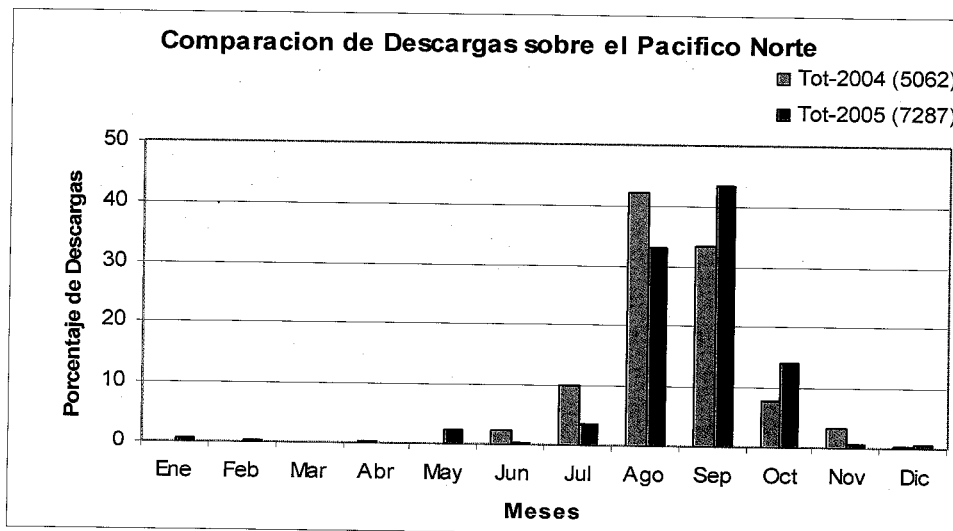


Figura 4.5 Variación mensual de descargas eléctricas para la región 4, con un total en 2004 de 5,062 y para 2005 de 7,287.

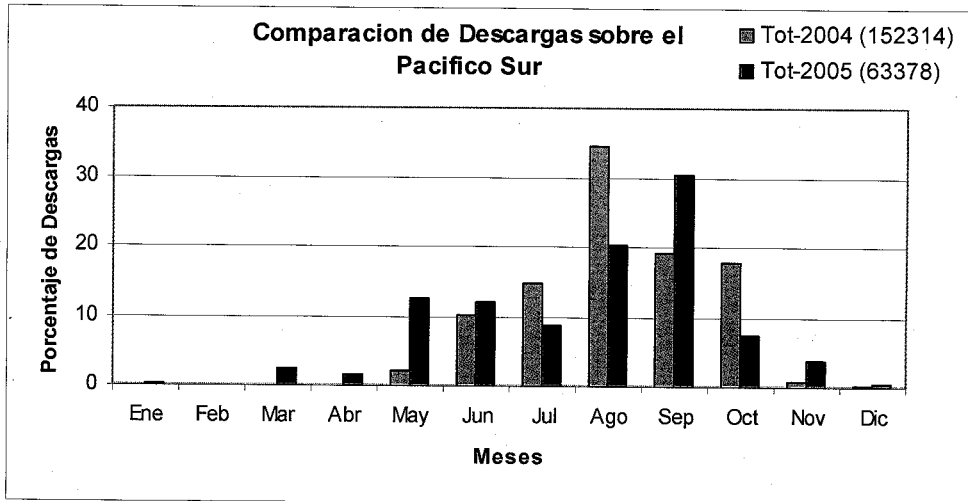


Figura 4.6 Variación mensual de descargas eléctricas para la región 5 con un total en 2004 de 152,314 y para 2005 de 63,378.

## 4.2 Variación espacial para las cinco regiones

En esta sección se sintetiza la variación espacial de las cinco regiones de estudio. Se ha calculado la concentración (densidad) de descargas por unidad de área, para facilitar la comparación.

En las gráficas de la Figura 4.7 se puede apreciar que, efectivamente, al unir todas las regiones, existe continuidad en la distribución espacial entre ellas. Se ve que en los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril, cuando para todas las regiones se observa poca actividad en las secciones anteriores, aquí se puede comprobar teniendo densidades muy bajas y comprobar lo que mencionábamos de la posibilidad de que tuviera que ver con los sistemas frontales.

Un caso muy particular puede ser mayo de 2005, cuando se conjuntan tanto lo ocurrido en el Territorio Continental de México como en el Pacífico Sur y el Golfo de México, dando una señal a ese inicio tan temprano de las lluvias.

Para los meses de julio, agosto y septiembre de ambos años, vemos esa conectividad con lo que sucede en los océanos ya conjuntados y en la parte continental. Por último se puede mencionar que el Caribe en 2005 es muy constante en toda su región.

La densidad de las descargas eléctricas de nube a tierra por unidad de área son el resultado de multiplicar las mediciones de éstas por un factor arbitrario constante de 1.4, cuyo valor viene de la eficiencia de detección del sistema, que es 70% e igual para otros sistemas de detección de descargas eléctricas (Orville, 1994, con NLDN en Estados Unidos; Finke y Hauf, 1996 con LPATS en Alemania; Pinto et al. 1999, con LPATS en Brasil; Rivas et al. 2001 con 13 sensores en la Península Ibérica). Los resultados considerando las cinco zonas fueron de 7.4 descargas por  $\text{km}^2$  por año para 2004 y de 8.6 para 2005. Comparando con resultados reportados en otras regiones del mundo, las cuales son únicamente descargas sobre tierra, tenemos que: para Florida, Hodanish et al. (1997) reportaron 12 descargas por  $\text{km}^2$  por año; Orville y Silver

(1997), 11 a 13 para Estados Unidos; Pinto et al. (1999), 15.5 para Brasil en 1993; Yair et al. (1998), 11.6 en Tel Aviv; y Rivas et al. (2001), 3.3 en la Península Ibérica.

Una vez obtenido el resultado que abarcaba las cinco regiones. Se decidió hacerlo para cada una de éstas por separado, ya que a cada una le afectan sistemas meteorológicos diferentes a lo largo del año. Esto se puede apreciar en los resultados presentados en la Tabla 4.1, donde una vez más se puede confirmar lo que presentamos en las secciones anteriores de este capítulo. Se aprecia, por ejemplo, que la zona con menor densidad de descargas es el Pacífico Norte en ambos años y que la de mayor densidad es la parte continental de México.

Tabla 4.1 Valores de densidad de las descargas eléctricas por zona de estudio usando los totales anuales.

Área	2004 (km <sup>2</sup> por año)	2005 (km <sup>2</sup> por año)
República Mexicana	2.7	4.0
Golfo de México	1.5	1.7
Caribe	1.0	2.0
Pacífico Norte	< 0.1	< 0.1
Pacífico Sur	2.0	0.9

Sin embargo los valores presentados en la Tabla 4.1 pudieran no ser representativos para cualquier época del año, ya que en los meses de invierno se presentaron menos descargas eléctricas que en verano, por lo que no sería la misma densidad a lo largo del año. Por esta razón presentamos los valores de densidad por km<sup>2</sup> ahora dividiendo el año en dos periodos: uno de ellos abarca de mayo a octubre y el otro de noviembre a abril, a fin de ver si efectivamente existe o no esta relación con la época del año (Tabla 4.2).



Tabla 4.2 Valores de densidad (por km<sup>2</sup>) de las descargas eléctricas por zona de estudio usando dos periodos (mayo-octubre y noviembre-abril).

Zona	Periodo	2004	2005
RM	May-Oct	2,5	3,1
	Nov-Abr	0,3	0,9
CAR	May-Oct	0,8	1,8
	Nov-Abr	0,2	0,2
GOL	May-Oct	1,1	1,1
	Nov-Abr	0,4	0,6
PN	May-Oct	0,1	0,1
	Nov-Abr	<0,1	<0,1
PS	May-Oct	2,0	0,8
	Nov-Abr	<0,1	0,1

Los resultados en la Tabla 4.2 evidencian que la densidad para una zona no es la misma a lo largo del año ya que dependerá de los sistemas que la afecten. Resulta ser mayor ésta en los meses de mayo a octubre en las cinco zonas de estudio debido a que todas son afectadas por lluvias durante estos meses.

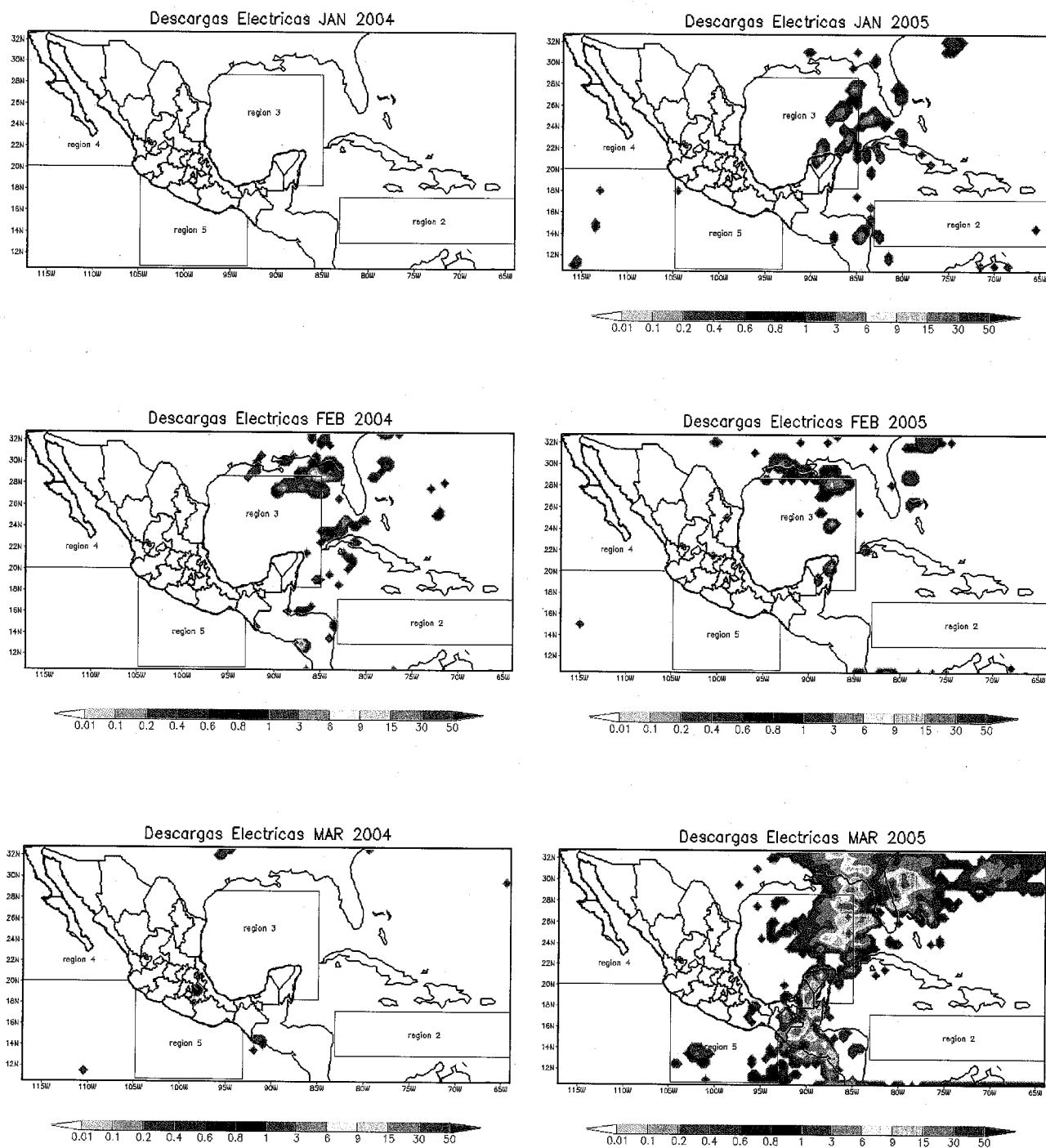


Figura 4.7 Densidad de la distribución de descargas eléctricas para los meses enero, febrero y marzo (2004 y 2005).

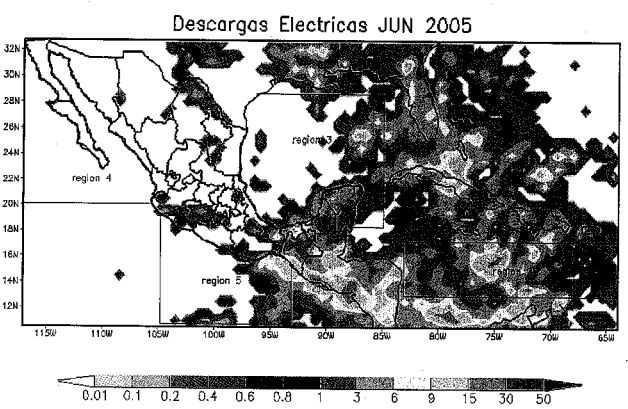
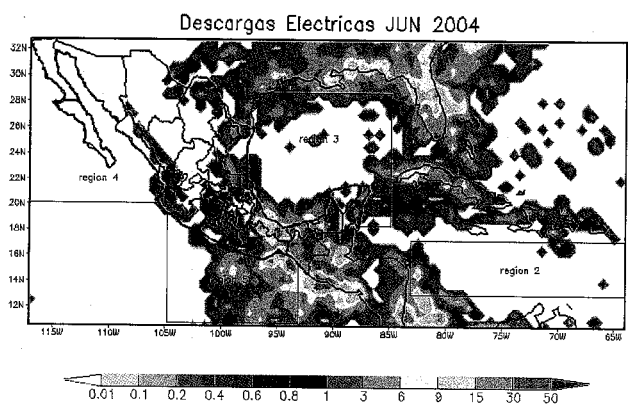
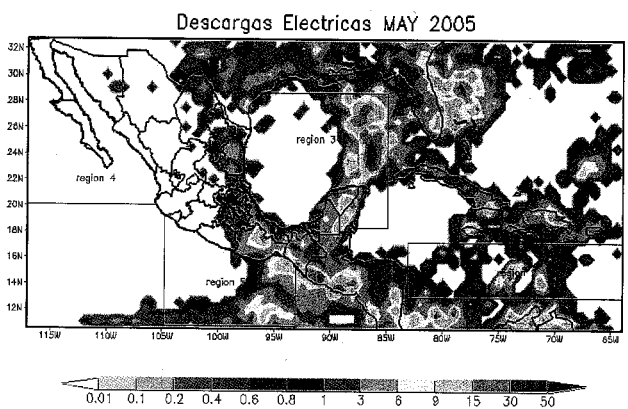
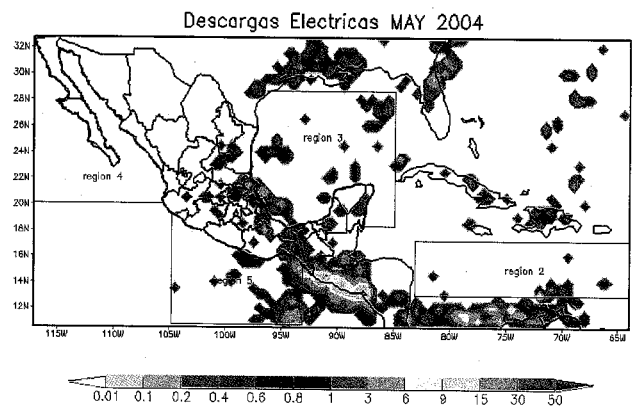
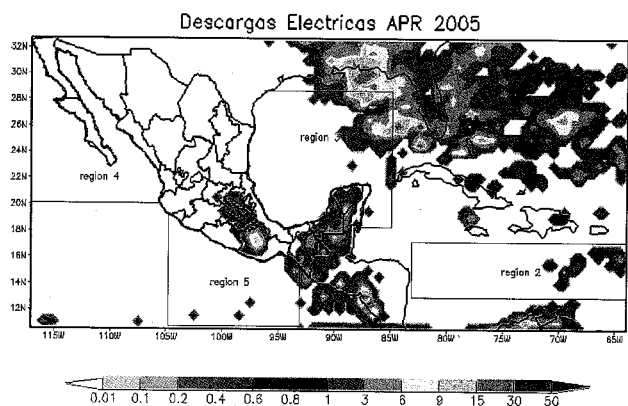
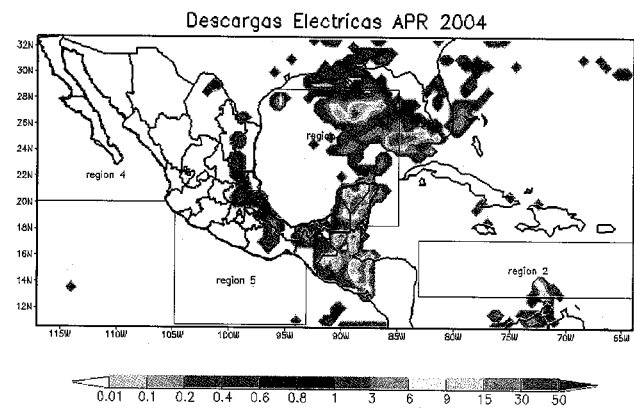


Figura 4.7 continuación para los meses abril, mayo y junio.

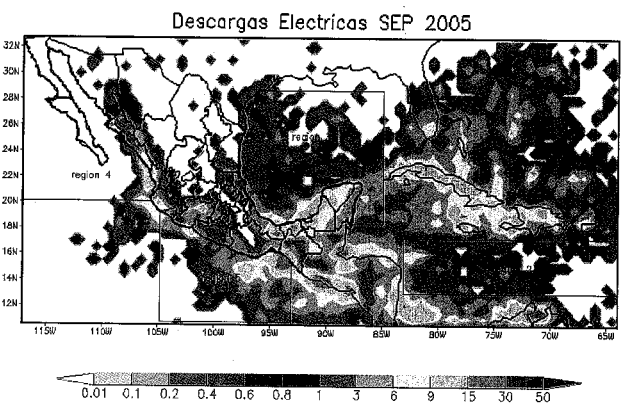
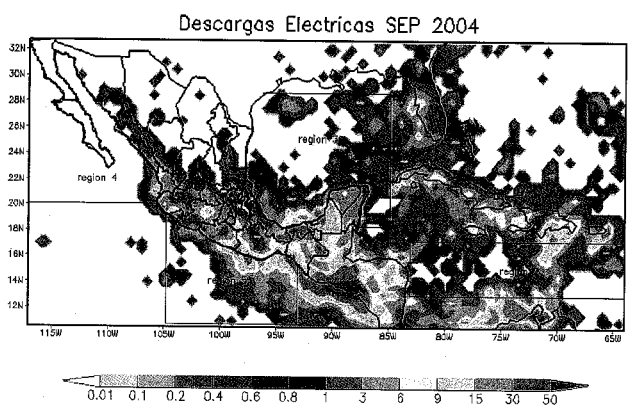
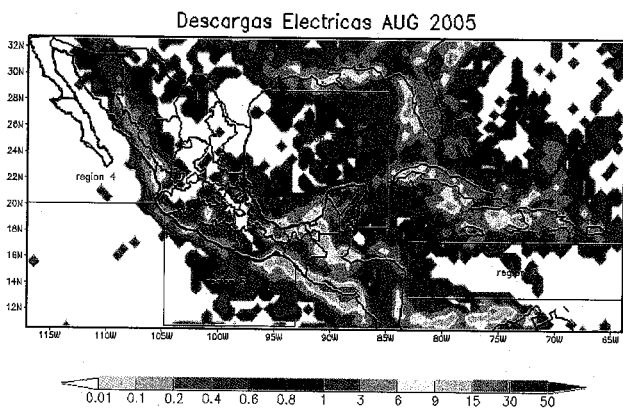
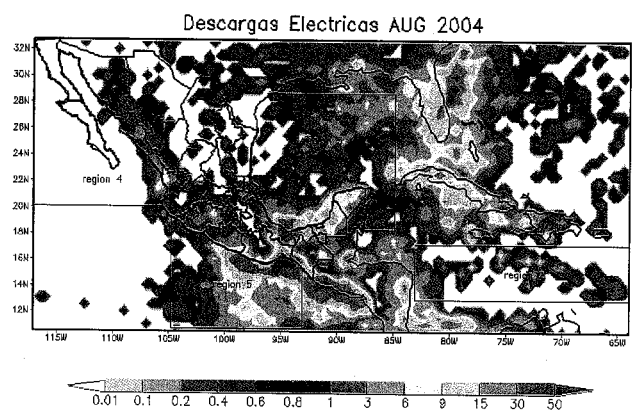
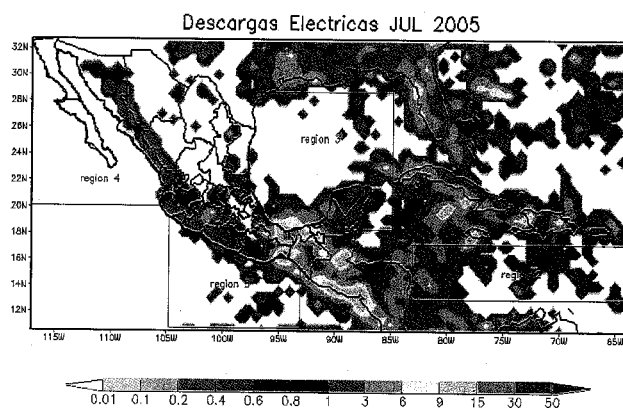
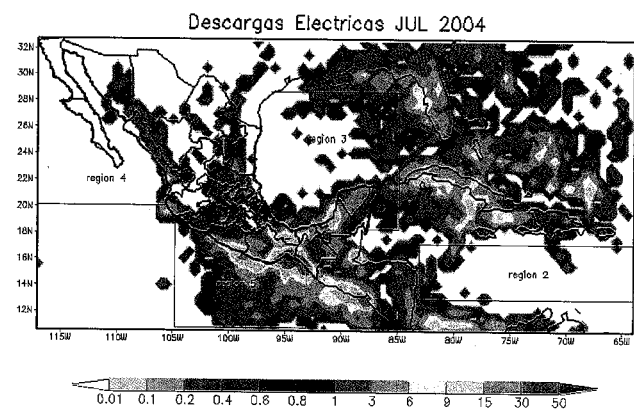


Figura 4.7 continuación para los meses julio, agosto y septiembre.

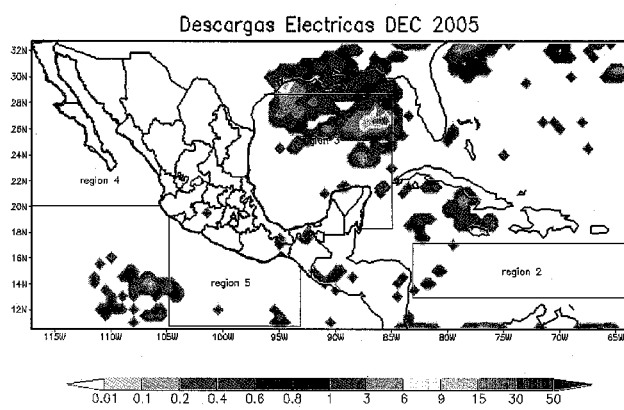
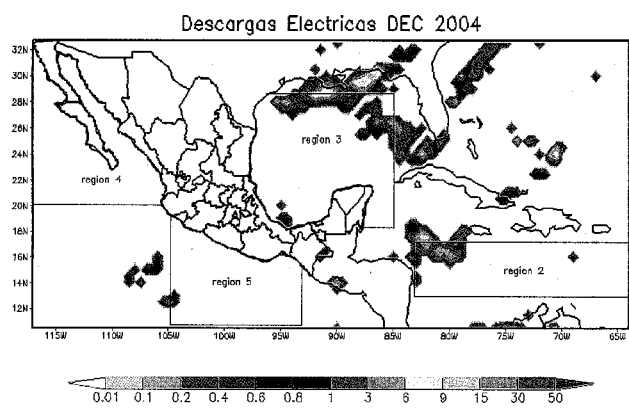
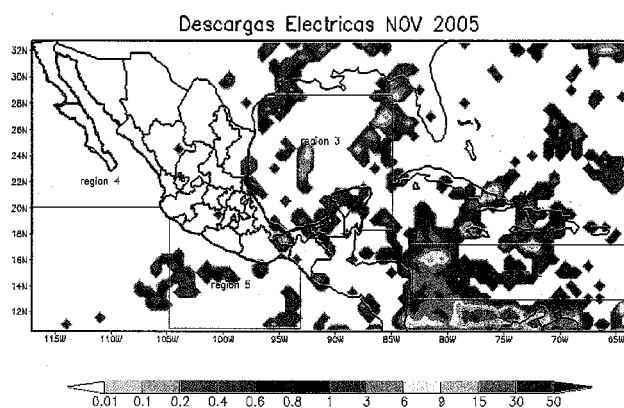
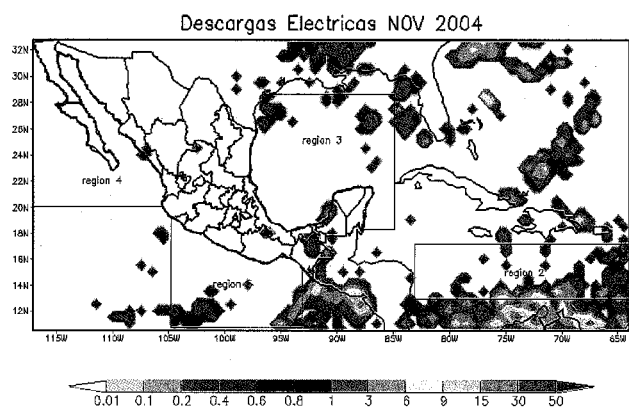
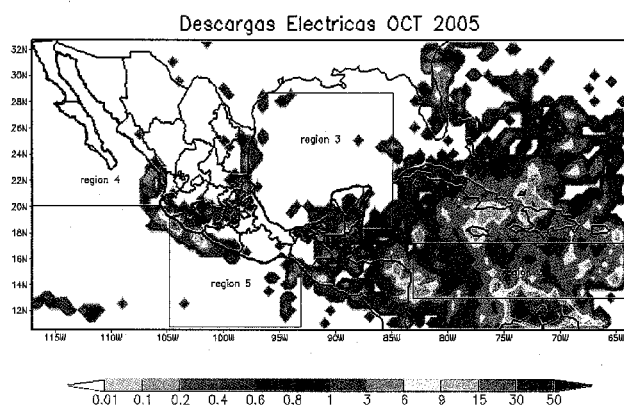
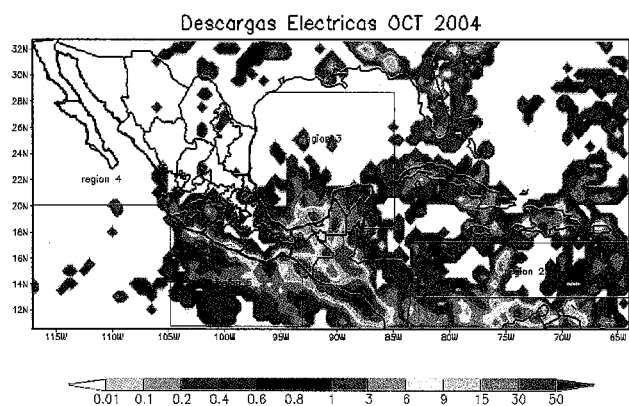
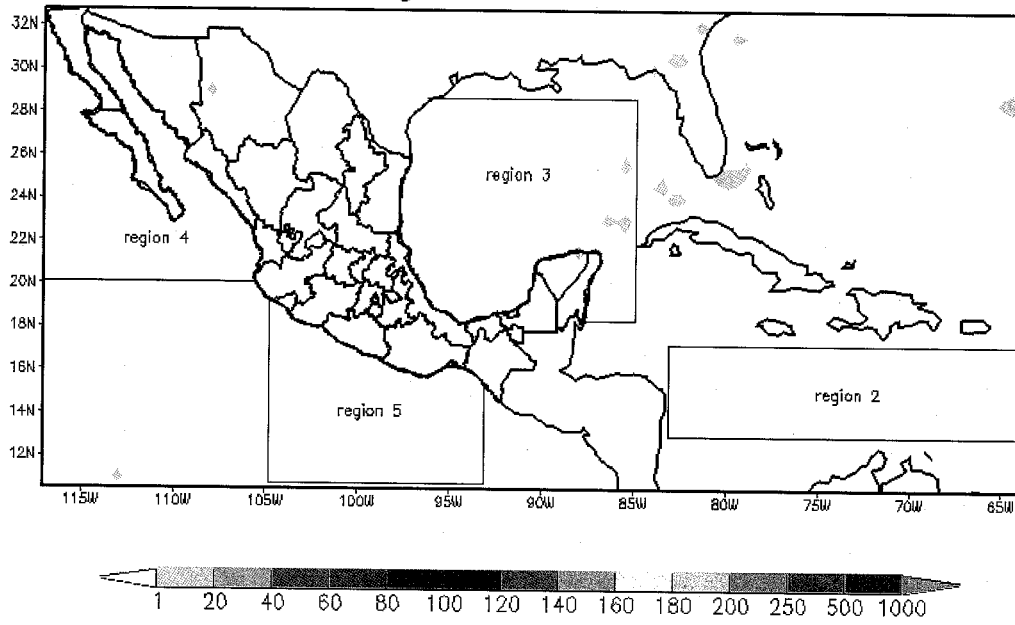


Figura 4.7 continuación para los meses octubre, noviembre y diciembre.

A)

### Descargas Electricas JAN 2004



### Descargas Electricas JAN 2005

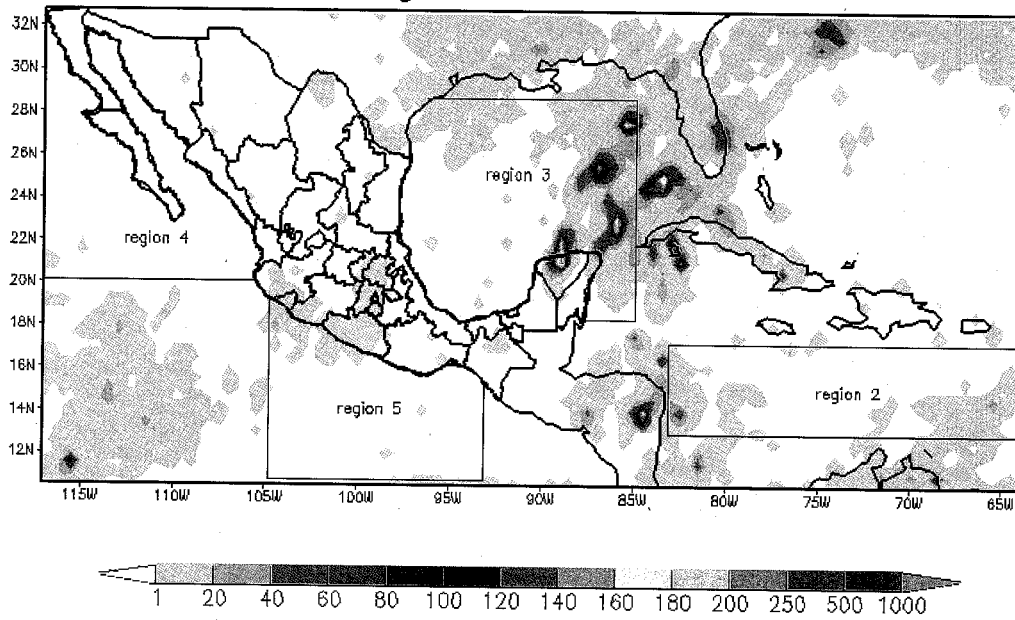


Figura 4.1 Descargas eléctricas para las cinco regiones de estudio en 2004 y 2005: A) enero

### 4.3 Variación Diurna

En este estudio, la variación diurna fue calculada promediando el número total de descargas en períodos de tres horas, utilizando los datos de ambos años. Los resultados se presentan en la Figura 4.8 para cada región. Los valores se acumulan cada tres horas (p. ej. 1, 2, 3) y el valor del número de descargas se asocia con la hora final del período promediado (p. ej. a las 3). En términos generales, la actividad en las descargas eléctricas presenta un máximo por la tarde 18:00 (hora local, LT) y un mínimo en las primeras horas de la mañana, mostrando similitud con otros autores (ver et al. [1994] en Arizona; Pinto et al. [1999] en Brazil y Rivas et al [2001] en la Península Ibérica.)

En la figura 4.8(a) podemos apreciar que la distribución de las descargas en función de la hora del día presenta sus niveles máximos (cerca del 30% del total de descargas presentadas en un día) a las 1800 LT, asociándose esto a las tormentas que se presentan en la región continental de México por la tarde, ocasionadas en su mayoría por forzamiento orográfico o bien por el paso de algún sistema tropical o frontal. De las 0300 a las 1200 LT, el porcentaje oscila entre el 5 y 7 %.

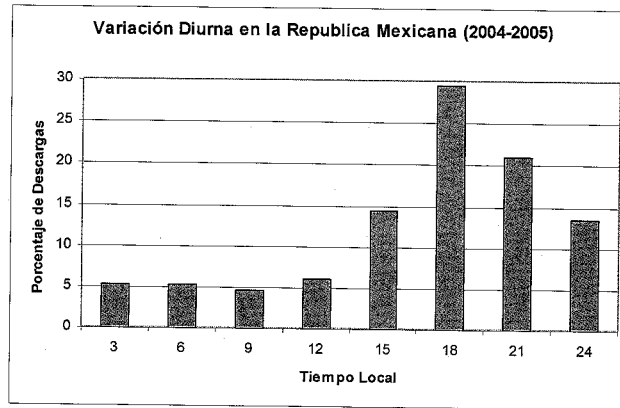
Por su parte, para la región del Pacífico Norte (Figura 4.8(b)) vemos que durante las primeras horas de la mañana no se presenta ninguna actividad convectiva. El máximo se observa a las 1800 LT, puesto que en esta región la convección, así como las precipitaciones y descargas eléctricas asociadas, son generadas en su mayoría por forzamiento orográfico.

Para la región del Golfo de México (Figura 4.8(c)) se puede ver que la distribución de las descargas conforme transcurre el día no varía bruscamente como en otras regiones, observándose que el número máximo se presenta a las 1800 LT. La variabilidad diurna observada aquí puede atribuirse a que regularmente en esta zona hay presencia de nubes convectivas tanto de día como de noche.

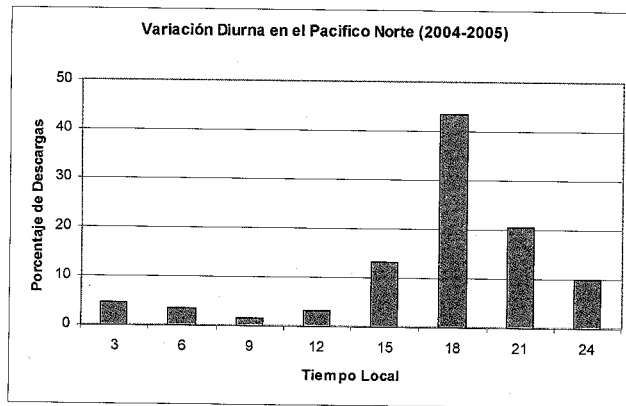
Para la región del Pacífico Sur (Figura 4.8(d)) vemos claramente cómo es que en las primeras horas de la mañana aumenta la actividad, luego disminuye conforme avanza el día para encontrar su máximo desde las 1800 hasta las 2400 LT. Esto es debido a que durante el día se calienta la superficie oceánica y libera vapor de agua, condensándose llegada la tarde, lo cual contribuye a que se den las precipitaciones por la tarde-noche.

La distribución de las descargas eléctricas a lo largo del día para la región del Caribe (Figura 4.8(e)) muestra un aumento paulatino conforme avanza el día, mostrando sus máximos entre las 1500 2100 LT.

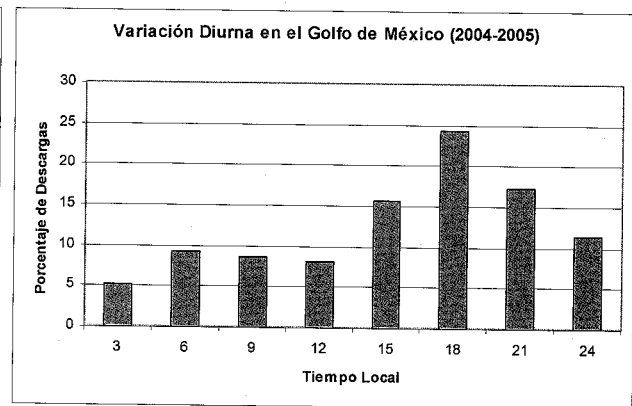




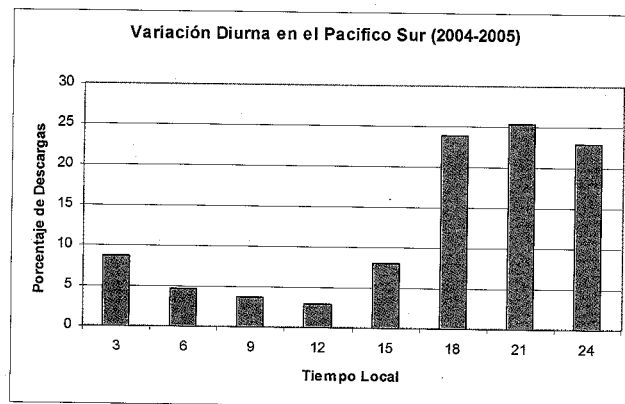
(a) Territorio continental de México.



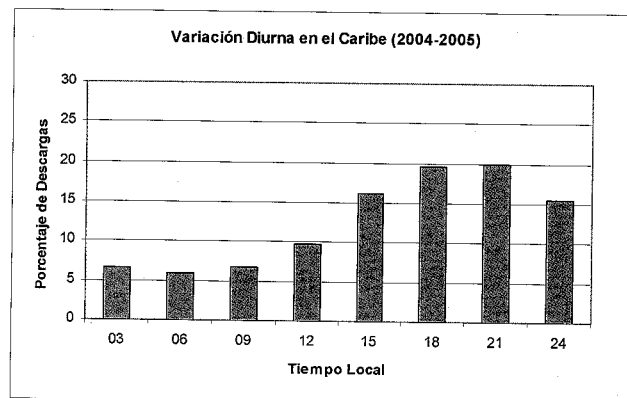
(b) Región Pacífico Norte



(c) Región del Golfo de México



(d) Región Pacífico Sur



(e) Región Caribe

Figura 4.8 Variación diurna del número total de descargas en las cinco regiones de estudio (período 2004-2005).

## Capítulo 5

### Conclusiones y recomendaciones

#### 5.1 Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado un estudio preliminar de las descargas eléctricas a tierra sobre el territorio continental de México y sus mares adyacentes. Se utilizaron los datos obtenidos mediante la red de detección de descargas eléctricas WWLL para cinco regiones de estudio durante 2004 y 2005: Territorio Continental de México, Pacífico Norte, Pacífico Sur, Golfo de México y Caribe. El estudio incluye la distribución geográfica, y la variación temporal a escala mensual y diaria.

En términos generales, para las cinco regiones se calculó una densidad de descargas eléctricas de nube a tierra por unidad de área de 7.4 descargas por  $\text{km}^2$  por año para 2004, mientras que para 2005 el valor encontrado fue de 8.6. Estas densidades promedio se pueden asociar a la actividad de fenómenos que afectan a estas regiones a lo largo del año, los cuales variaron de un año a otro. Según los reportes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), se presentaron 59 frentes fríos en 2004 y 53 en 2005. En cuanto a ciclones tropicales se refiere, se presentaron un total de 32 durante el 2004 (16 en el Pacífico y 16 en el Atlántico) y 46 durante el 2005 (16 en el Pacífico y 30 en el Atlántico). Esto evidencia la gran diferencia de la que hemos venido hablando respecto al 2005, que fue un año anómalo en cuanto al número de fenómenos se refiere, lo cual se refleja en todas las regiones.

La variación mensual en la actividad de las descargas eléctricas de nube a tierra sobre el territorio continental de México concuerda claramente con la estación de secas y de lluvias. Se observa un 70% del total de descargas entre los meses de mayo a octubre, con gran variabilidad de un año a otro, lo que se ha relacionado a la existencia de condiciones sinópticas favorables para el desarrollo de tormentas en el 2005. Se observó una densidad promedio de 2.7 descargas por  $\text{km}^2$  por año en 2004, teniendo valores de 2.5 y 0.3 de mayo-

octubre y de noviembre-abril, respectivamente. Por otro lado, para 2005 se tienen 4.0 descargas por  $\text{km}^2$  por año, repartiéndose 3.1 de mayo-octubre y 0.9 de noviembre-abril, respectivamente. En lo que se refiere a la variación diurna, a las 18 horas local se presenta cerca del 30 % del total de descargas en un día sobre el territorio continental mexicano. Este resultado sugiere que las lluvias asociadas con las nubes que tienen descargas eléctricas tendrían también un máximo por la tarde o noche.

En la región del Caribe la actividad de las descargas eléctricas es de mayo a noviembre, la cual está ligada directamente a los ciclones tropicales que se presentaron en ambos años. El número total de descargas casi se duplica en el 2005 respecto de 2004, teniendo una distribución bimodal con máximos en los meses de septiembre y octubre en 2004, y de junio y octubre en 2005. Teniendo una densidad de descargas de 1.0 descargas por  $\text{km}^2$  por año en 2004 la cual se distribuye 0.8 de mayo-octubre y 0.2 de noviembre-abril y 2.0 descargas por  $\text{km}^2$  por año en 2005 teniendo 1.8 para mayo-octubre y 0.3 de noviembre-abril. Con respecto a la variación durante el día vemos sus máximos entre las 1800 y 2100 horas tiempo local, es importante mencionar que en esta zona la variación de las descargas conforme transcurre el día no varía tanto como en las cuatro zonas restantes.

En la región del Golfo de México se ve que casi todo el año tiene la presencia de descargas, lo cual indica que en la mayor parte del año hay nubes presentes asociándose estas a frentes en algunos meses y a depresiones tropicales en otros. La mayor concentración se encuentra al sur de Veracruz, Tabasco y Campeche para ambos años. El aumento en el número total es poco de un año a otro, afirmándose con la densidad de 1.5 descargas por  $\text{km}^2$  por año en 2004 distribuyéndose 1.2 de mayo-octubre y 0.4 de noviembre-abril y 1.7 descargas por  $\text{km}^2$  por año en 2005 distribuyéndose 1.1 de mayo-octubre y 0.6 de noviembre-abril respectivamente. Se observa un pico en mayo 2005 que coincide con el observado sobre la región 1 y otro en agosto 2004, coincidiendo con la región 4 y 5. En la variación diurna la mayor concentración durante el día esta concentrada entre las 1500 y 2400 horas tiempo local, o sea distribuida mucho más a lo largo del día que sobre el territorio continental.

En la región del Pacífico Norte sólo se presentan descargas en zonas cercanas a la costa, y únicamente en la temporada de lluvias. Las descargas que vemos en esta zona frente a las costas de Nayarit y Sinaloa se ven influenciadas por la región cinco, que presenta una distribución monomodal en las frecuencias y da como resultado una densidad muy baja (menor que 0.1 descargas por km<sup>2</sup>). Además, la distribución para los meses de mayo a octubre es mayor que para los meses de noviembre a abril. En cuanto a la variación diurna, la mayor incidencia de descargas se observa a las 1800 horas (tiempo local).

Para la región del Pacífico Sur vemos una mayor afluencia sobre la línea de la costa, en Istmo de Tehuantepec y en la parte norte de la zona de convergencia intertropical. Se ve la presencia del pico en mayo de 2005, coincidiendo con otras zonas. El número total de descargas disminuyó del 2004 al 2005. Sin embargo ambos años presentan un comportamiento parecido en su distribución, resultando en una densidad de 2.1 descargas por km<sup>2</sup> por año en 2004 y distribuyéndose en 2.0 de mayo a octubre y menos que 0.1 de noviembre a abril; y 0.9 en el 2005, con 0.8 de mayo a octubre y menos de 0.1 de noviembre a abril. La baja en el número de descargas de un año a otro se puede asociar a que en la zona del Caribe en el 2005 presentó una mayor actividad ciclónica con respecto al valor histórico. La actividad máxima se presenta en esta zona entre las 1800 y 2400 horas tiempo local. La precipitación convectiva en esta región se asocia al paso de las ondas del este y al desarrollo de tormentas tropicales, como en el caso de la región del Caribe.

## 5.2 Recomendaciones

Es importante seguir con este estudio debido a que hace falta una base de datos más amplia, que abarque un mayor número de años, para poder evaluar la variabilidad interanual. Asimismo, una serie más larga de datos permitiría confirmar las diferencias encontradas entre las distintas regiones, así como llevar a cabo evaluaciones del funcionamiento de la red comparando con datos arrojados por otras redes para determinadas zonas o fenómenos. Por ejemplo, Jacobson y Holzworth (2006) realizaron una evaluación sistemática de la WWLL y encontraron que la red puede ser útil para localizar complejos convectivos en tiempos cortos, entre otras posibles aplicaciones.

Algunos estudios como el de Fierro *et al.* (2006) sugieren que las descargas eléctricas de nube a tierra en el ojo de los ciclones tropicales pudieran ser buenas indicadoras de cambios en la intensidad de los mismos. Existen casos observados documentados, pero no hay aún estudios que modelen los procesos de electrificación dentro de los ciclones tropicales, lo cual sería de mucha utilidad para sistemas de pronóstico.

## Bibliografia

- Altaratz O., and Z. Levin, 2003: Lightning activity over land and sea on the eastern coast of the Mediterranean. *Monthly Weather Review*, 131, 2060-2070.
- Collier A. B., A. R. W. Hughes, J. Lichtenberger and P. Steinbach, 2006: Seasonal and Diurnal Variation of Lightning Activity over Southern Africa and Correlation with European Whistler Observations. *Annales Geophysicae*, 24, 529-542.
- Charles A.D., 1985. The operational meteorology of convective weather. Vol.II. Storm scale analysis. NOAA technical memorandum ERL ESG-15.
- Christian, H. J., Blakeslee, R. J., Boccippio, D. J., Boeck, W. L., Buechker, D. E., Driscoll, K. T., Goodman, S. J., Hall, J. M., Koshak, W. J., Mach, D. M., and Stewart, M. F., 2003: Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *J. Geophys. Res.*, 108(D1).
- Crombie, D. D., 1964: Periodic fading of VLF signals received over long paths during sunrise and sunset. *Radio Sci.*, 68D, 27-34.
- Cummer, S. A., Inan, U. S., and Bell, T. F., 1998: Ionospheric D region remote sensing using VLFF radio atmospherics, *Radio Sci.* , 33, 1781-1792.
- Cummins, K. L. and Murphy, M. J., 2000: Overview of lightning detection in the VLF, LF, and VHF frequency ranges. 2000 International Lightning Detection Conference, Tucson, Arizona, 1-10.
- Dowden R. L., J. B. Brundell, C. J. Rodger, 2002: VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiples sites. *J. Atmos. Solar Terrestrial Phys.* 64, 817-830.
- Fierro, A., L. Leslie, E. Mansell, J. Straka, D. MacGorman, C. Ziegler, 2006: A high-resolution simulation of microphysics and electrification in an idealized hurricane like vortex. *Meteorol. and Atmos. Phys.*, accepted.
- Finke, U. and T. Hauf, 1996: The characteristics of lightning occurrence in southern Germany, *Beitr. Phys. Atmos.*, 69, 361-374.
- Harlin J., R. Dowden and E. Lay, 2006: Performance Assessment of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN), Using the Los Alamos Sferic Array (LASA) as Ground Truth. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 23, 1082-1092.

- Hamid, E. F., Kawasaki, Z-I., and Mardiana, R., 2001: Impact of the 1997-1998 El Niño event on lightning activity over Indonesia. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 147-150.
- Hodanish, S., D. Sharp, W. Collins, C. Paxton, and R. E. Orville, 1997: A 10-yr monthly lightning climatology of Florida (1986-95). *Weath. Forecast*, **12**, 439-448.
- Jacobson A. and R. Holzworth, 2006: Performance assessment of the World Wide Lightning Location Network (WWLLN), using the Alamos spheric array (LASA) as ground truth. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, **23**, 1082-1092.
- Jourdain, L., and Hauglustaine, D. A., 2001: The global distribution of lightning NOx simulated on-line in a general circulation model, *Phys. Chem. Earth Pt. C-Solar-Terr. Planet. Sci*, **26**, 585-591.
- Krider E. P., Noggle, R. C., Uman, M. A., 1976: A gated wideband magnetic direction finder for lightning return strokes. *Journal of Applied Meteorology* **15**, 301-306.
- Lay E. H., R. H. Holzworth, C. J. Rodger, J. N. Thomas, O. Pinto and R. L. Dowden, 2004: WWLL Global Lightning Detection System: Regional Validation Study in Brazil. *Geophys. Res. Letters*, **31(3)**.
- Lee A. C. L., 1986: An Experimental Study of the Remote Location of Lightning Flashes Using a VLF Arrival Time Difference Technique. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **112**, 203-229.
- Lee A. C. L., 1989: Ground truth confirmation and theoretical limits of an experimental VLF arrival time difference lightning flash locating system. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **115**, 1147-1166.
- Lyons W. A., M. Uliasz and T. E. Nelson, 1998: Large peak current cloud-to-ground lightning flashes during the summer months in the contiguous United States. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 2217-2233.
- Magaña, R. V, 1999: Los impactos del El Niño en México. Sep-Conacyt
- Orville R. E., and R. W. Herderson, 1986: Global Distribution of Midnight lightning: September 1977 to August 1978. *Monthly Weather Review*, **114**, 2640-2653.
- Orville, R. E., 1994: Cloud-to-ground lightning flash characteristics in the contiguous United States: 1989-1991. *J. Geophys. Res.*, **99**, 10833-10841.

- Orville, R. E., and A. C. Silver, 1997: Lightning ground flash density in the contiguous United States: 1992-95, *Mon. Weather Rev.*, **125**, 631-638.
- Orville, R. E., and G. R. Huffines, 1999: Lightning ground flash measurements over the contiguous United States: 1995-1997. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2693-2703.
- Pinto I. R. C. A., O. Pinto Jr., R. M. L. Rocha, J. H. Diniz, A. M. Carvalho, and A. Cazetta Filho, 1999: Cloud-to-ground lightning in southeastern Brazil in 1993, 2, Time variations and flash characteristics, *J. Geophys Res.*, **104**, 31381-31387.
- Pinto I. R. C. A. and O. Pinto Jr., 2003: Cloud-to-Ground Lightning Distribution in Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, **65**, 733-737.
- Pinto Jr., I. R. C. A. Pinto, J. H. Diniz, A. C. Filho, L. C. Cherchiglia, A. M. Carvalho, 2003: A seven-year study about the negative cloud-to-ground lightning flash characteristics in Southeastern Brazil. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, **65**, 739-748.
- Petersen W. A., and S. A. Rutledge, 1996: Cloud-to-ground lightning observations from TOGA COARE: selected results and lightning location algorithms. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 602-620.
- Price C. and B. Federmesser, 2006: Lightning Rainfall Relationships in Mediterranean Winter Thunderstorms. *Geophysical Research Letters*, **33**,
- Ramachandran V., S. Kumar and A. Kishore, 2003: Cloud-to-Ground Lightning Location Using TOGA of Sferics. *S. Pac. J. Nat. Sci.*, **21**, 63-65.
- Rivas, S. L., F. de Pablo and E. G. Díez, 2001: Cloud-to-ground lightning in the Iberian Peninsula: 1992-1994. *J. Geophys. Res.*, **106**, 11891-11901.
- Rodger, C. J., 1999: Red sprites, upward lightning, and VLF perturbations, *Rev. Geophys.*, **37**, 317-336.
- Rodger C. J., J. B. Brundell, R. L. Dowden and N. R. Thomson, 2004: Location accuracy of long distance VLF lightning location network. *Ann. Geophysicae*, **22**, 747-758.
- Rodger C. J., J. B. Brundell and R. L. Dowden, 2005: Location accuracy of VLF World Wide Lightning Location (WWLL) network: post-algorithm upgrade. *Ann. Geophysicae*, **23**, 277-290.



- Schlegel. K., Diendorfer, G., Thern, S., and Schmidt, M., 2001: Thunderstorms, lightning and solar activity Middle Europe, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 63, 1705-1713.
- Tapia, A., J. Smith, and M. Dixon, 1998: Estimation of convective rainfall from lightning observations, *J. Appl. Meteorol.*, **37**, 1497-1509.
- Troncoso, O. A., 2004: Twelve years of continuous measurements of atmospheric electrical activity in Mexico's Tropical highland. *Atmósfera*, 53-67.
- Uman, M.A., 1993: *Lightning*. Dover. New York, 555-568.
- Uman, M. A., 1987: *The lightning discharge. The Earth's Electrical Environment*. Studies in Geophysics National Academy Press.
- Varios autores, 1986. *The earth's electrical enviroment*. Studies in geophysics. National academy press.
- Volland, H., 1984, *Atmospheric Electrodynamics*, Springer-Verlag, New York.
- Watson, R. A., R. E. Lopez, and R. L. Holle, 1994a: Diurnal cloud-to-ground lightning patterns in Arizona during the southwest monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1716-1725.
- Williams E.R., 1989. *Electrificación en las tormentas*. Investigación y Ciencia, Enero 1989.
- Williams, E. R., 1992: The Schuman resonance: A global tropical thermometer, *Science*, **256**, 1184-1187.
- Wiliams E. R., 2005: *Lightning and climate*. Atmospheric Research
- Yair, Y., Z. Levin, and O. Altaratz , 1998: Lightning phenomenology in the Tel Aviv area from 1989 to 1996. *J. Geophys. Res.*, **103**, 9015-9025.
- Zajac B. A., and S. A. Rutledge, 2001: Cloud-to-ground lightning activity in the contiguous United States from 995 to 1999. *Monthly Weather Review*, **129**, 999-1019.