

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“Análisis y Representación Gráfica de Descargas
Atmosféricas para Obtener Índices de Riesgo de
Rayos en la Zona Norte de México ”**

POR

Ing. Guillermo Ávila Elizondo

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Víctor Manuel Cabrera Morelos

ISSN: 0188-9060



RIITEC: (12)-TMCIE-2014

Torreón, Coahuila, México
Septiembre, 2014

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Instituto Tecnológico de La Laguna

2014. Año de Octavio Paz.

Torreón, Coah., 19/Agosto/2014
Dependencia: DEPI/CPCIE
Oficio: DEPIJ/CPCIE/099/2014
Asunto: Autorización de
impresión de tesis.

C. GUILLERMO ÁVILA ELIZONDO
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.
PRESENTE

Después de haber sometido a revisión su trabajo de tesis titulado:

**"ANÁLISIS Y REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
PARA OBTENER ÍNDICES DE RIESGO DE RAYOS EN LA ZONA NORTE DE MÉXICO"**

Habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis hizo, se le comunica que se le concede la autorización con número de registro **RIITEC: (12)-TMCIE-2014**, para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN


DR. JOSÉ LUIS MEZA MEDINA
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación
del Instituto Tecnológico de la Laguna

JLMM-RHSR



Srvc. Revolución y Cede. Cuauhtémoc s/n Col. Centro C.P. 27000
Torreón, Coah. Tel. 765 1313. e-mail: wmaster@ittalaguna.edu.mx
www.ittalaguna.edu.mx



10 001 208
982/91. W. www. 2014/10/19

DR. JOSE LUIS MEZA MEDINA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Por medio de la presente, hacemos de su conocimiento que después de haber sometido a revisión el trabajo de tesis titulado:

**"ANÁLISIS Y REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS
PARA OBTENER ÍNDICES DE RIESGO DE RAYOS EN LA ZONA NORTE DE MÉXICO"**

Desarrollado por el **C. Guillermo Ávila Elizondo**, con número de control **M1213019** y habiendo cumplido con todas las correcciones que se le indicaron, estamos de acuerdo que se le conceda la autorización de la fecha de examen de grado para que proceda a la impresión de la misma.

ATENTAMENTE

EDUCACIÓN TECNOLÓGICA FUENTE DE INNOVACIÓN



Dr. Víctor M. Cabrera Morales
Asesor/Director de Tesis



Dr. Francisco S. Sellschopp Sánchez
Comité Tutorial



M.C. Carlos Tirado Ruiz
Comité Tutorial



Dr. Marco A. Arjona López
Comité Tutorial



Dedico este trabajo a Dios que en todo momento me proporciona el entendimiento y la fuerza para salir adelante y a mis dos grandes ángeles guardianes que siempre me han apoyado para lograr mis sueños.

A mis hermanas Monse, Argentina y Yolanda, mi segunda familia la Fam. Zárate, a mi novia Adriana, pero sobre todo a mi padre el Ing. Guillermo Avila Gonzalez que aún vigilando desde las alturas me sigue enseñando sobre la vida, y a mi madre la Sra. Yolanda Elizondo Ríos ejemplo de lucha, valor y amor, sin ella nada de esto hubiera sido posible, gracias.

Guillermo Avila

Agradecimientos

Agradezco al CONACYT, al Instituto Tecnológico de la Laguna y a la CFE por el apoyo brindado a la ciencia y la tecnología así como a las prestaciones otorgadas al becario 276079, porque sin su soporte no hubiera sido posible la realización de este documento, así como las aportaciones en infraestructura que proporcionaron durante el desarrollo del mismo.

A mis profesores de posgrado Dr. Víctor Cabrera, Dr. Sergio Sellschopp, M.C. Carlos Tirado, M.C. Carlos Morales, M.C. Teodoro Corona, que gracias al aporte de sus conocimientos y experiencia me dieron las herramientas para desarrollar esta investigación, sin olvidar a los demás investigadores en el área de potencia Dr. Marco Arjona, Dra. Concepción Hernández y M.C. Ricardo Vargas.

A mis compañeros de maestría Ing. Sergio Salazar, Ing. Pablo Pech, Ing. Ramon Lara, Ing. Heriberto Valadez, M.C. Adrián Gallegos, Ing. Javier Muñoz, Ing. Enrique Guerrero, Ing. David Pérez, que en todo momento apoyaron mi trabajo, también a los compañeros de la especialidad de control Ing. Claudio Olivas, Ing. Marco Rodríguez y M.C. Luis Vázquez.

Resumen

Este trabajo propone un mapa en el cual pueden identificarse las áreas de susceptibilidad de descarga atmosférica en los estados de Coahuila, Chihuahua y Durango. Para la prevención de fallas en líneas de transmisión, éstas estarán divididas en tres zonas de riesgo: bajo, medio y alto. La información utilizada en este trabajo abarca un periodo de tiempo de 5 años (Ene-2009 a Dic-2013) y proviene del Lightning Imaging Sensor (LIS) de la NASA, información que difunde a través de su sitio en internet (con un retraso de 3 meses) y de acceso libre. Actualmente la Gerencia de Transmisión Norte de CFE utiliza 2 detectores de descargas Boltek *LD – 250* para monitoreo de la actividad de rayos en la zona y que utiliza el método de intensidad de señal, tales detectores son de baja precisión y poco confiables, sumado a esto, el procedimiento actual utiliza sistemas localizadores de descargas en tierra más sofisticados y de alto costo, lo que dificulta el registro de datos referentes al país. La información recibe un tratamiento estadístico descriptivo mediante medidas de tendencia central (moda, media y mediana) y variabilidad (desviación estándar) para la identificación de estas zonas, tomando como referencia la media y desviación estándar de cada estado; Chihuahua($\bar{x} = 10,84, \sigma = 8,5$), Coahuila($\bar{x} = 8,1, \sigma = 5,8$), Durango($\bar{x} = 10,92, \sigma = 11,35$). A pesar de las limitaciones del LIS, los resultados indican que las áreas de mayor susceptibilidad son aquellas que pertenecen o se acercan a los sistemas montañosos Sierra Madre Occidental y Sierra Madre Oriental.

Palabras clave: sensor de imagen de rayo, sistema de información geográfica, sistema localizador de rayos, pulso electromagnético.

Abstract

The present work presents a proposal of susceptibility areas for atmospheric discharges on the Coahuila, Chihuahua and Durango States. In order to prevent the transmission lines outages, they will be divided into three zones of risk: low, medium and high. The information applied on this work covers a period of 5 years (Jan - Dec 2009-2013) and comes from Lightning Imaging Sensor (LIS) NASA, information broadcasting through its site on free access internet (with a delay of 3 months). Currently the CFE (Mexican Federal Commission of Electricity) North Transmission Management uses 2 lightning detectors Boltek *LD - 250* for monitoring the activity of lightning in the area which used the method of signal strength, such detectors are of low precision and low reliability, in addition to this, the current procedure to use lightning locator system's on earth are more sophisticated and high-cost, what hinders the registration of data concerning the country. The information receives a statistical descriptive treatment by measures of central tendency (mode, mean and median) and variability (standard deviation) for the identification of these areas, taking as reference the mean and standard deviation of each State; Chihuahua($\bar{x} = 10,84, \sigma = 8,5$), Coahuila($\bar{x} = 8,1, \sigma = 5,8$), Durango($\bar{x} = 10,92, \sigma = 11,35$). Despite the limitations of the LIS, results indicate that increased susceptibility areas are those which belong or are approaching the mountain systems Sierra Madre Occidental and Sierra Madre Oriental.

Keywords: lightning imaging sensor, geographic information system, lightning locating system, electromagnetic pulse.

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Índice	V
Índice de Tablas	VI
Índice de Figuras	IX
Capítulo I	1
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del Problema	3
1.3. Objetivo General	3
1.3.1. Objetivos Particulares	3
1.4. Justificación	4
1.5. Alcances y limitaciones	4
1.6. Contenido de la Tesis	5
Capítulo II	6
2. Marco Teórico	7

2.1. Fundamentos de las Descargas Atmosféricas	7
2.1.1. Origen y Formación	7
2.1.2. Tipos de Rayos	9
2.1.3. Proceso de Descarga de una Nube	10
2.1.4. Propiedades Electromagnéticas	14
2.2. La Radiación Óptica de los Rayos	32
2.2.1. Emisión Óptica y Características Espectrales	33
2.2.2. Dispersión de la Luz en las Nubes	35
2.2.3. Características del Pulso Óptico en la Superficie de la Nube	36
2.3. Localización de Descargas Atmosféricas	37
2.3.1. Localización RF	37
2.3.2. Detección Satelital	43
2.4. Parámetros de Interés en Ingeniería	47
2.4.1. Días de Tormenta y Densidad de Rayos a Tierra	47
2.4.2. Densidad de Rayos a Tierra de Densidad Transitoria Óptica de Rayos	49
2.4.3. Parámetros de Corriente y Forma de Onda	51
2.5. Sobretensiones Atmosféricas en Líneas Aéreas	53
2.5.1. Impacto en un cable de tierra	55
2.5.2. Impacto en un conductor de fase	60
Capítulo III	61
3. Metodología	62
3.1. Diseño de Estudio	62
3.2. Muestra	62
3.3. Proceso de Recolección y Filtrado de Datos	63
3.4. Representación Gráfica mediante el SIG	64
Capítulo IV	67

4. Resultados:Análisis Descriptivo y Representación Gráfica por Estado	68
4.1. Chihuahua	69
4.2. Coahuila	74
4.3. Durango	79
4.4. Algoritmo de lectura y filtrado en Python	84
4.5. Días de Tormenta al Año en el Norte del País	85
 Capítulo V	 86
5. Conclusiones	87
5.1. Trabajos Futuros	88
 Referencias	 93
 Anexos	 94
 A. Sistema Detector de Rayos Boltck LD-250	 95
 B. Mapa del Promedio Anual de Densidad de Rayos a Tierra por Estados (1983 – 1993)	 102
 C. Mapa de Relieve en México	 107
 D. Regiones del Sistema Eléctrico Nacional	 109
 Trabajos Publicados	 109

Índice de tablas

2.1. Bandas de radiofrecuencia	38
2.2. Parámetros para la obtención de N_g a partir de T_d	49
2.3. Parámetros de Corriente IEC	52
2.4. Parámetros de corriente de rayo para descargas negativas	54
2.5. Parámetros de corriente de rayo para descargas positivas	55

Índice de figuras

2.1. Cúmulo-nimbus de Malán	9
2.2. Estructura de la carga de dos simples nubes aisladas	10
2.3. Tipos de descarga nube-tierra	11
2.4. Proceso de descarga de una nube	12
2.5. Diagrama de cálculo de intensidad de campo E debido a carga puntual	15
2.6. Intensidad de campo E	16
2.7. Intensidad de campo E en tierra vs distancia	18
2.8. Diagrama para cálculo de Intensidad de Campo E debido a línea de carga	19
2.9. Variación del campo eléctrico para un líder negativo descendente	21
2.10. Variación del campo eléctrico para un líder positivo descendente	23
2.11. Variación del campo eléctrico para un líder negativo ascendente	25
2.12. Variación del campo eléctrico para un líder positivo ascendente	26
2.13. Variación del campo eléctrico para un líder positivo ascendente	27
2.14. Diagrama para cálculo de densidad de flujo magnético	28
2.15. Diagrama para cálculo de Intensidad de Campo E debido a línea de carga	32
2.16. Técnica Interferometría	34
2.17. Pulso óptico idealizado de un rayo	37
2.18. Técnica TOA	39
2.19. Técnica Interferometría	40
2.20. Técnica MDF	41
2.21. Tipos de Antenas	42

2.22. Arreglo Adcock	43
2.23. Detector de Transitorios Ópticos	44
2.24. Sensor de Imagen de Rayo	46
2.25. Actividad Total de Rayos para el Norte y Sur de América	50
2.26. Forma de onda impulso de corriente estandarizada	51
2.27. Sobretensiones por impacto de rayo	56
2.28. Impacto de un rayo en una torre	58
2.29. Sobretensiones por fallo de apantallamiento	60
3.1. Ventana de datos del LIS	63
3.2. Archivo de texto para almacenado de información	64
3.3. Archivo de texto para lectura en un GIS	65
3.4. Estructura de capas en un SIG	66
3.5. Modelos raster vs vectorial	66
4.1. Mapa densidad de rayos Chihuahua	69
4.2. Distribución de rayos por mes Chihuahua	70
4.3. Distribución de rayos por año Chihuahua	71
4.4. Histograma de frecuencias Chihuahua	72
4.5. Niveles de riesgo Chihuahua	73
4.6. Mapa densidad de rayos Coahuila	74
4.7. Distribución de rayos por mes Coahuila	75
4.8. Distribución de rayos por año Coahuila	76
4.9. Histograma de frecuencias Coahuila	77
4.10. Niveles de riesgo Coahuila	78
4.11. Mapa densidad de rayos Durango	79
4.12. Distribución de rayos por mes Durango	80
4.13. Distribución de rayos por año Durango	81
4.14. Histograma de frecuencias Durango	82

4.15. Niveles de riesgo Durango	83
4.16. Algoritmo de Lectura y Filtrado	84
4.17. Días de tormenta promedio al Año	85
4.18. Días de tormenta máximo al año	86
A.1. Boltek LD-250	96
A.2. Campo magnético en antena de lazo	97
A.3. Señal del lazo proporcional al ángulo de llegada	98
A.4. Ejemplos de señales de lazo	99
A.5. Diagrama de operación Stormscope	99
A.6. Diagrama de pulsos stormscope	100
A.7. Comparación resultados Boltek vs LIS	101
A.8. Datos arrojados por el Boltek LD-250	101
B.1. Mapa de Isodensidades de Rayos a Tierra	103
B.2. Isodensidad de Rayos a Tierra Chihuahua	104
B.3. Isodensidad de Rayos a Tierra Coahuila	105
B.4. Isodensidad de Rayos a Tierra Durango	106
C.1. Mapa de Relieve en México	108
D.1. Sistema Eléctrico Nacional por Regiones	110

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

En 1983, el Departamento de Transmisión y Distribución del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) [1] en un esfuerzo en conjunto con la Comisión Federal de Electricidad, inició un proyecto que consistió en la operación de una red de 115 contadores de descargas del tipo CIGRE-10kHz con la finalidad de elaborar un mapa de isodensidades de rayos a tierra (densidad de rayos a tierra por km^2) del país y lograr con esto realizar mejoras en los sistemas de potencia que permitan la reducción en las tasas de salida, este contador era capaz de recabar la información sobre las descargas presentadas en un área circular de 20 km alrededor de este, el estudio tuvo un tiempo de duración de 11 años (1983 – 1994) y actualmente el mismo mapa sigue siendo utilizado para el cálculo eléctrico.

Conforme la tecnología ha avanzado diversos dispositivos para la localización, conocimiento de parámetros del rayo y estimación tanto de los niveles cerámicos como de la densidad de rayos, han sido creados, con mayor eficiencia en la detección y clasificación, desde los equipos en tierra como los sensores IMPACT fabricados por Vaisala INC., hasta los nuevos dispositivos colocados en satélites sensibles a los transitorios ópticos generados por el rayo. Aunado a lo anterior el cambio climático alrededor del globo ha ocasionado cambios en la distribución de rayos por lo cual se ha vuelto imprescindible actualizar la

información y comparación de resultados con diferentes dispositivos. En 2003 Christian et Al. [2] utilizó la información capturada por 5 años en el OTD para generar un mapa global de la tasa promedio de rayos y la distribución temporal de estos, concluyendo que la mayor densidad de rayos se presenta sobre las partes montañosas de los continentes y sobre todo se concentran entre las latitudes -30° y 30° y las longitudes -30° y 30° , este mismo mapa fue adaptado por el IEEE para ser utilizado en el estándar 1410 [3] como método de cálculo para regiones en las que no se tengan equipos de detección de rayos. En 2004 el Instituto de Investigaciones Eléctricas elaboró un trabajo [4] en el que se analiza la actividad de rayos en el país utilizando la información del Detector de Transitorios Ópticos (OTD) y el Sensor de Imagen de Rayo (LIS) lanzados en satélite por la NASA, en el cuál determino que las zonas de mayor densidad de rayos son las que mayor tasa de salida de líneas de transmisión tienen. Otros países han realizado trabajos similares aprovechando que la información de los satélites de la NASA es pública a través de su sitio de internet, Díaz et Al. [5] elaboró una actualización del mapa isoceraúnico de Venezuela utilizando los datos descargados del LIS con una resolución de 100 km (aproximadamente 1°) ya que en Venezuela el Mapa Ceráunico data de 1971, Martínez et Al. en 2003[6] había realizado este mismo procedimiento con anterioridad. Por otro lado debido a que el satélite no esta permanentemente sobre el área de interés y pocos países tienen equipos para la detección de rayos, se desarrolló la World Wide Lightning Location Network (WWLLN)[6], un sistema global de detección de rayos, un proyecto liderado por el profesor Robert Holzworth de la Universidad de Washington, que utiliza antenas alrededor del planeta para la localización de las descargas de nube a tierra, las antenas se encuentran instaladas en universidades de Nueva Zelanda, Australia, Singapur, México, etc., que se interesaron en participar en el proyecto, en nuestro país el Instituto de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM es huésped de una antena de este tipo, y tienen en operación un Atlas Climático Digital (uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/) de México en el que a parte de mostrar datos como temperatura, precipitación y cobertura del suelo, también muestra la densidad de rayos nube-tierra por km^2 sobre el territorio nacional. Por desgracia la

WWLLN solo localiza aproximadamente el 30 % de las descargas nube-tierra, en este caso solo las descargas de mayor intensidad serán detectadas.

1.2. Planteamiento del Problema

Las descargas atmosféricas son uno de los fenómenos meteorológicos más estudiados debido a las afectaciones que pueden producir en seres vivos, edificios y sistemas eléctricos principalmente. Dentro de los sistemas eléctricos que tienen un mayor riesgo de ser perjudicados por la caída de un rayo se encuentran las líneas de transmisión, éstas pueden sufrir desperfectos de dos tipos, por fallo de apantallamiento o por flameo inverso; entonces al encontrarse expuestas, se vuelve de vital importancia conocer el comportamiento cerámico del sitio en el que se encuentran o serán construidas para prevenir, o en su defecto, realizar las modificaciones necesarias y lograr su correcta protección. De no llegarse a proteger adecuadamente, la caída de un rayo puede ocasionar interrupciones en el suministro de energía que generan pérdidas millonarias así como una disminución en la calidad de la energía que recibe el usuario final.

1.3. Objetivo General

Generar mapas de los estados de Coahuila, Chihuahua y Durango clasificando las zonas de riesgo de descarga atmosférica y que sirvan como herramientas de prevención de fallas.

1.3.1. Objetivos Particulares

- Desarrollar un algoritmo de programación que sea capaz de leer y clasificar la información reunida por el Sensor de Imagen de Rayo.
- Determinar la moda, media, mediana y desviación estándar de los datos recolectados por estado.

- Representar la información analizada en un mapa con ayuda de un Sistema de Información Geográfica.

1.4. Justificación

Uno de los criterios más importantes para el diseño y construcción de líneas de transmisión, es el conocer el comportamiento frente a descargas atmosféricas, y para determinarlo es necesario conocer la densidad de rayos en el área de interés como se menciona en [7] y [8], esto es de vital importancia para lograr una adecuada coordinación de aislamiento. En la actualidad se han realizado pocas investigaciones en lo referente a descargas atmosféricas sobre territorio nacional, la última de ellas publicada en el año 2004 y desarrollada por el Instituto de Investigaciones Eléctricas [4], la cuál muestra la relación que existe entre las líneas de transmisión que presentan el mayor número de salidas por rayo con los lugares geográficos de más alta frecuencia de descarga atmosférica. Por desgracia el trabajo elaborado solo proporciona de manera general el comportamiento cerámico sobre la República Mexicana, sin llegar a proponer zonas de riesgo para el caso específico de cada región y que pueda servir como herramienta de prevención. La región de transmisión norte compuesta por las zonas de Camargo, Chihuahua, Durango, Juárez y Laguna, es operada por la Comisión Federal de Electricidad que entre los años 2009 y 2013 acumuló un promedio de 5,2 fallas al año por descarga atmosférica, no es considerada una zona con alta incidencia de rayos en comparación con otras regiones, sin embargo, es de gran utilidad comparar la actividad de rayos por porción de territorio en cada estado analizado, y así, definir los valores medios en las regiones de interés.

1.5. Alcances y limitaciones

Determinar las zonas de riesgo de descarga atmosférica y clasificar de cierta forma el nivel de importancia para atender la mejora en protecciones de las líneas que por ahí pasen.

Sin embargo, no es una herramienta de cálculo que pueda utilizarse para estimar la probabilidad de daño a las líneas de transporte eléctrico, esto es debido a que la información obtenida no distingue entre las descargas nube-tierra y de nube, además que el sensor LIS es un dispositivo que solo se encuentra aproximadamente durante 3 minutos sobre la zona de interés.

1.6. Contenido de la Tesis

Capítulo I “Introducción”: En este capítulo se muestran de manera general las razones que motivaron el desarrollo de este trabajo, los objetivos que persigue, así como, la justificación, planteamiento del problema y alcances que se tienen.

Capítulo II “Marco Teórico”: Descripción de los fundamentos teóricos, se explica el fenómeno del rayo, desde el proceso formativo hasta los principios electromagnéticos y ópticos relacionados a él. Se pasa por los métodos utilizados para la localización de descargas así como el comportamiento de las líneas de transmisión frente al rayo, mencionando también algunos parámetros de interés en ingeniería.

Capítulo III “Metodología”: En esta sección se describe de manera detallada la estrategia que se sigue para desarrollar la solución al problema planteado, los programas utilizados y el tratamiento estadístico elegido para la información recolectada.

Capítulo IV “Resultados”: Interpretación y explicación de resultados obtenidos, mostrando gráficas y mapas terminados de las zonas de riesgo establecidas por región geográfica, así como la distribución temporal de las descargas. Se presentan de forma detallada la distribución de descargas atmosféricas en los estados de interés en unidades de *rayos* \times km^2 .

Capítulo V “Conclusiones”: Se presentan las conclusiones del proyecto como también

algunas propuestas de trabajos futuros para el control de fallas en las redes de transmisión.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Fundamentos de las Descargas Atmosféricas

2.1.1. Origen y Formación

El rayo puede ser definido como un transitorio, una descarga eléctrica de alta corriente cuya longitud de trayectoria es generalmente medida en kilómetros. Los rayos se producen cuando algunas regiones de la atmósfera alcanzan una carga eléctrica suficientemente grande que el campo eléctrico asociado a esta provoque la ruptura dieléctrica del aire. El más común productor de rayos es la nube de tormenta (cumulonimbus). Sin embargo, los rayos también ocurren en tormentas de nieve, arena, y en las nubes sobre volcanes en erupción [9].

El rayo es un primo distante de la chispa eléctrica corta que puede ser creada entre los dedos y la manija metálica de una puerta si se camina a través de ciertas alfombras en algún ambiente fresco y seco; o que puede ser producido entre los dedos y la puerta del carro después de deslizarse a través del asiento del carro en un día de invierno. El proceso de cargar eléctricamente un cuerpo por restregar los zapatos sobre una alfombra o frotando los pantalones en un asiento del carro resulta en una tensión de cuerpo de aproximadamente 10 kV, un nivel de tensión que puede conducir a una chispa eléctrica

a través del aire a una distancia de aproximadamente un tercio de centímetro entre un dedo de 10 kV y cualquier objeto conductor sin carga, incluso otra persona. (La tensión de ruptura entre electrodos de placas paralelas separadas 1 cm a temperatura y presión estándar es de 30 kV) La carga por fricción (el efecto triboeléctrico) que implican zapatos y alfombras o asientos de carro y pantalones comparten características comunes con el proceso de carga que involucra la interacción entre diversas formas de hielo y agua que toman lugar dentro de las nubes de tormenta. En el caso de la chispa corta, el deslizamiento de dos materiales diferentes, es decir goma (la suela de zapato) y nylon (alfombra), causa la transferencia de electrones desde el nylon a la goma, cargando la goma negativamente (con un exceso de electrones) y dejando al nylon positivamente cargado (con una deficiencia de electrones). En una tormenta eléctrica, el proceso de transferencia de carga se cree que involucra colisiones entre (1) las partículas de granizo blando que son lo suficientemente pesadas para caer o permanecer inmóviles en las corrientes ascendentes de la tormenta y (2) pequeños cristales de hielo que son lo suficientemente ligeros como para ser llevados hacia arriba en las corrientes ascendentes [10].

Para producir las cargas primarias de la nube de tormenta que han sido observadas, estas interacciones hielo-granizo deben tomar lugar a altitudes donde la temperatura es considerablemente más fría que el punto de congelación, generalmente de -10°C a -20°C , en la presencia de gotas de agua sin congelar (sobre-fusión). Después que la carga ha sido transferida entre las colisiones de las partículas de hielo y granizo, los cristales de hielo positivamente cargados son llevados aun más arriba en las corrientes ascendentes a la parte superior de la nube de tormenta, a una altitud cercana a los 10 km sobre el nivel del mar en las lluvias templadas del verano; mientras el granizo negativamente cargado reside a una altitud de 6 a 8 km. En nubes de tormenta típicas, una pequeña carga positiva también se encuentra por debajo de la carga negativa principal, a altitudes donde la temperatura es cercana o más caliente de la congelación [10]. Como se puede ver en el modelo de la nube de tormenta de la Figura 2.1.

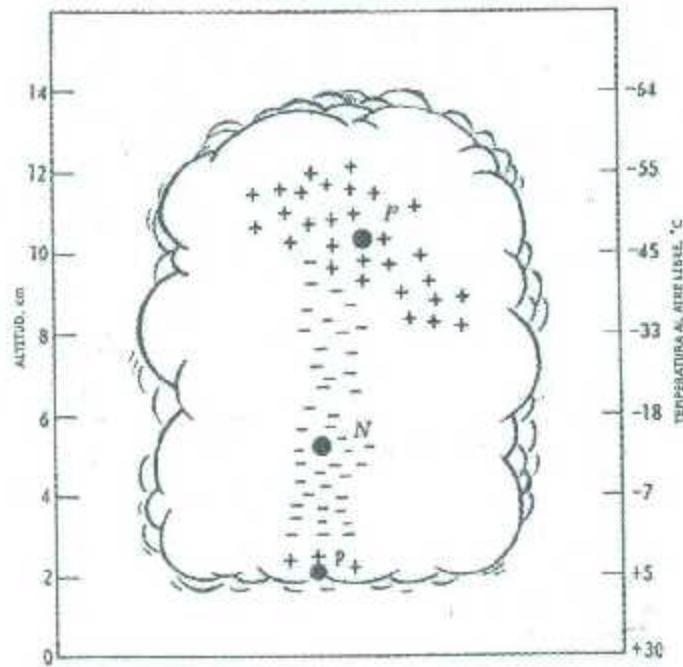


Figura 2.1: Cúmulo-nimbos de Malán. Modificado de [9].

2.1.2. Tipos de Rayos

Todas las descargas atmosféricas pueden ser divididas en dos categorías: aquellas que puentean el espacio entre la carga de la nube y tierra “descargas nube-tierra”, y aquellas que no lo hacen. El último grupo que en conjunto se denominan como “descargas de nube” y agrupa la mayoría del total de las descargas de rayos. Como se ilustra en la Figura 2.2, las descargas de nube que ocurren totalmente dentro de una sola nube (o célula) son llamadas descargas intranube (se cree son las más comunes descargas de nube y las más comunes de todas las formas de descarga); aquellas que se producen entre nubes son llamadas descargas nube-nube (menos comunes que las descargas intranube); y aquellas que ocurren entre una de las regiones de carga de la nube y el aire que le rodea son llamadas descargas nube-aire [10].

Existen cuatro tipos de rayos que se producen entre la nube y tierra. Los cuatro tipos, ilustrados en la Figura 2.3, son distinguidos de otros por el signo de la carga eléctrica llevada en el proceso de iniciación y por la dirección de propagación. Alrededor del 90 por

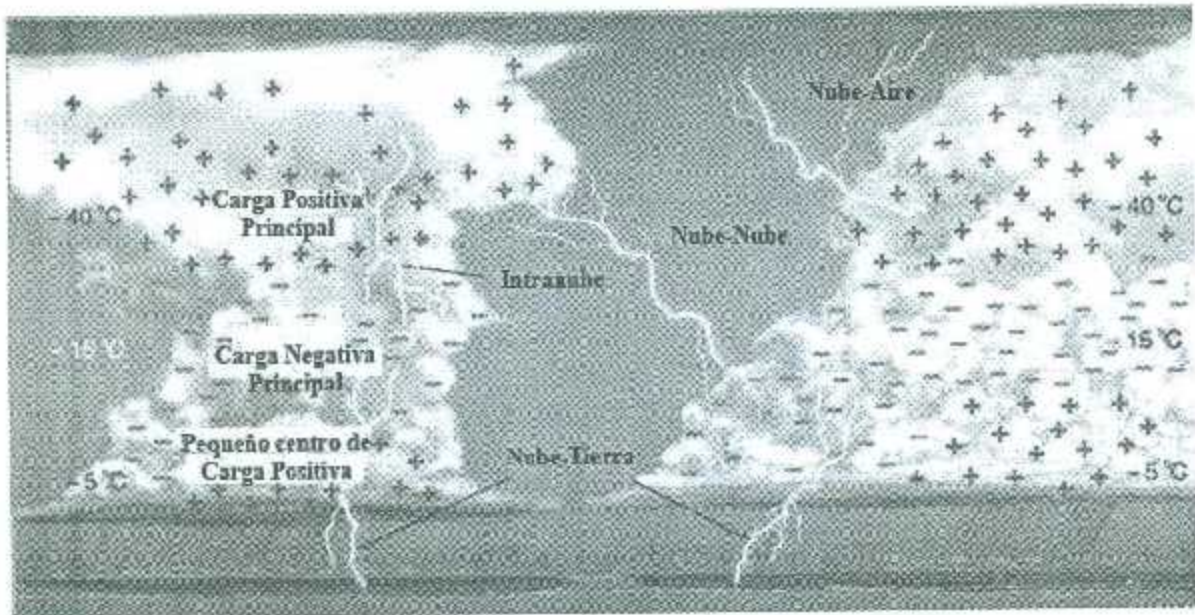


Figura 2.2: Estructura de la carga de dos simples nubes aisladas y algunas localizaciones donde las descargas pueden ocurrir. Modificado de [10].

ciento de los rayos nube-tierra son iniciados por una propagación descendente negativamente cargada "líder". Esto resulta en la disminución de la carga negativa de la región principal de carga negativa en la parte media de la nube a la tierra. Alrededor del 10 son iniciados por un líder de propagación descendente positivamente cargado, y resulta en la reducción de carga positiva de la nube a tierra, ya sea desde las regiones positivas de carga superior o inferior. Los dos tipos restantes de rayos nube-tierra (en realidad tierra-nube) son relativamente poco comunes y se inician hacia arriba desde las cumbres de montañas, torres artificiales altas u otros objetos altos, y a menudo hacia una de las regiones de carga de la nube.

2.1.3. Proceso de Descarga de una Nube

Una descarga de nube a tierra se compone de una o más descargas parciales intermitentes. Llamaremos a la descarga total (cuya duración está en el orden de 0,2 segundos) un "rayo" (flash); llamaremos a cada componente de la descarga (cuya fase luminosa es medida

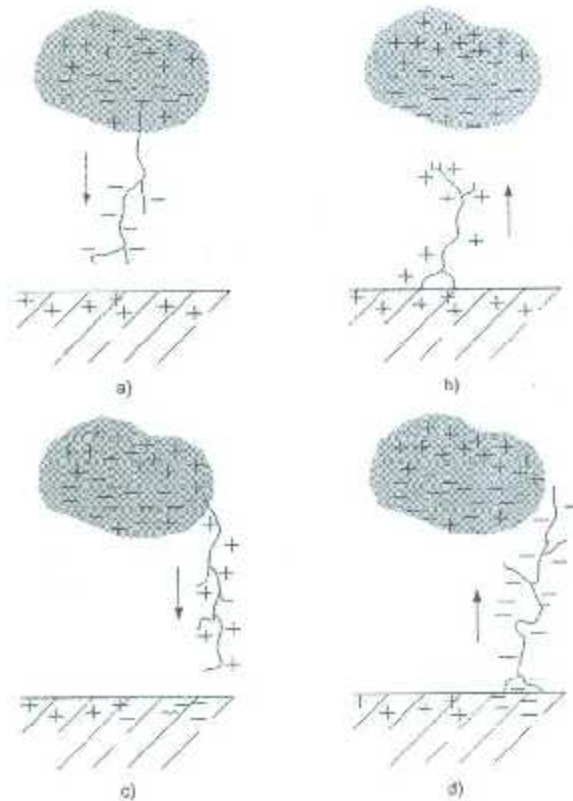


Figura 2.3: Los cuatro tipos de descarga nube-tierra definidos por la dirección de propagación y la carga en el líder. (a) Líder descendente negativamente cargado, (b) Líder ascendente positivamente cargado, (c) Líder descendente positivamente cargado, (d) Líder ascendente negativamente cargado.

en decenas de milisegundos) un “golpe” (stroke). Hay usualmente tres o cuatro golpes por rayo, estando separados los golpes por 40 milisegundos o menos. Algunas veces el rayo según lo observado por el ojo parece parpadear. En estos casos el ojo está diferenciando los golpes individuales que componen un rayo. Las descargas de nube a tierra normalmente descienden decenas de coulombs de carga negativa desde la región *N* de la nube a la tierra.

El Líder Escalonado

Cada golpe del rayo comienza con una débil pre-descarga luminosa, el proceso del *líder* que se propaga desde la nube a tierra y que es seguido inmediatamente por un muy luminoso

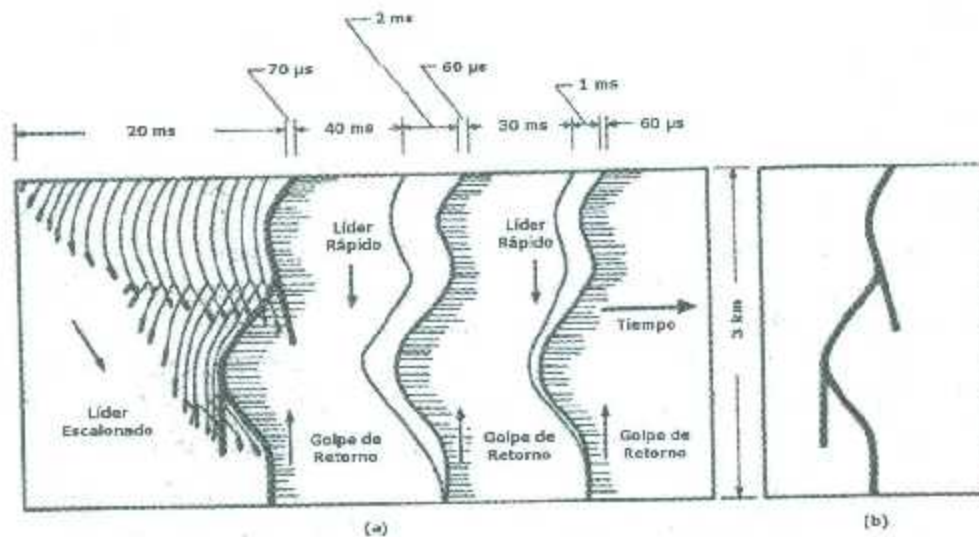


Figura 2.4: Proceso de descarga de una nube. (a) Características luminosas de un rayo como sería grabado por una cámara con lente fija y película en movimiento. (b) El mismo rayo como sería grabado con una cámara con película estacionaria. Modificado de [9].

golpe de retorno. El golpe de retorno se propaga desde tierra a la nube. La pre-descarga de nube a tierra precediendo el primer golpe de retorno en un rayo se llama el *líder escalonado*. El líder escalonado es considerado por muchos investigadores para empezar con una ruptura eléctrica local entre las regiones *N* y *p* de la nube de tormenta. Esta ruptura serviría para hacer móviles las cargas eléctricas que previamente fueron atrapadas en las partículas de agua y hielo. La fuerte concentración resultante de carga negativa dentro de la base de la nube producirá campos eléctricos que podrían entonces causar una columna negativamente cargada propulsada hacia abajo a tierra. Esta columna es llamada el "líder escalonado" (stepped leader) por que parece moverse hacia abajo en pasos luminosos de típicamente 50 m de longitud con un tiempo de pausa entre pasos de alrededor de 50 μs. La velocidad promedio típica de el líder escalonado durante su viaje hacia tierra es de $1,5 \times 10^5$ m/s. Este, por lo tanto, toma alrededor de 20 ms atravesar una distancia de 3 km.

Golpe de Retorno

Cuando el líder escalonado ha bajado una columna cargada de alto potencial negativo cerca de la tierra, el alto campo eléctrico resultante en tierra es suficiente para causar descargas de movimiento ascendente desde tierra hacia la punta del líder. Cuando una de estas descargas toca el líder, la parte inferior del líder es efectivamente conectado al potencial de tierra mientras el resto del líder está a un potencial negativo y negativamente cargado. La situación es algo similar a una línea de transmisión cargada a un potencial constante con un corto circuito aplicado en su final. El canal del líder actúa como una línea de transmisión (no lineal y con pérdidas) soportando un golpe de retorno muy luminoso. El frente de onda del golpe de retorno se propaga a una velocidad de típicamente de un tercio a un décimo la velocidad de la luz, haciendo el viaje entre la tierra y la base de la nube en un tiempo de $70 \mu\text{s}$. La región entre el frente de onda del golpe de retorno y tierra es atravesada por grandes corrientes.

El Líder Rápido

Después que la corriente del golpe ha dejado de fluir, el rayo puede haber terminado. Por otro lado, si hay disponible carga adicional en lo alto del canal, el rayo puede contener golpes adicionales. (El rayo es entonces denominado rayo de múltiples golpes) En general, cada golpe subsecuente aparece para drenar cargas desde las partes altas en la región N de la nube. Esta carga se pone disponible entre golpes por la acción de los llamados procesos "streamer-K" y "streamer-J", descargas eléctricas entre la parte alta del golpe de retorno previo y una región mayor de carga negativa. Si la carga adicional está disponible para el canal en descomposición del golpe de retorno en un tiempo menor que alrededor de 100 ms, un *líder rápido* atravesará ese canal de golpe de retorno, incrementando su grado de ionización, depositando carga a lo largo del canal, y transportando el potencial de la nube hacia tierra una vez más. El líder rápido por lo tanto, prepara el escenario para el segundo (o cualquier subsecuente) golpe de retorno. El líder rápido parece ser una sección luminosa del canal de alrededor de 50 m de longitud, que viaja suavemente a tierra en $2 \times 10^6 \text{ m/s}$,

un orden de magnitud más rápida que la velocidad promedio del líder escalonado.

2.1.4. Propiedades Electromagnéticas

Electrostática

La intensidad de campo eléctrico E a una distancia r desde una carga puntual positiva en aire o vacío es:

$$E = \frac{Qa_r}{4\pi\epsilon_0r^2} \quad (2.1)$$

donde a_r es un vector unitario dirigido a lo largo de r en dirección hacia afuera de la carga y ϵ_0 es la permitividad del vacío (que esencialmente es igual a la permitividad del aire). Si la fuente del campo fuera una carga puntual negativa, el campo sería dirigido hacia la carga y la Ecuación 2.1 tendría un signo negativo frente a su lado derecho. La Ecuación 2.1 también describe la intensidad de campo eléctrico afuera de una distribución de carga simétrica esférica de la carga total Q .

Se ha detectado por medición que en buen clima el vector campo eléctrico sobre la Tierra está dirigido hacia el centro de la Tierra. Esto es que, la Tierra está negativamente cargada, la atmósfera sobre la Tierra está positivamente cargada. En buen clima la intensidad de campo eléctrico en tierra es del orden de 100 V/m . En la mayoría de la literatura el campo eléctrico en buen clima es denominado un campo eléctrico positivo. Por lo tanto, se adoptará la siguiente convención: Un campo eléctrico en el suelo es definido como positivo si es debido a una carga positiva sobre el nivel del suelo, eso es, si el campo del vector está dirigido hacia la Tierra. Un campo eléctrico en el suelo es definido como negativo si es debido a una carga negativa sobre el nivel del suelo, eso es, si el campo del vector está dirigido hacia fuera de la Tierra. Ésta terminología será usada para discutir los campos eléctricos debidos a cargas de tormentas.

La configuración de la carga que se considera ahora servirá como la base para el cálculo del campo eléctrico en el suelo debido a las cargas de tormentas sobre la Tierra. En el

modelo que será usado la Tierra será tratada como una superficie plana conductora y los centros de las cargas de las tormentas como cargas puntuales o como cargas simétricas distribuidas esféricamente. Se desea calcular ahora la intensidad del campo eléctrico debido a una carga puntual positiva $+Q$ localizada a una distancia H sobre un plano conductor. Tal configuración es mostrada en la figura 2.5. Por el método de las imágenes eléctricas, el efecto de las cargas inducidas en el plano conductor puede ser reproducido al eliminar el plano y reemplazarlo con la imagen de una carga negativa $-Q$ localizada a una distancia H por debajo del plano. La magnitud de la intensidad del campo eléctrico en el nivel del plano y una distancia D bajo el plano debido a dicha carga es, por la Ecuación 2.2:

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0(H^2 + D^2)} \quad (2.2)$$

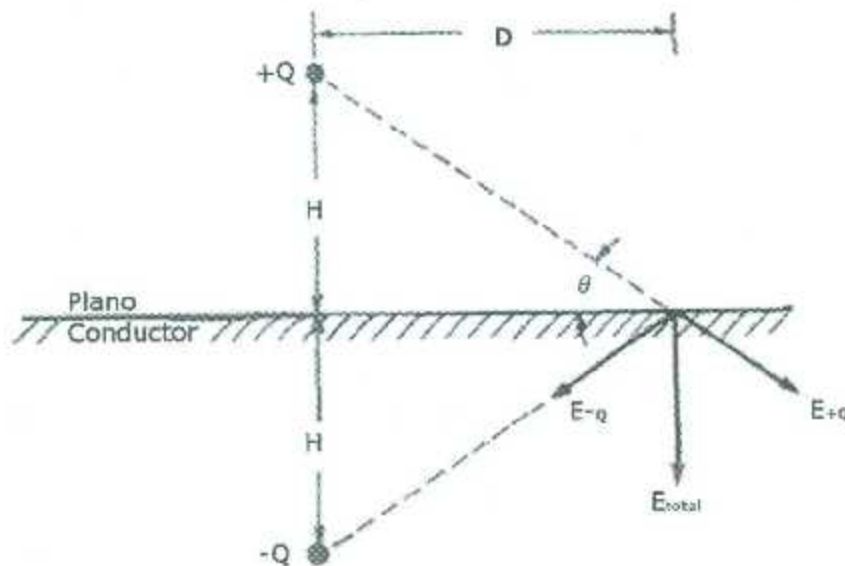


Figura 2.5: Diagrama para el cálculo de la intensidad de campo eléctrico en D debido a una carga puntual positiva $+Q$ a una altura H sobre un plano conductor. Modificado de [9].

El vector del campo eléctrico resultante de cada carga está sin embargo apuntando en una dirección diferente. El campo eléctrico total es obtenido por adición vectorial. Ambos campos eléctricos pueden ser descompuestos en sus componentes paralelas al plano y en sus

componentes perpendiculares al plano. Las componentes paralelas son de magnitud igual pero de direcciones opuestas y en consecuencia sumadas dan cero. Por lo tanto no existe campo eléctrico horizontal en el plano. (El campo eléctrico en cualquier superficie conductiva es siempre perpendicular a esa superficie.) Las componentes perpendiculares son ambas positivas, en el sentido mencionado en el párrafo anterior, y por lo tanto puede ser añadido directamente para obtener la intensidad de campo eléctrico total. La componente perpendicular del campo debida a cualquier carga puntual es encontrada al multiplicar el campo total debido a esa carga por $\sin \theta = H/(H^2 + D^2)^{1/2}$. Por lo tanto, la magnitud del campo eléctrico total es:

$$E_{total} = \frac{2QH}{4\pi\epsilon_0(H^2 + D^2)^{3/2}} \quad (2.3)$$

con una dirección perpendicular al plano y positiva.

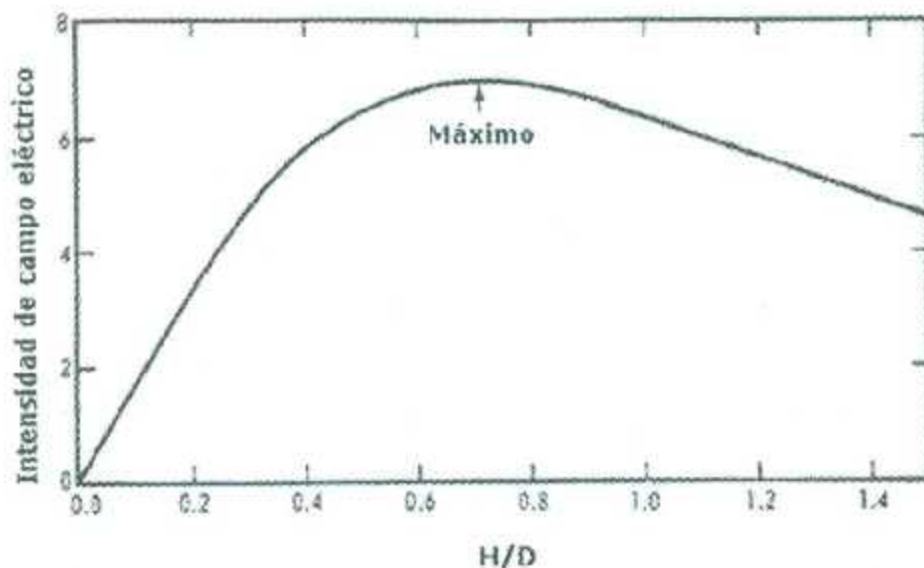


Figura 2.6: Intensidad de campo eléctrico para la configuración de carga dada en 2.5. Para obtener el campo eléctrico en volts por metro multiplicar el valor dado en la gráfica de tiempo $Q \times 10^9/D^2$. Modificado de [9].

Si la altura H de la carga $+Q$ es variada, el campo en D pasará a través de un máximo como se muestra en la figura 2.6. Podemos explicar la variación de este campo desde un punto de

vista físico. Si H es muy pequeño, el campo eléctrico en D tendrá una pequeña componente vertical (la componente vertical es el campo total) porque θ es pequeño. Conforme H se incrementa, la componente vertical se incrementa. El campo disminuirá para una H más grande porque la distancia desde la carga al punto de observación se incrementa. Se puede determinar el valor de H/D para el cual el campo es el máximo al tomar la derivada de E_{total} con respecto a H y ajustando que la derivada es igual a cero. El resultado es $H/D = 1/\sqrt{2}$.

Si D es mucho mayor que H , la ecuación 2.3 puede ser aproximada como

$$E_{total} \cong \frac{2QH}{4\pi\epsilon_0 D^3} = \frac{M}{4\pi\epsilon_0 D^3} \quad (2.4)$$

donde $M = 2QH$ es denominado el momento del dipolo eléctrico de la carga $+Q$ y su imagen. Si las mediciones del campo eléctrico son hechas a lo lejos de una tormenta, la medición de la variación de campo eléctrico debido a la destrucción de la carga de la tormenta (como, por ejemplo, su flujo al terreno en una descarga atmosférica), con conocimiento de D , y haciendo uso de la ecuación 2.4 permite el cálculo de la variación del momento del dipolo. Usando la Ecuación 2.1, es posible calcular la intensidad del campo eléctrico en el terreno debido a las tres regiones de carga, P , N , y p , dentro de un modelo de nube de tormenta. Los resultados de tales cálculos, para varios valores de p y con los valores de P y N sugeridos por Malán (1952, 1963), son mostrados en la Figura 2.1.4. La expresión analítica de la intensidad de campo eléctrico con las cargas y las alturas de carga dadas en la figura 2.1.4 es:

$$E = 1.8 \times 10^{10} \left[\frac{2 \times 10^3 p}{(4 \times 10^6 + D^2)^{3/2}} - \frac{2 \times 10^5}{(2.5 \times 10^7 + D^2)^{3/2}} + \frac{4 \times 10^5}{(10^8 + D^2)^{3/2}} \right] \text{ volts/m} \quad (2.5)$$

donde p es la menor carga positiva. Por motivo de su proximidad al terreno la menor carga positiva afecta significativamente el campo eléctrico en D pequeño. Nótese que en el

modelo de carga de nube usado, las regiones cargadas son tratadas como puntos o como cargas simétricas distribuidas esféricamente y se suponen una encima de la otra.

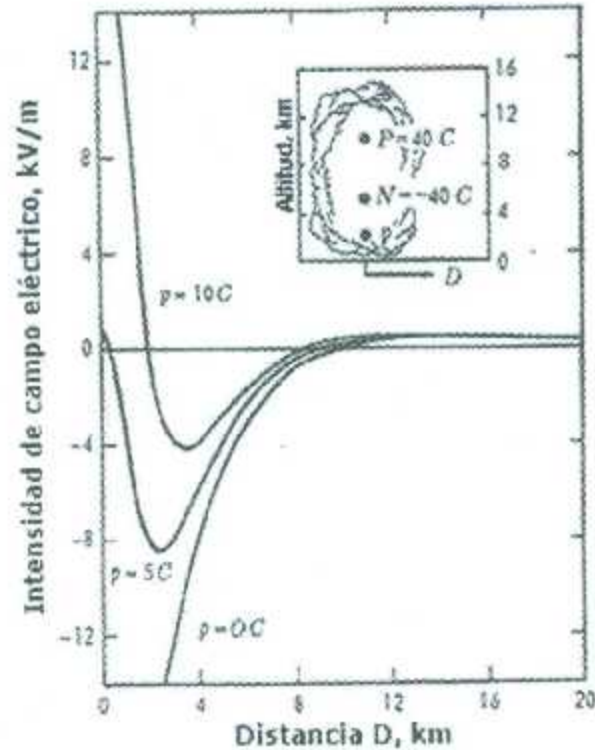


Figura 2.7: Intensidad de campo eléctrico en tierra vs la distancia para $P = 40 \text{ coul}$ a $10 - \text{km}$ de altura $N = -40 \text{ coul}$ a $5 - \text{km}$ de altura, y tres valores de p a $2 - \text{km}$ de altura. Modificado de [9].

El modelo de carga de nube que se ha empleado es útil para describir la relación entre la nube y el fenómeno del rayo. No necesariamente debe ser considerado una representación exacta de la distribución de cargas o las magnitudes de la carga dentro de la nube de tormenta real. Los valores de campo eléctrico para el modelo de nube de rayo encontrados de la Ecuación 2.5 no incluyen los efectos de la carga en el espacio entre la nube y el suelo, alrededor de la nube, o entre la nube y la ionosfera. Una medición actualizada dará el resultante del campo eléctrico de ambas, las cargas de las nubes y las cargas en el espacio. En general, los valores de carga en la nube son deducidos de mediciones de campo eléctrico asumiendo que los efectos de carga en el espacio son despreciables. No es conocido si esto

sea una suposición válida.

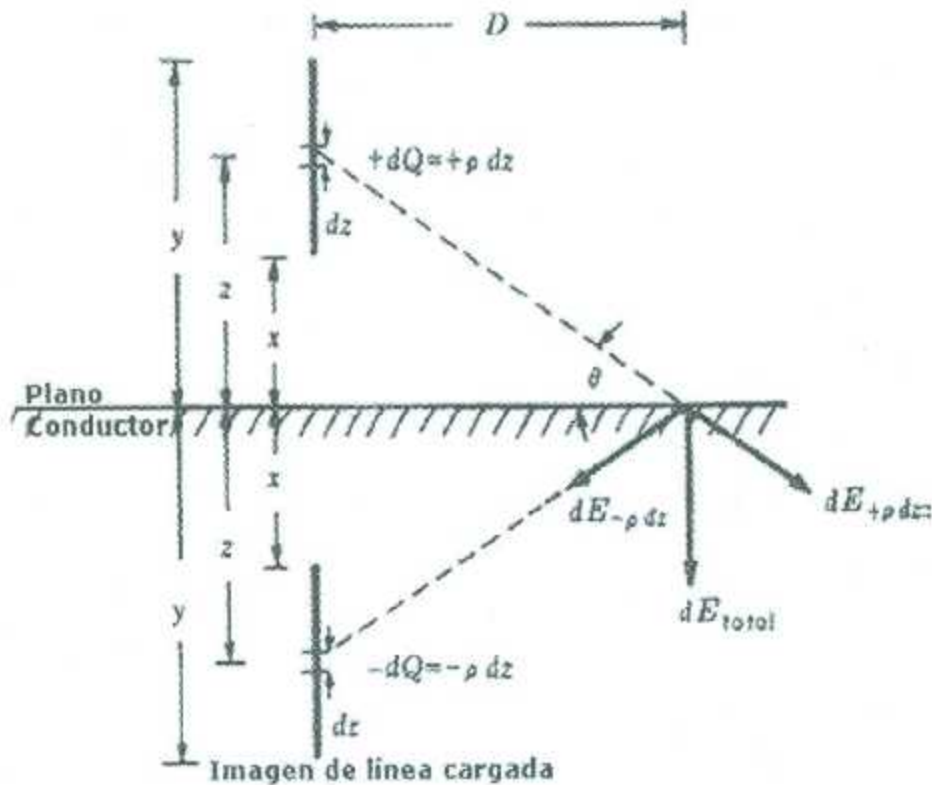


Figura 2.8: Diagrama para el cálculo de la intensidad de campo eléctrico en D debido a una línea cargada vertical de longitud $y-x$ con carga positiva y longitud en por unidad ρ localizada encima de un plano conductor. Modificado de [9].

Ahora se examinará un modelo para el proceso del líder del cual se puede calcular el campo eléctrico en el suelo debido al líder. Se ha idealizado al líder como una carga lineal vertical (o equivalente como una distribución de carga con simetría cilíndrica). En la Figura 2.8 se muestra una línea de carga positiva de longitud $y-x$ y carga por unidad de longitud ρ orientada verticalmente sobre un plano conductor. Ahora se considera el campo eléctrico en D debido a la línea de carga y su imagen eléctrica. El campo eléctrico debido a un pequeño elemento de carga ρdz dentro de la línea de carga es idéntico al campo desde una pequeña carga puntual. Así la magnitud del campo debido a la carga dentro de dz es:

$$dE_{+\rho dz} = \frac{\rho dz}{4\pi\epsilon_0(z^2 + D^2)} \quad (2.6)$$

El campo total debido a este elemento de carga y su imagen es:

$$dE_{total} = \frac{2\rho z dz}{4\pi\epsilon_0(z^2 + D^2)^{3/2}} \quad (2.7)$$

donde la dirección del campo es perpendicular al plano y positivo. El campo de toda la carga en la línea es encontrado por integración de la ecuación 2.7 desde $z = x$ a $z = y$

$$E_{total} = \frac{2\rho}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{(D^2 + x^2)^{1/2}} - \frac{1}{(D^2 + y^2)^{1/2}} \right] \quad (2.8)$$

Donde se ha supuesto que ρ es constante. Si la carga lineal fuese negativa, el campo en el suelo sería negativo, y la Ecuación 2.24 tendría un signo menos enfrente de su lado derecho. Si emergiera un líder positivamente cargado de un volumen de carga positivo, la carga del líder así como su longitud es extendida resulta en una disminución de carga en el volumen fuente. Si la longitud del líder es l , la altura de la carga fuente es H , y la carga fuente puede ser tratada como una carga puntual o como una distribución esféricamente simétrica, la variación de campo en el suelo debido a la disminución en la carga fuente es

$$\Delta E_s = -\frac{2\rho l H}{4\pi\epsilon_0(H^2 + D^2)^{3/2}} \quad (2.9)$$

A partir de que ρl es la cantidad de carga perdida por el volumen fuente. El campo fuente se ha vuelto menos positivo desde que la carga positiva es removida del volumen fuente; de aquí el signo negativo del lado derecho de la Ecuación 2.9. Si la fuente de la carga y la carga del líder fueran negativas, la variación del campo es debida a la disminución de la carga fuente sería positiva [9].

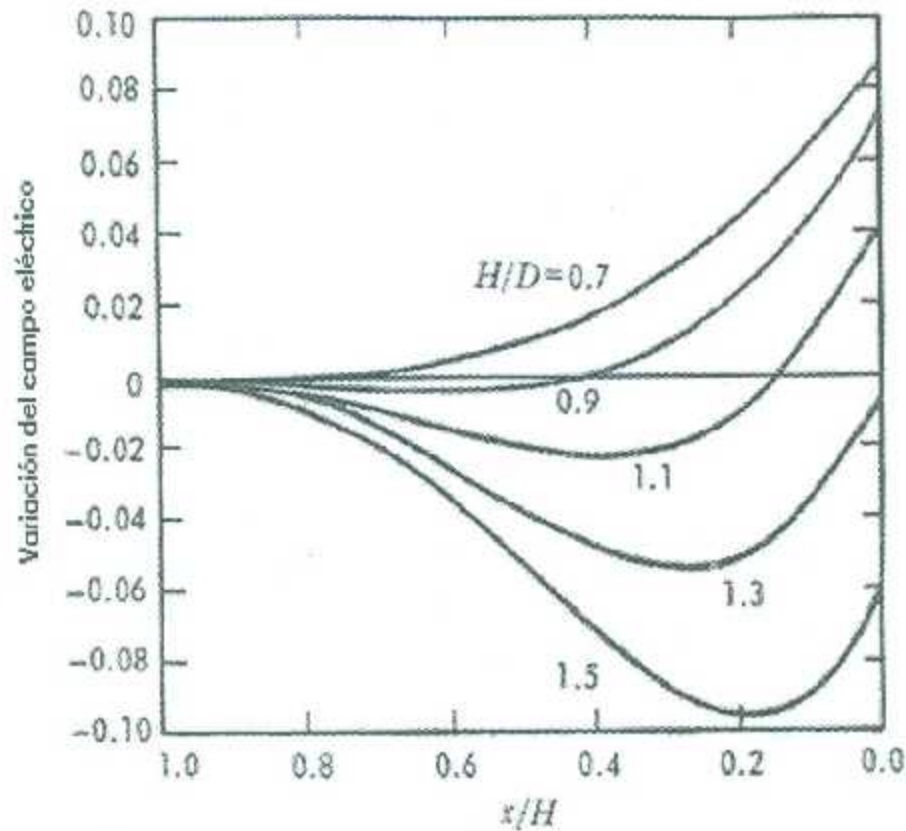


Figura 2.9: Variación del campo eléctrico para un líder negativo descendente desde una carga negativa centrada a una altura H . El factor x representa la altura de la punta del líder sobre el suelo. Multiplicar la variación de campo dado en los tiempos de la gráfica $\rho/2\pi\epsilon_0 D$ para obtener unidades mks de volts por metro. Modificado de [9].

Ahora se considera el caso de un líder negativamente cargado moviéndose debajo de un volumen esféricamente simétrico, negativamente cargado. Esta situación se aproxima a la existente en el líder rápido y en cierta medida en el líder escalonado. El final superior del líder está en H , en el centro de la carga fuente. A partir de la Ecuación 2.24 y $y = H$. En el caso en consideración $l = H - x$ [9]. La variación de campo total debido a la extensión del líder y la disminución de la carga fuente se puede escribir

$$\Delta E = -\frac{2\rho}{4\pi\epsilon_0 D} \left[\frac{1}{(1+x^2/D^2)^{1/2}} - \frac{1}{(1+H^2/D^2)^{1/2}} - \frac{H-x}{D} \frac{H}{D(1+H^2/D^2)^{3/2}} \right] \quad (2.10)$$

Donde $x = H$ en $t = 0$, el tiempo de la iniciación del líder. Conforme el tiempo aumenta, x disminuye hasta que el tiempo del líder toca el suelo, $x = 0$. La variación del campo calculado de la ecuación 2.10 está dada en la Figura 2.9 para varios valores de H/D . Si la velocidad v de la punta del líder es constante, la variable x en la Figura y en la Ecuación 2.10 puede ser reemplazada por $H - vt$; eso es, $l = vt$. Mediciones hechas cerca del líder deberían entregar inicialmente una variación de campo negativa; mediciones hechas a larga distancia deberían entregar una variación de campo positiva. La variación de campo cuando el líder toca el suelo es $x = 0$, debería ser cero para $H/D = 1,27$, negativo para valores más grandes de H/D , y positivo para valores mas pequeños de H/D . La variación de campo es medida como una función de tiempo debido a la cercanía del líder, debe existir una forma de gancho característico. Para líderes en los cuales $H/D \ll 1$ deben ser caracterizados por variaciones de campo las cuales son parabólicas como una función del tiempo si la velocidad de la punta del líder es constante. Para ver que esto es así, se expande la ecuación 2.10 asumiendo que $x = H - l$ es pequeño comparado a D y que $l = vt$ [9]. Si todos los términos de orden mayor que $(H/D)^2$ son ignorados, se encuentra

$$\Delta E \cong -\frac{\rho l^2}{4\pi\epsilon_0 D^3} = \frac{\rho v^2 t^2}{4\pi\epsilon_0 D^3} \quad (2.11)$$

Ahora se considera la variación de campo eléctrico asociado con un movimiento hacia abajo, líder positivamente cargado. Líderes positivos podrían posiblemente moverse hacia abajo de la región **P** hacia la región **N**, iniciándose una descarga intra-nube, o posiblemente puede pasar de cualquier región **P** o de la región hacia un terreno **p** para iniciar una descarga a tierra positiva [9]. La variación del campo es dada en la Ecuación 2.10 pero con signo opuesto

$$\Delta E = +\frac{2\rho}{4\pi\epsilon_0 D} \left[\frac{1}{(1+x^2/D^2)^{1/2}} - \frac{1}{(1+H^2/D^2)^{1/2}} - \frac{H-x}{D} \frac{H}{D(1+H^2/D^2)^{3/2}} \right] \quad (2.12)$$

La variación en el campo se muestra en la Figura 2.10 para la reducción de las cargas positivas son del tipo que esperaríamos de un examen de la Figura 2.5. En la Figura

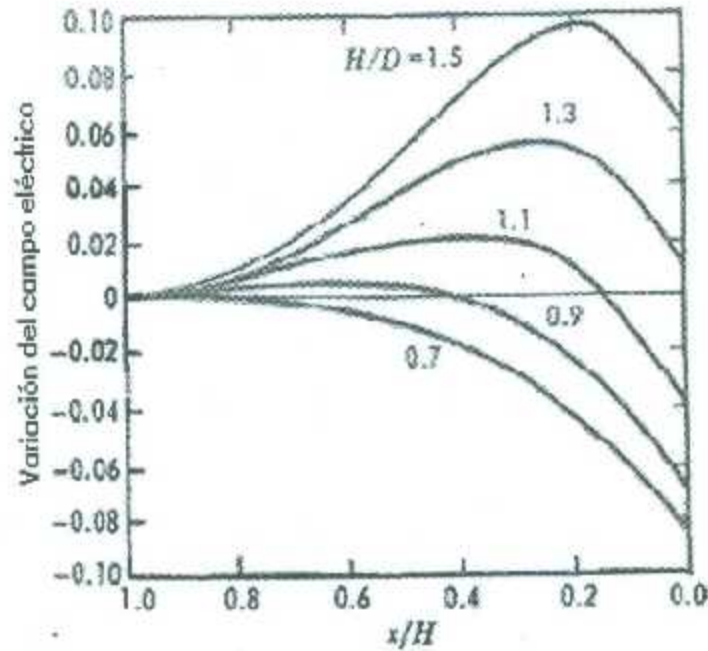


Figura 2.10: Variación del campo eléctrico para un líder positivo descendente desde una carga positiva centrada a una altura H . El factor x representa la altura de la punta del líder sobre el suelo. Multiplicar la variación de campo dado en los tiempos de la gráfica $\rho/2\pi\epsilon_0 D$ para obtener unidades mks de volts por metro. Modificado de [9].

2.6, conforme H/D disminuye desde un valor mayor de alrededor de 0.7, como una carga puntual o una carga esféricamente simétrica positiva es reducida y este proceso observado de cerca, el campo aumenta, alcanza un máximo, y después disminuye. En la Figura 2.6, la reducción de la carga positiva observada en distancias considerables resulta en un incremento del campo al máximo y entonces un subsecuente decremento. En la Figura 2.10, la reducción de carga positiva observada en una distancia considerable resulta en una disminución de campo monótona. Se concluye, entonces, que si bien hay algunas diferencias cuantitativas entre la variación del campo eléctrico debido al movimiento de una carga puntual y la variación del campo eléctrico debido al movimiento de una carga lineal fuera de una fuente de carga puntual, las características cualitativas de las variaciones de campo son las mismas [9].

Se considera ahora un líder negativo moviéndose hacia arriba del centro de una carga negativa. Un posible ejemplo de este tipo de descarga podría ser un líder moviéndose hacia arriba de **N** hacia la región **P** iniciando una descarga intra-nube. Para esta situación $x = H$ y $l = y - H$ en la Ecuación 2.24 y 2.9 [9]. La variación de campo está dada por

$$\Delta E = -\frac{2\rho}{4\pi\epsilon_0 D} \left[\frac{1}{(1+x^2/D^2)^{1/2}} - \frac{1}{(1+y^2/D^2)^{1/2}} - \frac{y-H}{D} \frac{H}{D} \frac{1}{(1+H^2/D^2)^{3/2}} \right] \quad (2.13)$$

Donde $y = H$ en $t = 0$, y y aumenta con el tiempo. En distancias cercanas la variación de campo inicial es positiva; en lejanas la variación de campo inicial es negativa, como se muestra en la Figura 2.11. La variación de campo mostrada en la Figura 2.11 puede ser cualitativamente predicha por un examen de la Figura 2.6 [9].

La variación de campo esperada para un movimiento hacia arriba, un líder positivo es mostrado en la Figura 2.12[9]. La expresión analítica para la variación de campo eléctrico es

$$\Delta E = +\frac{2\rho}{4\pi\epsilon_0 D} \left[\frac{1}{(1+x^2/D^2)^{1/2}} - \frac{1}{(1+y^2/D^2)^{1/2}} - \frac{y-H}{D} \frac{H}{D} \frac{1}{(1+H^2/D^2)^{3/2}} \right] \quad (2.14)$$

Un líder positivo en dirección hacia arriba podría posiblemente proceder de una descarga entre las regiones **p** y **N**, o entre la región **P** y la ionosfera, o entre la parte superior de un golpe de retorno y la región **N** [9].

Se considerará que un movimiento hacia abajo, negativamente cargado (y, de acuerdo a nuestro modelo, uniformemente cargado) el líder cuya variación de campo se da en la Ecuación 2.10 con $x = 0$ y $y = H$. El golpe de retorno quita la carga negativa del líder y por lo tanto causa una variación de campo positiva. El campo del líder el cual es destruido por el golpe de retorno está dado en la Ecuación 2.24 con $x = 0$ y $y = H$. La relación de la variación de estos dos campos está graficada en la Figura 2.13 como una función de H/D . Lejos de la descarga la relación se aproxima a uno. Cuando $H/D \ll 1$, la variación de campo del líder es esencialmente igual a la variación de campo causada por el movimiento de una carga puntual (igual a la carga del líder) desde H a la altura media de la carga

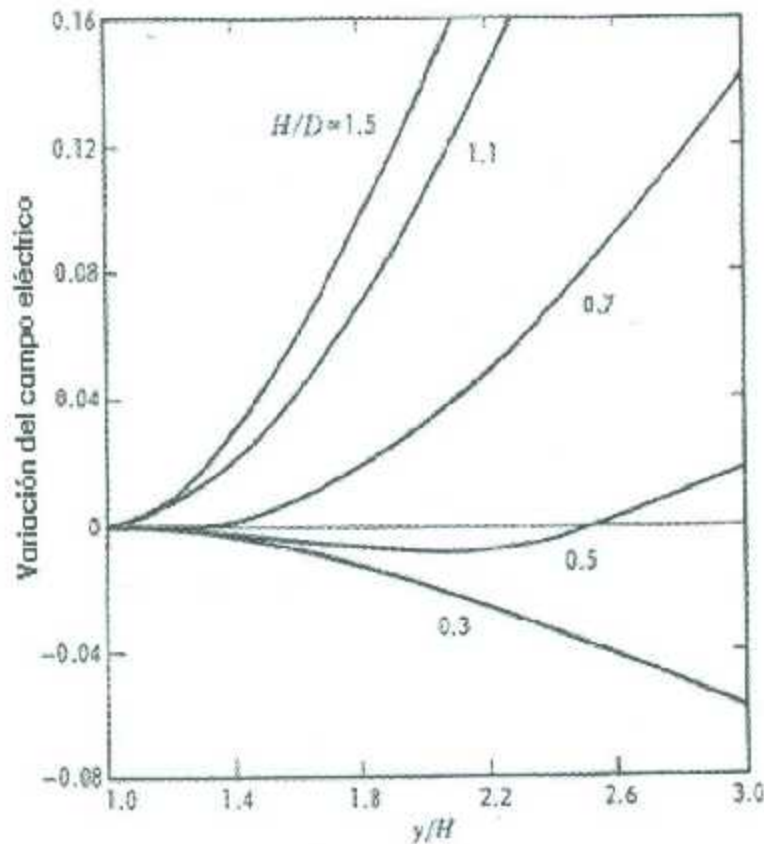


Figura 2.11: Variación del campo eléctrico para un líder negativo ascendente desde una carga negativa centrada a una altura H . La longitud del líder sobre el centro de la carga es $y - H$. Variaciones de campo eléctrico las cuales son negativas para un pequeño y/H se vuelven positivas para un gran y/H . Multiplicar la variación de campo dado en los tiempos de la gráfica $\rho/2\pi\epsilon_0 D$ para obtener unidades mks de volts por metro. Modificado de [9].

del líder ($H/2$ para un líder uniformemente cargado). La variación del campo del golpe de retorno es igual a la variación del campo causado por el movimiento de la carga puntual desde la altura media a tierra [9].

Dado que la relación de la variación de campo del proceso del líder a la variación de golpe de retorno es solo una función de D y H , una medición de la relación y el conocimiento de D hacen posible un cálculo de H , la altura del centro de la carga [9].

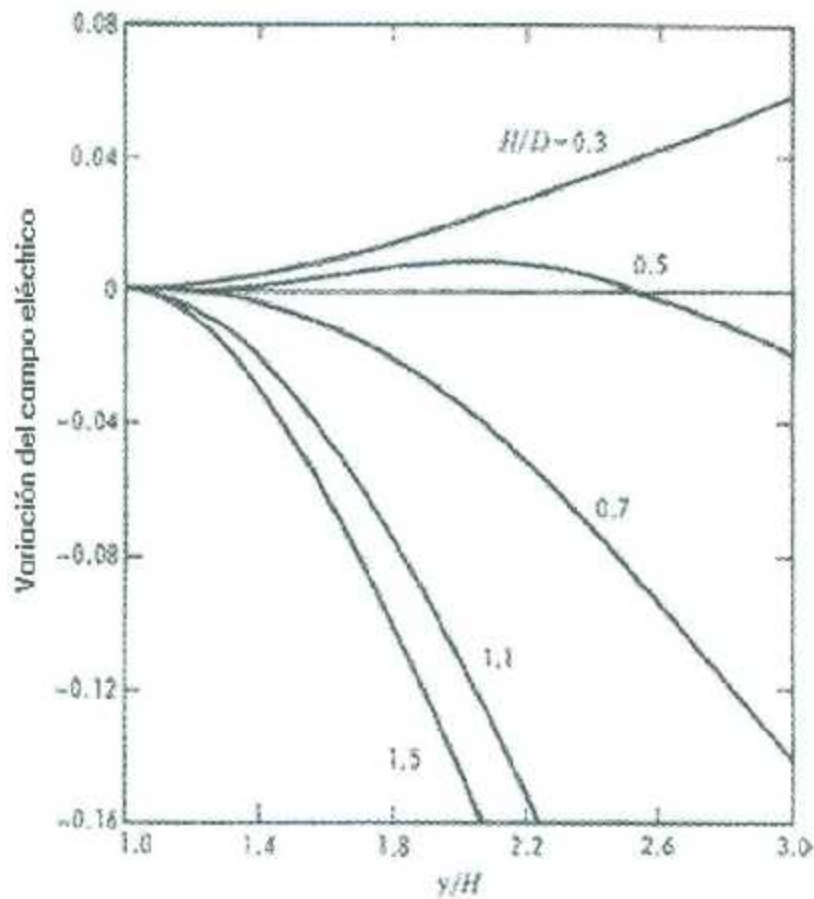


Figura 2.12: Variación del campo eléctrico para un líder positivo ascendente desde una carga positiva centrada a una altura H . La longitud del líder sobre el centro de la carga es $y - H$. Variaciones de campo eléctrico las cuales son positivas para un pequeño y/H se vuelven negativas para un gran y/H . Multiplicar la variación de campo dado en los tiempos de la gráfica $\rho/2\pi\epsilon_0 D$ para obtener unidades mks de volts por metro. Modificado de [9].

Magnetoestática

El movimiento de cargas dentro de una nube, o entre una nube y el suelo constituye una corriente eléctrica. Con esta corriente es asociado un campo magnético que puede medirse en el terreno. Vamos a considerar en esta sección un modelo simple para describir los efectos magnetostáticos debidos al flujo de corriente durante una descarga de un rayo. Idealizamos el flujo de corriente como vertical y concentrado en una línea portadora de

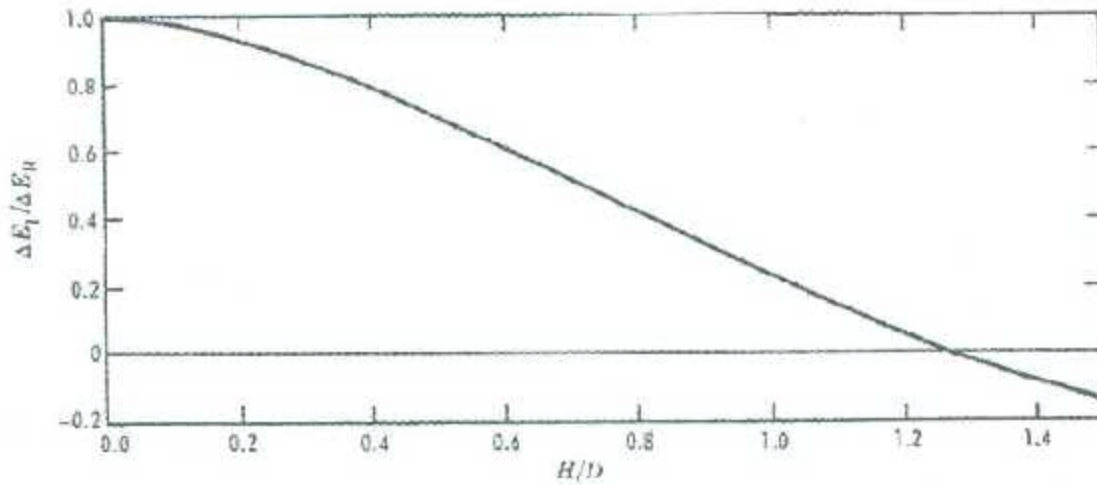


Figura 2.13: Relación de variación de campo eléctrico debido al líder que, debido al golpe de retorno vs la relación de la altura del centro de la carga a distancia horizontal desde el centro de la carga. Modificado de [9].

corriente (y su imagen por debajo del plano del suelo) como se muestra en la Figura 2.14 [9]. La densidad de flujo magnético dB a una distancia r de un pequeño elemento de longitud dz portando corriente I es

$$dB = \frac{\mu_0 I dz}{4\pi r^2} (a_l \times a_r) \quad (2.15)$$

donde a_r es un vector unitario dirigido hacia el exterior a lo largo de r , a_l un vector unitario en la dirección del flujo de corriente a través de dz , y μ_0 la permeabilidad del vacío (que es esencialmente igual a la permeabilidad del aire atmosférico). En unidades mks $\mu_0/4\pi \simeq 10^{-7}$. Si, como se muestra en la Figura 2.14, la corriente fluye verticalmente hacia arriba, entonces la densidad de flujo magnético del vector en D apunta dentro de la página [9]. La magnitud de la densidad de flujo magnético en D debido a $I dz$ es

$$dB = \frac{\mu_0 I dz}{4\pi} \frac{D}{(z^2 + D^2)^{3/2}} \quad (2.16)$$

Ya que

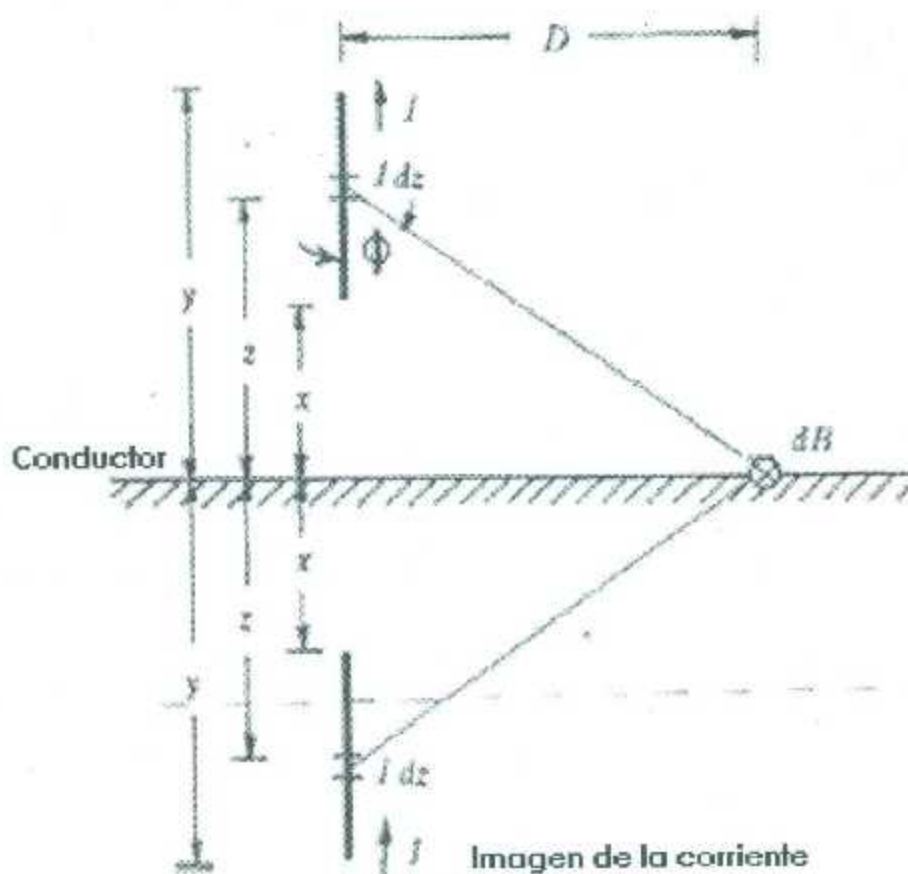


Figura 2.14: Diagrama para cálculo de densidad de flujo magnético. Modificado de [9]

$$|(a_I \times a_r)| = \sin\phi = \frac{D}{(z^2 + D^2)^{3/2}} \quad (2.17)$$

Para encontrar la magnitud de la densidad del flujo magnético total en D debido al flujo de corriente en la línea vertical de longitud $y - x$, integrar la ecuación 2.15 de $z = x$ a $z = y$ y se multiplica por 2 para tener en cuenta la corriente de la imagen con el resultado de que

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi D} \left[\frac{y}{(y^2 + D^2)^{1/2}} - \frac{x}{(x^2 + D^2)^{1/2}} \right] \quad (2.18)$$

El vector del campo apunta dentro de la página. Si la dirección de la corriente fuese

invertida, el vector de la densidad de flujo magnético sería dirigido hacia fuera de la página [9]. Si el flujo de corriente es entre un centro de carga a la altura H y el suelo ($y = H, x = 0$), la Ecuación 2.18 puede ser escrita

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi D} \frac{H}{(H^2 + D^2)^{1/2}} \quad (2.19)$$

Para el caso de que se hace una observación muy cerca de una descarga, $H \gg D$, la ecuación 2.19 se convierte en

$$B \cong \frac{\mu_0 I}{2\pi D} \quad (2.20)$$

Para el caso de que se hace una observación lejana de una descarga, $H \ll D$, la ecuación 2.19 se convierte en

$$B \cong \frac{\mu_0 I H}{2\pi D^2} \quad (2.21)$$

En la sección anterior hemos definido el momento dipolar eléctrico de una carga $+Q$ localizada a una distancia H por encima de un plano conductor y su imagen de carga como $M = 2QH$ [9]. Si la carga $+Q$ fluye a tierra, la corriente que fluye es igual a la tasa de cambio de la carga en la fuente, y por lo tanto, podemos escribir

$$\frac{dM}{dt} = 2IH \quad (2.22)$$

Si se combina la Ecuación 2.22 con la Ecuación 2.21, encontramos que

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi D^2} \frac{dM}{dt} \quad (2.23)$$

un resultado que se va a considerar de nuevo en la siguiente sección.

Electromagnética

En una descarga de un rayo habrá una variación considerable en la carga y la corriente en un intervalo de tiempo relativamente corto. Por consiguiente, consideramos ahora los campos electromagnéticos variables en el tiempo, asociados a la descarga del rayo [9].

Podemos asignar a la distribución de carga presente dentro de una nube de tormenta un momento dipolar eléctrico total. Es decir, podemos sumar los momentos dipolares debidos a cada carga individual o conglomerado de carga y su imagen para obtener un momento dipolar total

$$M = 2 \sum_i Q_i H_i \quad (2.24)$$

donde la suma es por encima de cada carga o conglomerado de carga sobre el suelo y los términos que involucran carga negativa son de signo negativo. Los campos eléctricos y magnéticos sobre el terreno en D, debido al momento dipolar y su variación con el tiempo pueden ser calculados de una manera sencilla si se hace una serie de suposiciones simplificadas. Sujetos a estas suposiciones, que se enumeran en un momento, las magnitudes de campo calculado son

$$E = \frac{[M]}{4\pi\epsilon_0 D^3} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c D^2} \frac{[dM]}{[dt]} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2 D} \frac{d^2 M}{dt^2} \quad (2.25)$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi D^2} \frac{[dM]}{[dt]} + \frac{\mu_0}{4\pi c D^2} \frac{[d^2 M]}{[dt^2]} \quad (2.26)$$

donde c es la velocidad de la luz y los valores de las cantidades entre paréntesis son los valores obtenidos en el tiempo retrasados ($t - D/c$). Para que la Ecuación 2.25 y la Ecuación 2.26 sean válidas, las siguientes condiciones deben cumplirse: (1) $D \gg H_i$, (2) la magnitud y la fase de la corriente resultante de la variación de M debe ser constante a lo largo de la trayectoria de la corriente, y (3) la H_i debe ser constante. Si estas condiciones

se cumplen en cierta aproximación, el problema del cálculo de los campos se reduce al problema de calcular el momento dipolar total como una función del tiempo [9].

El primer término en el lado derecho de la Ecuación 2.25 es llamado el término electrostático. Es esencialmente el mismo de la Ecuación 2.4 corregido por la velocidad de propagación del campo. El segundo término del lado derecho de la Ecuación 2.25 es llamado el término intermedio o el término de inducción del campo. Este término es proporcional a la corriente, representa un almacenamiento de energía reactiva, y, puesto que es proporcional a D^{-2} , mantiene una magnitud significativa a los valores más grandes de D que significa el término electrostático. Los últimos términos de la derecha de la Ecuación 2.25 y de la Ecuación 2.26 son los términos de la radiación. Ellos representan la energía propagada lejos de la fuente a la velocidad de la luz y son proporcionales a la relación de tiempo del cambio de la corriente. Los términos de radiación son importantes para grandes valores de D , en la que los restantes términos de la Ecuación 2.25 y la Ecuación 2.26 pueden ser ignorados. El primer término en el lado derecho de la Ecuación 2.26 es llamado el término magnetostático. Es esencialmente la misma ecuación (4.23), corregida por la velocidad de propagación del campo. De todos los términos que figuran en la Ecuación 2.25 y la Ecuación 2.26 sólo el término electrostático tiene un valor distinto de cero antes y después de la descarga del rayo [9]. El campo electrostático es el campo eléctrico dominante en unos 10 km desde la descarga si la frecuencia eficaz de la variación de campo en estudio no supera unos pocos kHz. Si las mediciones se realizan a menos de unos 10 km, la condición (1) no se cumple y por lo tanto la Ecuación 2.25 no es válida. Las ecuaciones pertinentes de electrostática deben ser usadas aunque estas también pueden ser inexactas si el movimiento de carga es rápido. Del mismo modo, la Ecuación 2.25 no es válida para las mediciones realizadas cerca de una descarga, y la aproximación magnetostática no puede ser válida si los cambios de corriente son rápidos. A distancias superiores a 100 km la radiación de campo es dominante. En distancias intermedias todos los componentes de campo pueden contribuir significativamente a la totalidad del campo. En la Figura 2.15 la forma cualitativa esperada de los tres componentes del campo eléctrico es mostrada

para un golpe de retorno que lleva carga negativa a tierra. El golpe de retorno provoca un aumento monótono en M . También lo que se muestra en la Figura 2.15 es el esperado campo eléctrico total debido a un golpe de retorno en función de la distancia [9].

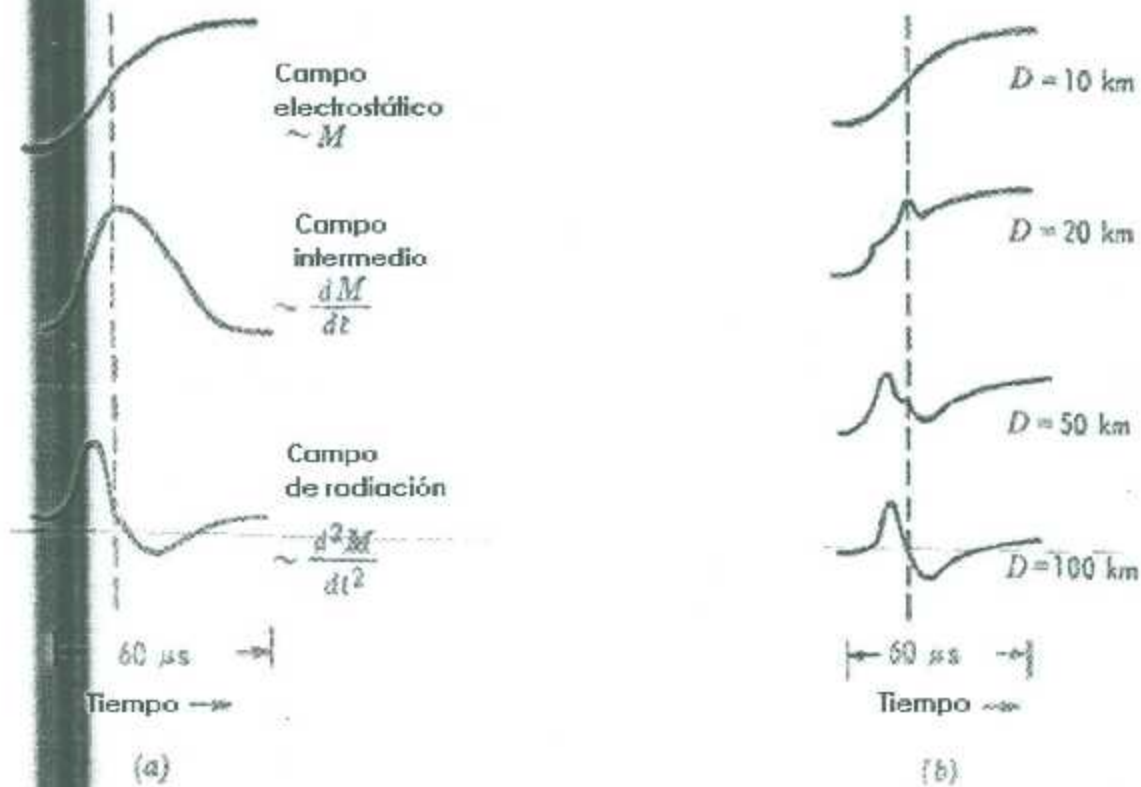


Figura 2.15: Diagrama para el cálculo de la intensidad de campo eléctrico en D debido a una línea cargada vertical de longitud $y - x$ con carga positiva y longitud en por unidad ρ localizada encima de un plano conductor. Modificado de [9]

2.2 La Radiación Óptica de los Rayos

Las observaciones ópticas de los rayos tienen una larga tradición. Varias técnicas e instrumentos han sido desarrollados y usados exitosamente en la investigación de la física del rayo. La localización en tierra del rayo para grandes regiones, sin embargo, es preferentemente realizada en las bandas inferiores de las ondas de radiofrecuencia, puesto

que cualquier observación óptica se ve obstruida fácilmente por obstáculos y el rango de detección está restringido a la línea de visión, por lo tanto limitado por la curvatura de la tierra [11].

2.2.1. Emisión Óptica y Características Espectrales

Las fuentes de radiación óptica son los múltiples procesos de descarga eléctrica con fase luminosa, principalmente los golpes de retorno en las descargas nube-tierra y los procesos *K* en las descargas intranube. La señal óptica irradiada de todos estos procesos puede ser caracterizada por su contenido espectral, la forma del pulso en el tiempo y geometría espacial. Observaciones de las características ópticas de la fuente de rayos fueron hechas por cámaras de pasos, foto detectores desde tierra y a bordo de aviones [11].

El fuerte flujo de corriente eléctrica en el canal conductor del rayo disipa energía térmica por calentamiento óhmico. Este, siendo un proceso de retorno positivo calienta el aire hasta 30,000 K en el centro del canal. Posteriormente, el canal sobrecalentado se enfría por radiación, expansión y convección [11].

Espectro

El espectro óptico del rayo en el rango visible y cercano infrarrojo está hecho de líneas espectrales de los excitados e ionizados gases del aire. Orville y Henderson (1984) analizaron el espectro en el rango de longitud de onda de 375 – 880nm de observaciones en tierra de 10 golpes de retorno a distancias de 15km [11].

Una de las pocas líneas fuertes muy por encima del fondo continuo es el oxígeno atómico OI(1) línea del tríptico encontrado en el cercano infrarrojo a 777,4nm con un anchura total menor a 0,5nm. Esta línea está siendo usada para la detección de rayos desde el espacio. Este contiene alrededor del 6 por ciento de la energía total del espectro óptico del rayo [11].

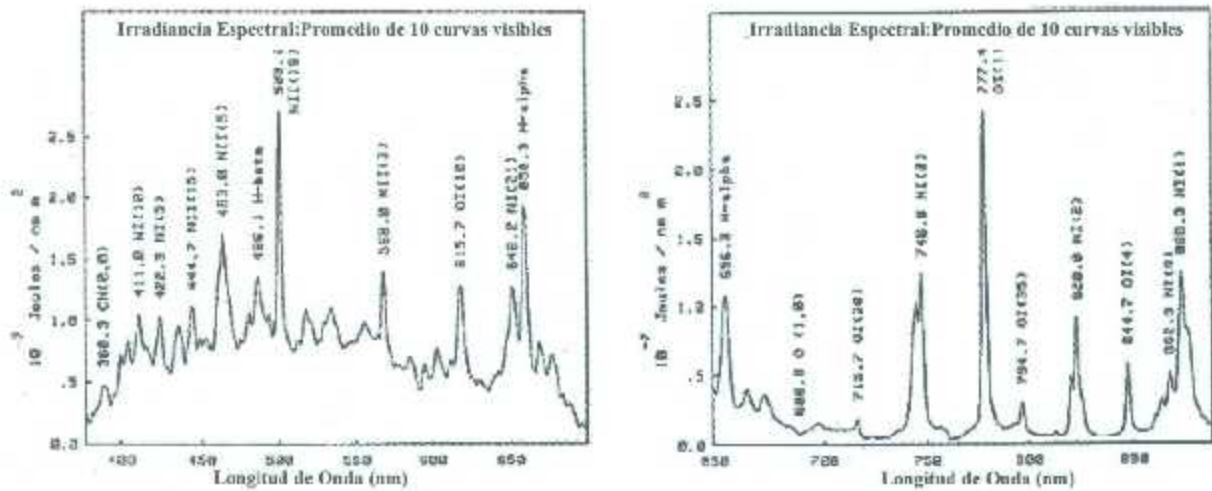


Figura 2.16: Irradiancia espectral del rayo en el visible y cercano rango infrarrojo. La curva muestra el espectro promediado de 10 golpes. Note las líneas de emisión dominante y el bajo fondo continuo en el cercano infrarrojo. Modificado de [11]

Forma y Potencia del Pulso Óptico

El pulso óptico observado de un golpe de retorno es producido por la superposición de las fuentes a lo largo del canal. El tiempo de subida del pulso es determinado por la velocidad de propagación de la fase luminosa del canal, por ejemplo, la velocidad de subida del golpe de retorno, que está en el orden de 10^8 m/s. La duración del pulso óptico está determinada por los procesos de enfriamiento en el canal del rayo. Mediciones ópticas de alta resolución hechas por Guo y Krider (1982) encontraron un tiempo de subida promedio de $15 \mu\text{s}$ y ancho medio de $158 \mu\text{s}$ para golpes de retorno [11].

La potencia óptica del rayo varía fuertemente entre los "flashes" individuales y para los diferentes tipos de rayos. La potencia escala con la longitud del canal, pero también cambia con la altitud. Guo y Krider (1982) derivan de observaciones en tierra en el rango de 400–1000 nm un tiempo promediado de potencia de $1,3 \times 10^9$ W/m para primeros golpes. Valores pico de potencia para todo el canal fueron encontrados en el orden de 2×10^9 W para primeros golpes. Los golpes subsiguientes tienden a tener menores valores de potencia de alrededor de la mitad de la magnitud [11].

Para la energía óptica, definida como la potencia integrada sobre la duración del pulso, un valor medio de $3.7 \times 10^5 \text{ J}$ fue calculada en Guo y Krider (1982) para los primeros golpes de retorno. Esta energía óptica representa cerca del 1% de la energía total de entrada en el rayo [11].

Para las descargas de nube la función de la fuente es menos conocida, debido a la falta de observaciones únicas. Las mediciones hechas en aeronaves reportadas por Christian y Goodman (1987) y más recientemente por Mach et al. (2005) y observaciones satelitales a bordo del FORTE (Kirkland et al., 2001) permitieron la estimación de la fuente de potencia. Generalmente, las descargas intranube irradian menor potencia óptica, pero contienen más pulsos por rayo y tienen más larga duración (Goodman et al., 1988) [11].

2.2.2. Dispersión de la Luz en las Nubes

La fuente de pulsos ópticos es transformada a lo largo de su camino a través de la atmósfera. Para observaciones desde una órbita satelital el proceso relevante es la dispersión de la onda de luz por las partículas de la nube. La dispersión del cercano infrarrojo y la luz visible por hidrometeoros muestran una pequeña absorción y es casi conservación de la energía. Consecuentemente, toda la energía óptica del rayo es finalmente transportada a través de una de las superficies de la nube [11].

Los efectos de la dispersión múltiple en un pulso óptico desde el rayo han sido estudiados teóricamente y numéricamente usando simulaciones Monte Carlo (Thomason y Krider, 1982, Koshak et al., 1994, Light et al., 2001) con los siguientes resultados principales:

- La posición vertical de la fuente del rayo en la nube determina la partición de la energía entre la superficie superior e inferior. Esta partición depende linealmente de la distancia a las superficies.
- La luz desde una fuente debajo de la nube es reflejada en gran parte en la superficie mas baja de la nube y no penetra en ella. Por lo tanto, la radiación vista desde arriba

se origina predominantemente de una descarga intranube y de las partes dentro de la nube de los golpes de retorno de nube a tierra.

- El pulso óptico es retrasado y ampliado según la trayectoria óptica de los fotones.
- El patrón de distribución de radiación en la superficie superior de la nube es agrandado en proporción a la distancia de la fuente a la superficie.

2.2.3. Características del Pulso Óptico en la Superficie de la Nube

Mientras el espectro está casi sin cambios, las otras características están fuertemente determinadas por la múltiple dispersión [11].

Un cálculo directo requerirá la geometría de la fuente, la intensidad de la fuente óptica y también los parámetros de dispersión de la nube, todos los parámetros en gran parte desconocidos. Por lo tanto, la señal está caracterizada basada en observaciones hechas sobre las nubes desde el aeroplano U-2 a una altitud de 20 km y satélite. Estas observaciones tienen buena consistencia con las simulaciones de dispersión [11].

El **patrón espacial** es borroso por dispersión a un tamaño de 5 – 10 km. Goodman et al., (1988) nota de sus observaciones de U-2 que el área de la nube iluminada tiene un promedio menor que 50 km^2 . Un patrón casi circular con disminución de radiación radial es observada mientras la extensión horizontal de la fuente del rayo es menor a la ampliación de la dispersión. Esto está también confirmado por análisis estadísticos de la información de imágenes desde el espacio [11].

La **función de tiempo** del pulso óptico está retrasado y ampliado por los procesos de dispersión. El tiempo típico de viaje desde la fuente a la superficie está en el orden de $100 \mu\text{s}$, por ejemplo, más grande que el tiempo de crecimiento típico del canal de descarga. Por lo tanto la función de tiempo de la señal saliente esta determinada por el proceso de dispersión. Esto es confirmado por observaciones desde aeronaves y satélites. Las estadísticas de estas observaciones producen un tiempo de subida promedio de $150 \mu\text{s}$ y un ancho

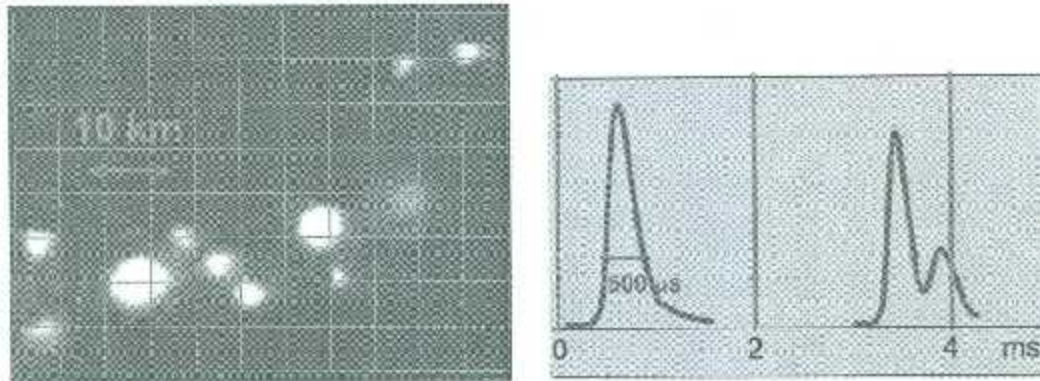


Figura 2.17: Patrón espacial y forma de pulso idealizado de un pulso de rayo en la superficie de la nube. La malla superpuesta y los lapsos de tiempo marcan el muestreo que es aplicado en los detectores de rayos de la NASA. Modificado de [11]

promedio de pulso de alrededor de $400 - 500 \mu S$ [11].

Para la densidad de energía de **radiación** de la señal en la línea de $777,4 \text{ nm}$ Goodman et al., (1988) observó de las mediciones del U-2 una densidad de energía promedio de $3 \times 10^{-6} \text{ Jm}^{-2}\text{sr}^{-1}$. Christian y Goodman (1987) reportaron, que el 90% de los rayos tienen pulsos ópticos con una densidad de energía mayor que $4,7 \times 10^{-6} \text{ Jm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ (a $868,3 \text{ nm}$). La radiación media fue $7 \times 10^{-3} \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$, mientras la radiación solar reflejada desde las nubes en el mismo intervalo de longitud de onda puede ser tan larga como $380 \times 10^{-3} \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ si se asume un albedo de 1 [11].

2.3. Localización de Descargas Atmosféricas

2.3.1. Localización RF

El rayo se comporta como una fuente de ondas EM que se propagan en la atmósfera en diferentes bandas de radiofrecuencia, se puede decir que es un radiador del tipo isotrópico. Entonces al existir un emisor de radiación EM, se utiliza un receptor de ondas EM (antena) para capturar esta energía y poder definir su procedencia.

En resumen todos los procesos de descarga del rayo producen radiación pero en distintos

rangos de frecuencia. Durante los procesos de ruptura e ionización (la mayoría de los líderes y streamers), hay fuertes emisiones en la banda VHF. Cuando se presentan altas corrientes en los canales previamente ionizados (la mayoría de los golpes de retorno y de la etapa activa de las descargas intra-nube), las más altas emisiones ocurren en la banda LF y VLF [12]. En la Tabla 3.1 se muestran las diferentes bandas de radiofrecuencia dentro del espectro electromagnético.

Tabla 2.1: *Bandas de radiofrecuencia.*

Frecuencia	Siglas	Rango	λ
Extra baja	ELF	3 - 30 Hz	$10^8 - 10^4$ km
Súper baja	SLF	30 - 300 Hz	$10^4 - 10^3$ km
Ultra baja	ULF	300 - 3000 Hz	$10^3 - 10^2$ km
Muy baja	VLF	3 - 30 kHz	$10^2 - 10$ km
Baja	LF	30 - 300 kHz	10 - 1 km
Media	MF	300 - 3000 kHz	1 - 0.1 km
Alta	HF	3 - 30 MHz	100 - 10 m
Muy alta	VHF	30 - 300 MHz	10 - 1 m
Ultra alta	UHF	300 - 3000 MHz	1 - 0.1 m
Súper alta	SHF	3 - 30 GHz	100 - 10 mm
Extra alta	EHF	30 - 300 GHz	10 - 1 mm

Las amplitudes de un "spheric" de un golpe de retorno, ya sea de banda ancha o banda estrecha, normalmente están distribuidas logarítmicamente cuando las señales individuales están expresadas en decibelios en relación a la mediana. La desviación estándar es de alrededor de 7 dB. Por lo tanto la mediana de la señal para $D = 100\text{km}$ es 4Vm^{-1} , pero 10% de los pulsos recibidos excederán los 12Vm^{-1} . Las tormentas individuales producen pulsos consistentemente más grandes o menores por un factor de dos o más que los de una tormenta uniforme [13].

Los localizadores de descargas por medio de radiofrecuencia, se fabrican utilizando distintas tecnologías y frecuencias, pero se pueden agrupar en dos tipos:

- Sistemas multi-estación
- Sistemas de estación única

Aunque las características primordiales entre los dos sistemas son similares, la diferencia entre ambos sistemas radica en el número de estaciones que utiliza cada uno, mientras que los sistemas multi-estación requieren de 2 o más receptores para calcular la posición del PEM, los sistemas de estación única emplean solamente un receptor.

Tiempo de Llegada (TOA)

Los eventos son localizados usando las diferencias en el tiempo de llegada de las señales electromagnéticas. Las señales EM viajan desde la fuente a la antena a la velocidad de la luz. Las diferencias entre los tiempos de llegada pueden ser convertidas en diferencias de distancia desde la fuente a cada sitio.

Los sensores usan la diferencia del tiempo de llegada del pulso eléctrico en tres estaciones para construir hipérbolas que se intersectan que únicamente localizan la descarga atmosférica. Los sensores TOA detectan y reportan virtualmente todas las descargas nube-tierra dentro de un rayo.

En cada sitio de antenas, hay dos antenas, una que detecta los campos eléctricos generados y otra que recibe las señales de tiempo generadas por sistemas de GPS [14].

Cada par de sensores produce una curva hiperbólica que describe el conjunto de ubicaciones posibles latitud/longitud (lugar geométrico de puntos) que satisfacen la diferencia de tiempo de llegada ($S_i - S_j$) entre el par de sensores, como se muestra en la figura 2.18.

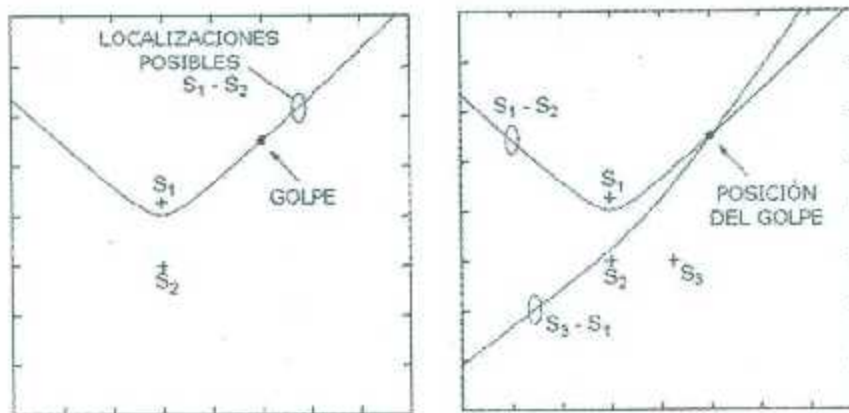


Figura 2.18: Intersección hiperbólica. Modificado de [15].

Dadas dos curvas producidas por tres sensores, es posible determinar la posición de la intersección de estas curvas [15].

Interferometría

Las emisiones de larga duración en VHF con modulación de amplitud pequeña se ajustan bien para la interferometría. Cada sensor consiste en un arreglo de dipolos espaciados cercanamente, dispuestos de manera de producir la dirección de arribo (acimut) de la fuente mediante el empleo de las diferencias de fase entre pares de dipolos, típicamente integrado por decenas de μS . También es posible obtener ubicaciones 3D mediante interferometría derivando un ángulo de elevación mediante arreglos de antena especial. La ubicación de origen entonces se obtiene computando la triangulación del acimut o elevación de al menos 2 sensores. Para dichas redes, la típica distancia entre sensores está en el rango de 50-150 km y están compuestas de al menos 3 sensores [16].

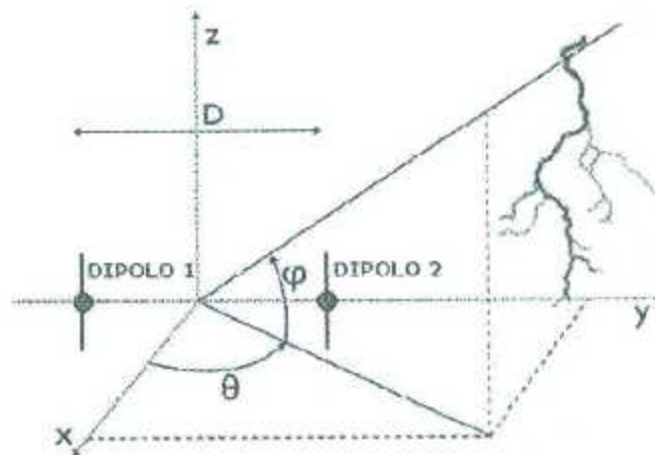


Figura 2.19: Sistema coordenado para un par de dipolos interferométricos espaciados, iluminados por una onda monocromática. El acimut de la fuente θ y el ángulo de elevación φ están representados. Modificado de [17].

Goniometría de Campo Magnético (MDF)

Esta técnica hace uso de la ley de Lenz de inducción electromagnética para obtener la dirección de la fuente. Para esto, son usados dos lazos magnéticos verticales, posicionados ortogonalmente entre sí, orientados a lo largo de las direcciones N-S y E-O. Fue demostrado por Lenz que la magnitud de la tensión inducida puede escribirse como:

$$\epsilon = -N \frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d(BA \cos\eta)}{dt} = -N \left[A \cos\eta \frac{dB}{dt} + B \cos\eta \frac{dA}{dt} + BA \frac{d(\cos\eta)}{dt} \right] \quad (2.27)$$

El primer término en el lado derecho representa el cambio en el campo magnético, el segundo término el cambio del área del lazo. El último término representa el cambio en la orientación del lazo con respecto al campo magnético B . Los últimos dos términos son cero, mientras A y η son constantes. Por lo tanto, un lazo cuyo plano está orientado $N-S$ recibe una señal máxima de la fuente si la fuente está norte o sur de la antena, por ejemplo, $\cos(\eta = 0^\circ) = 1$, mientras el lazo ortogonal en dirección $E-O$ no recibe señal, por ejemplo, $\cos(\eta = 90^\circ) = 0$. Por consiguiente, el rango de la señal de los dos lazos es proporcional a la tangente del ángulo entre el norte y la fuente. Un conjunto de sensores MDF son capaces de localizar la posición de la descarga atmosférica [17].

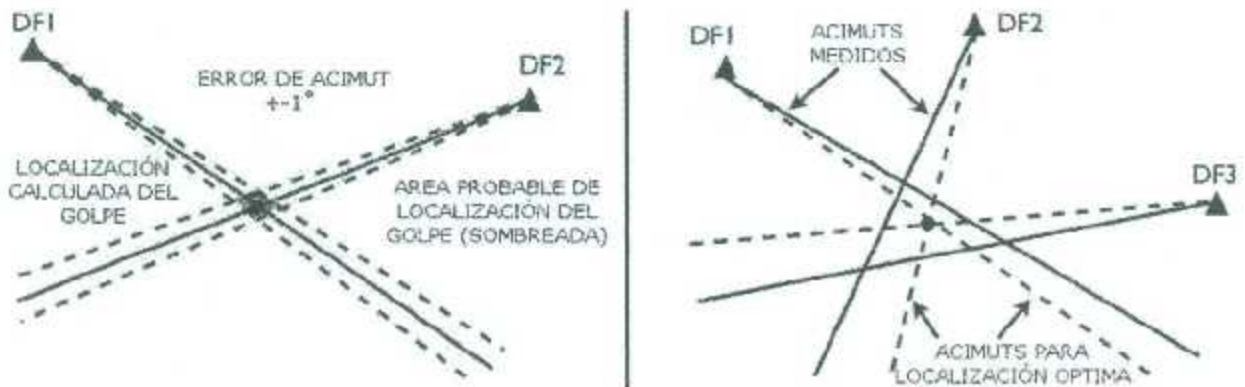


Figura 2.20: Determinación de la localización del golpe de la descarga cuando dos (izquierda) y tres (derecha) goniómetros (DF's) detectan el golpe. Modificado de [17].

Intensidad de Señal (RSS)

El método de intensidad de señal, es empleado en sistemas de estación única (móviles o fijas), que por su tamaño son utilizados en aplicaciones aéreas y terrestres, por ejemplo, en la construcción, deportes al aire libre, aeronaves, etc., pero a diferencia de los sistemas multi-estación, estos no proveen información suficiente para ser empleados en cuestiones de seguridad e investigación, como puede ser en: aeropuertos, centros meteorológicos o áreas clasificadas. Este tipo de equipos utilizan una antena goniométrica para determinar la dirección de llegada del PEM y una consola que procesa las señales y define la distancia a la fuente de interferencia. Al generarse el PEM en la base del rayo y propagarse a través de la atmósfera, produce un acoplamiento inductivo en el lugar en donde se encuentra el receptor, estas antenas por sus dimensiones en general, pueden ser de lazos cruzados, dipolos, etc., en la figura 2.21 se muestran:

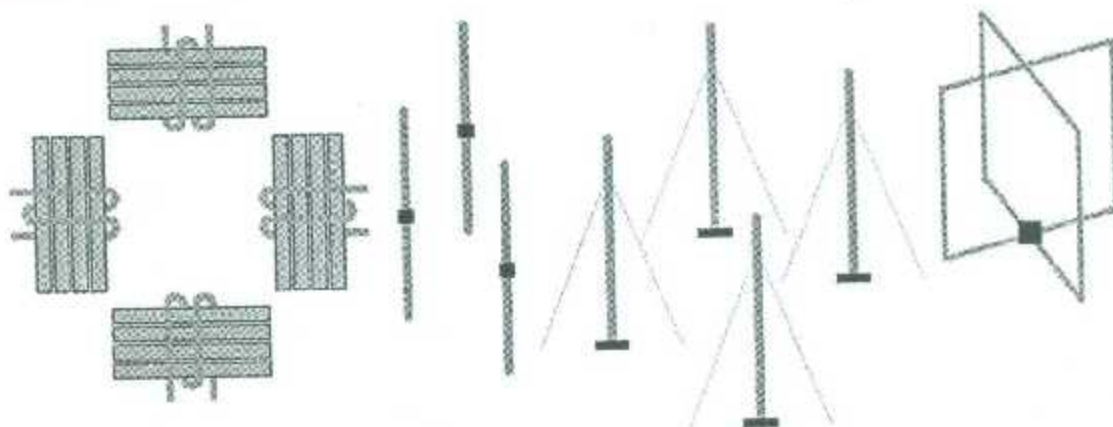


Figura 2.21: (De izquierda a derecha)lazos cruzados de ferrita, dipolos cruzados, monopolos cruzados, lazos cruzados.

El acimut de llegada del PEM se define utilizando el método Watson-Watt (ver Apéndice A), el cuál utiliza un arreglo con dos parejas de antenas (normalmente del tipo Adcock) siguiendo los ejes N-S y E-O. El frente de ondas llegará en distintos instantes a cada una de las antenas del arreglo, ya que la distancia recorrida será distinta, tal y como se muestra en la figura 2.22. Esto implica que cada antena recibirá la señal de interés con un

determinado desfase.

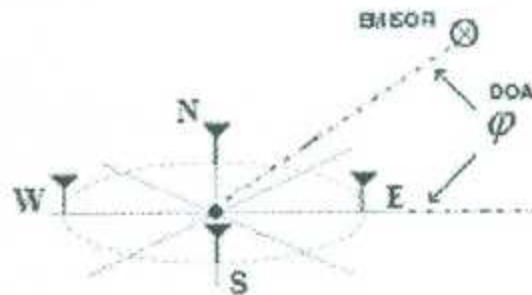


Figura 2.22: Arreglo tipo Adcock utilizado por el algoritmo de Watson-Watt.

Una vez que se conoce el sentido de procedencia del PEM, el funcionamiento es similar al de un osciloscopio de rayos catódicos. Para iniciar la secuencia de análisis, la configuración electrónica del dispositivo requiere un nivel mínimo de tensión inducida en la antena [18], este nivel se fija suponiendo una magnitud normalizada de corriente de rayo, cuyo valor puede oscilar entre 10 y 30kA, dependiendo del fabricante. Estableciendo esta magnitud se puede definir entonces un rango de potencia normalizada, que se irradia a una distancia del receptor (100km), esta potencia irradiada produce un nivel de tensión inducida mínima en la antena, por lo tanto la intensidad de recepción de la señal varía con la distancia, entonces mientras más cerca se encuentre el lugar de la descarga, la intensidad será mayor y puede determinar su distancia.

2.3.2. Detección Satelital

Mapeador de Rayos Satelital (LMS)

Durante los 90's los investigadores de la NASA desarrollaron un Mapeador de Rayos Satelital (LMS) diseñado para una órbita geostacionaria, pero un sensor de este tipo aún no está en su lugar. Este sensor es un CCD (dispositivo de carga acoplada) arreglo óptico con sistema electrónico capaz de detectar la luminosidad transitoria producida por un rayo, incluso durante el día. Este está diseñado para detectar rayos desde altitudes geostacionarias con una resolución espacial de 10km y con una resolución temporal de

1ms. Este sensor ha sido combinado con lentes que proveerán cobertura sobre la mayor parte de Norte América, incluyendo todos los estados contiguos de Estados Unidos y la zona cercana al mar, Centroamérica, Sudamérica y su zona de convergencia inter-tropical. El sistema está diseñado para detectar el 90 por ciento de los flashes que ocurran [10].

Detector de Transitorios Ópticos (OTD)

El Detector de Transitorios Ópticos (OTD) es una combinación altamente compacta de elementos ópticos y electrónicos. Fue desarrollado como un proyecto interno en el Centro de Vuelo Espacial Marshall de la NASA en Huntsville, Alabama.

En el corazón del sistema está un sensor óptico de estado sólido similar en algunas formas a una cámara de TV. Sin embargo, en el diseño general y en muchas características específicas, el OTD tuvo que ser diseñado de forma exclusiva para el trabajo de observación y medición de los rayos desde el espacio. Como una cámara de TV, el OTD tiene un sistema de lentes, un arreglo de detectores (que sirve una función algo análoga a la retina del ojo humano), y circuitería para convertir la salida electrónica del arreglo de detectores del sistema en datos útiles.



Figura 2.23: *Detector de Transitorios Ópticos. Tomado de [19].*

El sensor del sistema (cámara) tiene aproximadamente 8 pulgadas de diámetro y 15 pulgadas de alto, mientras que el paquete electrónico de soporte es aproximadamente del tamaño

de una máquina de escribir estándar. El OTD fue lanzado el 3 de abril de 1995 a bordo del satélite MicroLab-1, dentro de una órbita polar con una inclinación de 70 grados con respecto al ecuador. El satélite órbita la tierra una vez cada 100 minutos a una altitud de 740 km, y en cualquier instante dado observa una región de la tierra de 1300×1300 km a 128×128 píxeles. El OTD ha contribuido al descubrimiento de potenciales indicadores de rayos para su aplicación más oportuna en la advertencia de condiciones meteorológicas peligrosas y tornados.

Los *Flashes* son determinados comparando la luminiscencia de celdillas adyacentes de la información óptica del OTD. Si la diferencia es mayor que un valor umbral especificado, un *evento* es *grabado*. Uno o más eventos adyacentes en el mismo marco de tiempo de 2 ms es grabado como un *grupo*. Uno o varios grupos dentro de un período de tiempo suficientemente pequeño se clasifican como un *flash*. Estos se agrupan en *áreas* si hay uno o más separados lo suficiente de las áreas existentes.

El OTD detecta rayos durante condiciones diurnas o nocturnas con una eficiencia de detección que va desde 40 % a 65 % dependiendo de condiciones externas tales como brillo y radiación [19].

Sensor de Imagen de Rayo (LIS)

El Sensor de Imagen de Rayo (LIS) es un instrumento científico que está integrado a bordo del satélite Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM). El 28 de Noviembre de 1997, el LIS fue lanzado en una órbita baja de la tierra, y ahora circula la tierra a una altitud de 350 km. La inclinación de esta órbita es de 35 grados, por lo tanto permitiendo al LIS observar la actividad de rayos en las regiones tropicales del mundo. El sensor LIS contiene un observador óptico de imágenes que es usado para identificar la actividad de rayos por detección de cambios momentáneos en el brillo de las nubes cuando son iluminadas por las descargas de rayos. Debido a la sensibilidad y al rango dinámico del sensor, puede detectar rayos aun en presencia del brillo de las nubes iluminadas por el sol. El instrumento LIS detecta los rayos *totales*, desde las descargas nube-tierra, intra-nube

y nube-nube todas producen pulsos ópticos que son visibles desde el espacio. Información registrada por este instrumento incluye el tiempo del evento de un rayo, su energía radiada y su ubicación.

El componente primario del observador de imágenes es el arreglo de dispositivo de carga acoplada (CCD) el cuál tiene una frecuencia de muestreo ligeramente mayor que 500 cuadros por segundo. La amplitud de ángulo de la lente, combinado con los 350 km de altitud de la nave espacial TRMM, permite al sensor observar un área de la tierra de 600×600 km con una resolución espacial de entre 6 y 3 km. Entonces el LIS viaja alrededor de la tierra con una velocidad mayor a 7 km/s , el instrumento puede monitorear tormentas individuales y sistemas de tormentas para la actividad de rayos durante casi 90 segundos. El instrumento LIS es uno de cinco instrumentos en la plataforma TRMM. Los otros instrumentos incluyen el radiómetro de microondas TRMM (TMI), el Escaner Visible e Infrarrojo (VIRS), el Radar de Precipitación (PR), y el Sistema de Energía Radiante Nube y Tierra (CERES). Cada instrumento proporciona un conjunto único de datos que pueden utilizarse para aprender mas sobre la circulación atmosférica, tiempo y clima.

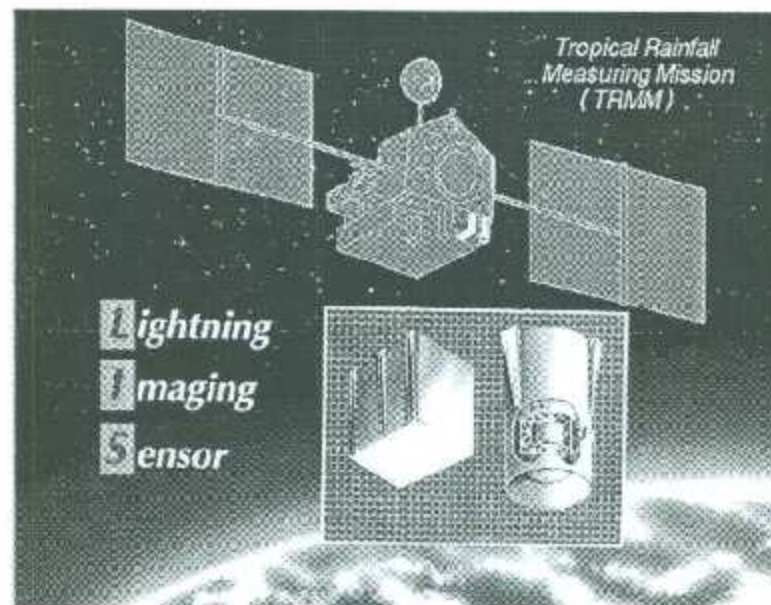


Figura 2.24: El Sensor de Imagen de Rayo integrado a bordo del satélite TRMM. Tomado de [20].

El Sensor de Imágenes de Rayos sobre el TRMM ha demostrado que la actividad de rayos puede ser detectada fácilmente desde el espacio. Simples comparaciones de la información del LIS con información coincidente del TMI, PR, y VIRS sugieren que la detección de incluso una sola descarga es significativa y proporciona información importante acerca de las tormentas, incluyendo estimaciones de la tasa de precipitación, altura de la tormenta, y la presencia de hielo [20].

2.4. Parámetros de Interés en Ingeniería

2.4.1. Días de Tormenta y Densidad de Rayos a Tierra

La densidad de rayos a tierra es un parámetro de interés en la protección contra rayos por que la evaluación del riesgo en los procedimientos de protección está basada en este parámetro. Por ejemplo, nos representan el radio atractivo de una estructura de altura h para un líder escalonado que dará lugar a un golpe de retorno con una corriente pico de i_p por $R(i_p, h)$. En otras palabras, cualquier líder escalonado con una corriente pico de retorno esperada de i_p será atraída por la estructura si se encuentra dentro de una distancia radial de $R(i_p, h)$ desde la estructura [21]. También nos representan por $f(i_p)di$ la fracción de rayos que tienen corrientes de retorno del primer golpe de retorno en el intervalo entre i y $i + di$. Entonces el número de rayos con corrientes pico del primer golpe de retorno en el intervalo anterior que impactan la estructura en un año esta dado por:

$$dN = N_g \pi [R(i_p, h)]^2 f(i_p) di \quad (2.28)$$

donde N_g es llamada la densidad de rayos a tierra (DRT). Se define como el número de rayos por unidad de área que golpean en una región determinada en un año. Entonces el número total de rayos que golpean la estructura esta dada por:

$$N = N_g \pi \int_0^{\infty} [R(i_p, h)]^2 f(i_p) di \quad (2.29)$$

Diferentes expresiones para el radio de atracción de estructuras han sido derivadas por diferentes científicos. Estas expresiones difieren entre sí debido a las diversas hipótesis formuladas en el análisis. Sin embargo, todas estas expresiones predicen (y también la experiencia demuestra) que $R(i_p, h)$ incrementa con el aumento de la altura de la estructura. Por lo tanto, el número de impactos por año en una estructura crece con su altura [21]. La DRT N_g en una región determinada puede ser estimada contando el número de rayos que impactan en tierra en esa región usando contadores de descargas atmosféricas, sistemas de localización de rayos o usando la información sobre rayos proporcionada por satélites. Sin embargo, los ingenieros de protección contra rayos todavía utilizan los *días de tormenta al año* (DTA) para extraer la DRT por que la información relativa a este parámetro está disponible en todo el mundo. Un día de tormenta esta normalmente definida como el día del calendario local en que un trueno es escuchado por observadores meteorológicos. Esta es una buena fuente de información acerca de la variación estacional y geográfica en la frecuencia de rayos. Sin embargo, esto no incluye la intensidad de la tormenta eléctrica o el número de veces que un trueno es escuchado en un día en particular. La Figura describe la distribución de los días de tormenta alrededor del globo. En ausencia de mejor información acerca de la DRT esta puede ser estimada de los DTA, T_d , usando una ecuación de la forma:

$$N_g = aT_d^b \text{ flashes km}^{-2} \text{ año}^{-1} \quad (2.30)$$

Los parámetros de esta ecuación han sido derivados por muchos trabajadores de diferentes partes del mundo. Los datos obtenidos para estos parámetros se resumen en la Tabla 2.2. Lo importante, en todos estos estudios hay una gran dispersión en las imágenes de días de tormenta contra densidad de rayos a tierra. Además, hay un gran margen en las mejores estimaciones de a y b obtenidas en diferentes partes del mundo [21].

Tabla 2.2: *Parámetros para la obtención de N_g a partir de T_d , obtenidas de estudios realizados en diferentes regiones del mundo*

Estudio	Valordea	Valordcb	Comentarios
Mackerras	3.01	1.4	Basado en los datos obtenidos de 26 sitios en Australia durante el periodo 1965-1977
Anderson y Eriksson	0.023	1.3	Basado en 120 observaciones durante dos años en Sudáfrica
Anderson et al.	0.04	1.25	Basado en los datos obtenidos de 62 estaciones durante un periodo de 5 años que abarca 1976-1980; la ecuación 2.30 está basada en los valores de este último y es conocida como la "Fórmula CIGRE"
Kuleshov y Jayaramne	0.012	1.4	Obtenidos usando registros de contadores de rayo a largo plazo y las observaciones de días de tormenta en Australia
Chen et al.	0.0054	1.537	Datos obtenidos en China de 82 estaciones
de la Rosa et al.	0.024	1.12	Estudio realizado en la región tropical de México
Torres	0.003	1.11	Estudio realizado en la región tropical de Brasil
Yunes	0.0017	1.56	Estudio realizado en la región tropical de Colombia

2.4.2. Densidad de Rayos a Tierra de Densidad Transitoria Óptica de Rayos

En muchas áreas del mundo, una indicación de la actividad de rayos puede obtenerse de las observaciones de transitorios ópticos de rayos. Los sensores satelitales responden a todos los tipos de rayos con una cobertura relativamente uniforme en todas las áreas. Con un promedio suficiente, la densidad transitoria óptica (DTO) provee mejores estimaciones de la DRT que las observaciones de truenos, que tienen una amplia gama de relaciones entre la DRT y las horas o días de tormenta al año. También hay variaciones regionales en la proporción de las descargas a tierra del total de rayos, pero un valor medio de 0,33 rayos a tierra del total de rayos está recomendada para las regiones templadas y tropicales [3].

Para las áreas sin sistemas localizadores de rayos en tierra o contadores de descargas, el estimado recomendado de la DRT es:

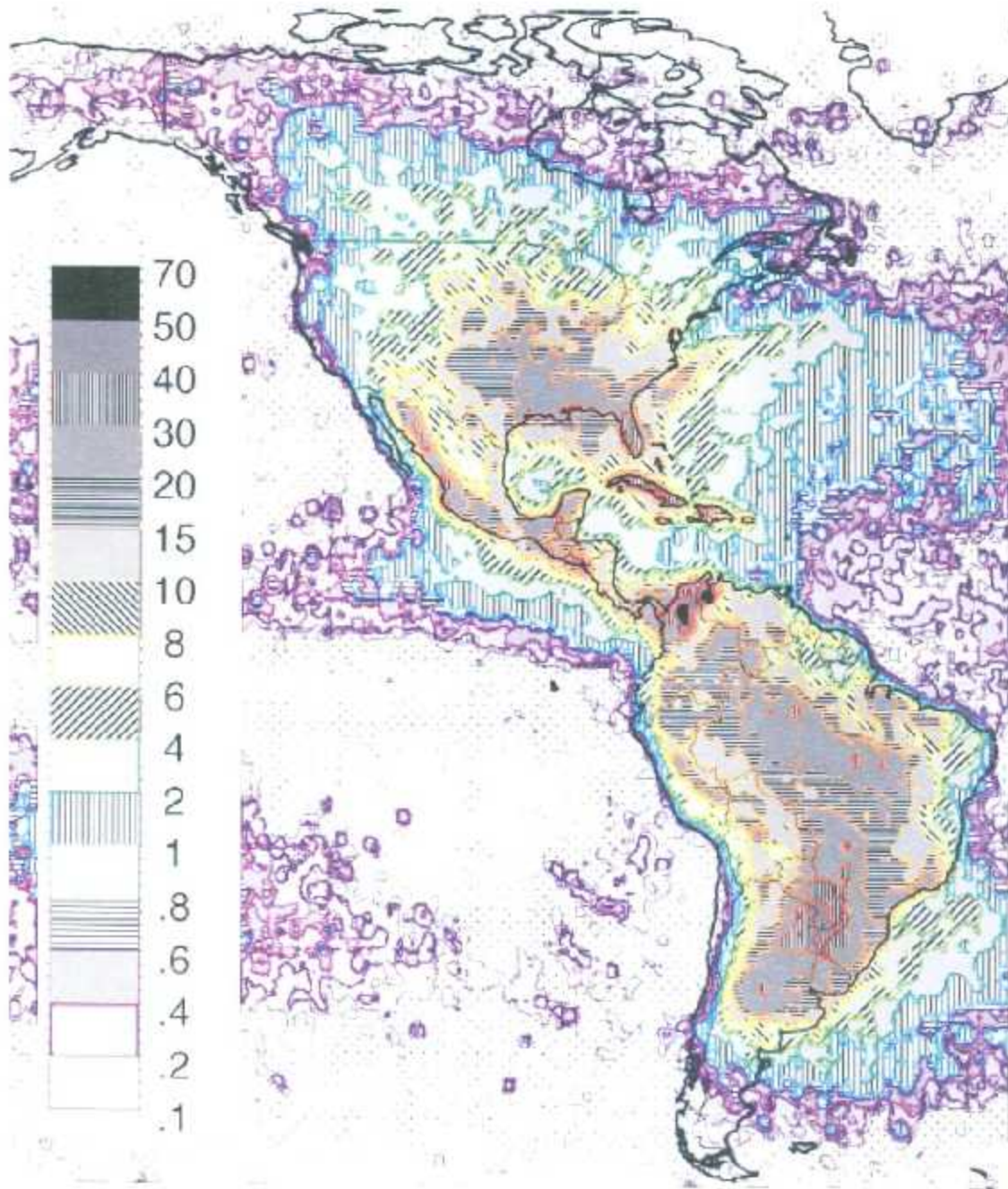


Figura 2.25: Actividad total (nube + tierra) de rayos para el Norte y Sur de América (N_t rayos ópticos por km^2 al año²). Tomado de [3].

$$N_g = N_t/3 \quad (2.31)$$

Donde

N_g es la densidad de rayos a tierra en rayos por km^2 al año N_t es la densidad total (nube + tierra) de rayos ópticos por km^2 al año obtenidos de la Figura 2.25 [3].

2.4.3. Parámetros de Corriente y Forma de Onda

La forma de onda de un golpe de retorno medido en tierra puede ser representada aproximadamente por la siguiente expresión analítica

$$I = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) + I_1 e^{-\gamma t} \quad (2.32)$$

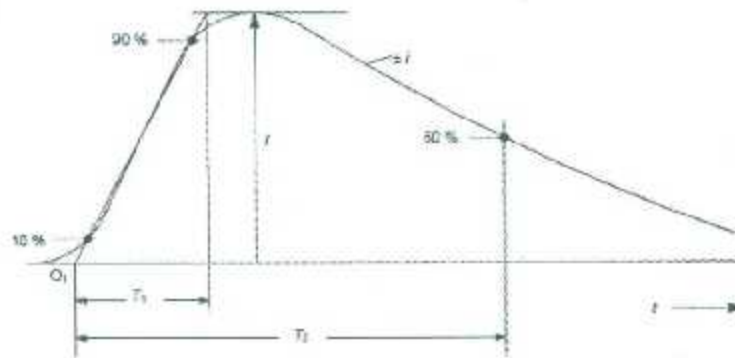


Figura 2.26: Forma de onda impulso de corriente estandarizada donde: $O_1 =$ Origen virtual, $I =$ Corriente pico, $T_1 =$ Tiempo de frente, $T_2 =$ Tiempo al valor medio. Tomado de [22].

Los parámetros I_0, α , y β pueden ser elegidos para dar aproximaciones al tiempo de subida de la corriente, corriente pico, y el tiempo del valor medio de la corriente. Los parámetros I_1 y γ pueden ser escogidos para dar aproximaciones a la corriente intermedia. Si es necesario, un término adicional puede ser añadido a la ecuación 2.32 para tomar en cuenta la corriente continua. Dennis y Pierce (1964) sugirieron el uso de los siguientes parámetros para primeros golpes descendiendo carga negativa: $\alpha = 2,0 \times 10^4 \text{ seg}^{-1}$, $\beta = 2,0 \times 10^5 \text{ seg}^{-1}$, $I_0 = 30 \text{ kA}$; y para los golpes subsiguientes: $\alpha = 1,4 \times 10^4 \text{ seg}^{-1}$, $\beta = 6,0 \times 10^6 \text{ seg}^{-1}$, $I_0 = 10 \text{ kA}$. Parámetros razonables para los términos de corriente intermedia son: $\gamma = 1,0 \times 10^3 \text{ seg}^{-1}$, $I_1 = 2,5 \text{ kA}$ [9].

Forma de Onda utilizada en el IEC

La forma de onda para cualquier tipo de impulso de corriente puede ser definida con la siguiente ecuación:

$$i = \frac{I}{k} \times \frac{(t/T_1)^{10}}{1 + (t/T_1)^{10}} \times \exp^{-t/T_2} \quad (2.33)$$

donde

I es la corriente pico;

k es el factor de corrección para la corriente pico;

t es el tiempo;

T_1 es la constante de tiempo de frente;

T_2 es la constante de tiempo de cola.

Para las formas de corriente del primer impulso positivo, el primer impulso negativo y los subsiguientes impulsos negativos para los diferentes niveles de protección de rayos (LPL), aplican los parámetros dados en la Tabla 2.3,[22].

Tabla 2.3: *Parámetros de Corriente para ecuación 2.33. Tomado de [22].*

Parámetros	Primer Golpe de Corriente			Golpes Subsecuentes de Corriente		
	LPL			LPL		
	I	II	III-IV	I	II	III-IV
i (kA)	200	150	100	50	37.5	25
η	0,93	0,93	0,93	0,093	0,093	0,093
τ_1 (μ s)	19	19	19	0,454	0,454	0,454
τ_2 (μ s)	485	485	485	143	143	143

De mediciones directas de corriente la corriente pico promedio del golpe de retorno está alrededor de los 30 kA para los primeros golpes negativos en Suiza, Italia, Sudáfrica y Japón, y típicamente de 10 a 15 kA para los golpes subsiguientes en Suiza y para rayos disparados hacia arriba (iniciados por estructuras). Valores correspondientes de mediciones en Brasil son 45 kA y 18 kA. Mediciones adicionales son necesarias. Las distribuciones “globales” de las corrientes pico de rayo para los primeros golpes negativos actualmente recomendadas

por el CIGRE y el IEEE son cada uno basado en una mezcla de las mediciones directas de corriente y las menos precisas mediciones indirectas (media= 30 kA, $\sigma_{lg}I = 0,265$ para la distribución de Berger et al., ver Tablas 2.4 y 2.5, donde el subíndice "lg" el logaritmo de base 10), algunas de las cuales son de calidad cuestionable. Sin embargo, puesto que las distribuciones "globales" han sido ampliamente utilizadas en estudios de protección contra rayos y no son muy diferentes de las basadas solo en las mediciones directas, continuar el uso de estas distribuciones "globales" para representar los primeros golpes negativos es recomendado. Para golpes negativos subsecuentes, una distribución logarítmica normal con media= 12 kA y $\sigma_{lg}I = 0,265$ se debe utilizar. Para golpes de rayos positivos, una distribución logarítmica normal con media= 35 kA y $\sigma_{lg}I = 0,544$ es recomendada [23]. En general a nivel internacional para cuestiones de simulaciones y pruebas por sobretensiones originadas por caídas de rayo en una estructura o en áreas adyacentes, el estándar IEC 61643 – 12 [22] recomienda utilizar la forma de onda $10/350\mu S$ para caracterizar ondas de corriente de un golpe directo y la $8/20\mu S$ para las ondas de corriente de un golpe indirecto.

2.5. Sobretensiones Atmosféricas en Líneas Aéreas

Los impactos directos sobre líneas aéreas producen pérdida de aislamiento del material (reversibles o no), contorneando los aisladores y produciendo fallas a tierra que son despejadas en última instancia por las protecciones convencionales. La propagación de una sobretensión atmosférica por una línea tiene lugar a una velocidad próxima a la de la luz; durante esta propagación tanto el valor de cresta como el tiempo de subida se ven fuertemente amortiguados debido al efecto pelicular y al efecto corona.

Para evitar los efectos de las descargas atmosféricas en los conductores de fase de una línea aérea, se procede al apantallamiento de los mismos mediante cables de guarda o de tierra, y a la reducción de la resistencia de puesta a tierra de las torres para disminuir el riesgo de cebado inverso. La instalación de cables de tierra en las líneas aéreas con-

Tabla 2.4: *Parámetros de corriente de rayo para descargas negativas de Berger et al., 1975. Tomado de [23].*

Parámetros	Unidades	Tamaño de muestra	Por ciento excediendo el valor tabulado		
			95 %	50 %	5 %
Corriente pico (mín. 2 kA)					
Primer Golpe	kA	101	14	30	80
Golpes Subsecuentes		135	4,6	12	30
Carga (carga total)					
Primer Golpe	C	93	1,1	5,2	24
Golpes Subsecuentes		22	0,2	1,4	11
Descarga Completa		94	1,3	7,5	60
Carga Impulso (excluyendo corriente continua)					
Primer Golpe	C	90	1,1	4,5	20
Golpes Subsecuentes		117	0,22	0,95	4
Duración del frente (2 kA a pico)					
Primer Golpe	μs	89	1,8	5,5	18
Golpes Subsecuentes		118	0,22	1,1	6,5
Máximo di/dt					
Primer Golpe	μs	92	5,5	12	32
Golpes Subsecuentes		122	12	40	120
Duración del Golpe (2 kA a la mitad de valor pico en la cola)					
Primer Golpe	μs	90	30	75	200
Golpes Subsecuentes		115	6,5	32	140
Acción integral ($\int i^2 dt$)					
Primer Golpe	A^2s	91	$6,0 \times 10^3$	$5,5 \times 10^4$	$5,5 \times 10^5$
Golpes Subsecuentes		88	$5,5 \times 10^2$	$6,0 \times 10^3$	$5,2 \times 10^4$
Intervalo de tiempo entre golpes	ms	133	7	33	150
Duración de la descarga					
Todas las descargas	ms	94	0,15	3	1100
Excluyendo descargas de golpes individuales		29	31	180	900

Tabla 2.5: *Parámetros de corriente de rayo para descargas positivas de Berger et al., 1975. Tomado de [23].*

Parámetros	Unidades	Tamaño de muestra	Por ciento excediendo el valor tabulado		
			95 %	50 %	5 %
Corriente pico (máx. 2 kA)	kA	26	4,6	35	250
Carga (carga total)	C	26	20	80	350
Carga Impulso (excluyendo corriente continua)	C	25	2,0	16	150
Duración del frente (2 kA a pico)	μ s	19	3,5	22	200
Máximo di/dt	kA/ μ s	21	0,30	2,4	32
Duración del Golpe (2 kA a la mitad del valor pico en la cola)	μ s	16	25	230	2000
Acción integral ($\int i^2 dt$)	A ² s	26	$2,5 \times 10^4$	$6,5 \times 10^5$	$1,5 \times 10^7$
Duración de la descarga	ms	24	14	85	500

sigue apantallar los conductores de las fases de las posibles descargas atmosféricas. Las sobretensiones debidas al rayo pueden ser, por tanto, causadas por descargas directas a los conductores de fase o a los cables de tierra, o bien inducidas por descargas que impactan en tierra a distancias cercanas a la línea. En este último caso, sólo es necesario considerar las sobretensiones inducidas en líneas de distribución. Las ondas de rayo inducidas en líneas aéreas producen sobretensiones generalmente inferiores a 300 kV, y son importantes sólo en líneas con tensiones de la gama I [24].

Las líneas aéreas de transmisión están generalmente apantalladas, por lo que el contorneo se puede originar cuando una descarga alcanza un conductor de fase o un cable de tierra, ya sea en una torre o en algún punto intermedio de un vano [24].

2.5.1. Impacto en un cable de tierra

La Figura 2.27 muestra las dos posibilidades que se pueden presentar: el rayo impacta en un cable de tierra, ya sea en un punto situado en medio del vano o justo en la torre. Si el impacto se produce en medio de un vano, se originan dos ondas con intensidad igual a la mitad de la del rayo, que se propagan en sentidos opuestos hacia las torres más próximas.

Las tensiones originadas en este cable y en el conductor de fase serán:

$$V_g = Z_g I_{max} / 2 \quad (2.34)$$

$$V_f = K V_g \quad (2.35)$$

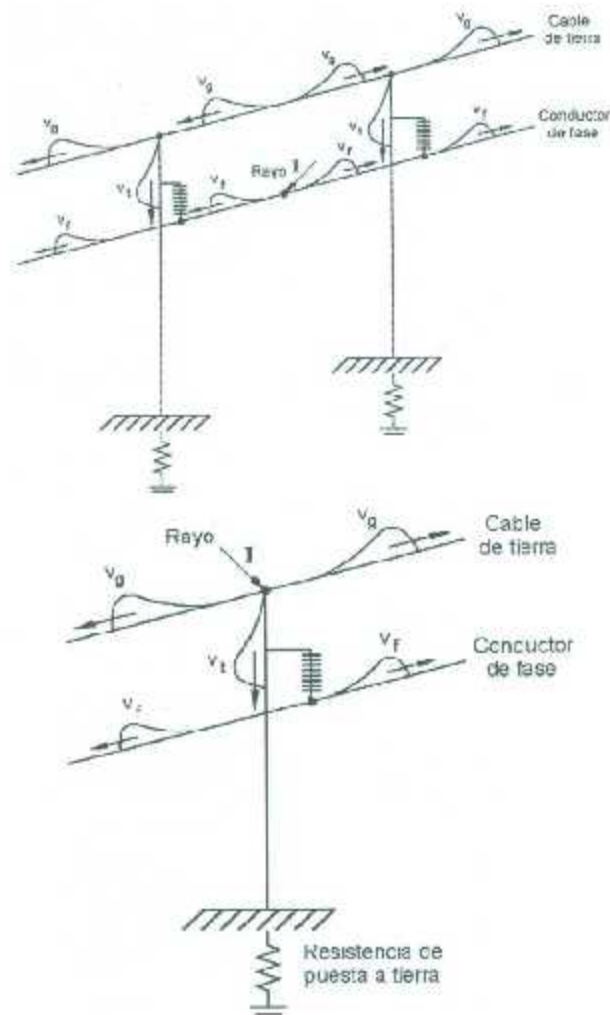


Figura 2.27: Sobretensiones por impacto en un cable de tierra o una torre. Tomado de [24].

siendo Z_g la impedancia característica del cable de tierra, I_{max} la intensidad de cresta

del rayo, y K el coeficiente de acoplamiento entre el cable de tierra y el conductor. Si la diferencia

$$V_g - V_f = (1 - K)V_g \quad (2.36)$$

es suficientemente grande, entonces el contorneo se producirá entre el cable de tierra y el conductor de fase en el punto de impacto. En caso contrario, las ondas de tensión que se produjeron en el punto de impacto alcanzarán las torres más próximas donde se originarán ondas que viajarán a tierra. El valor de cresta de las tensiones entre los terminales de las cadenas de aisladores dependerá entonces de las distintas reflexiones de ondas que se originen en la torre.

Si el impacto se produce directamente en el punto de conexión con la torre, la corriente del rayo se dividirá entre una parte que viajará a tierra a través de la torre, y otra que se dividirá a su vez en dos partes iguales que se propagarán en ambos sentidos por el cable de tierra, véase la Figura 2.27. La Figura 2.28 muestra el esquema equivalente aproximado que será empleado para analizar la sobretensión que se origina por el impacto directo de una descarga atmosférica en una torre. El circuito equivalente incluye:

- La torre, que es representada mediante una línea ideal con impedancia característica Z_t y tiempo de propagación τ_t .
- Los tramos del cable de tierra a ambos lados de la torre, que son representados por líneas aéreas ideales, de longitud infinita e impedancia característica Z_g .
- La impedancia de puesta a tierra de la torre, que es representada por una resistencia constante R_p .

Se supone que la descarga atmosférica se comporta como una fuente de corriente ideal (impedancia paralelo infinita), en forma de rampa, con un valor de cresta I y un tiempo de frente T_f . La tensión que aparece en la torre por el impacto de la descarga atmosférica será:

$$e(t) = \frac{Z_t \cdot Z_g/2}{Z_t + Z_g/2} \cdot i(t) = \frac{Z_t \cdot Z_g}{2Z_t + Z_g} \cdot i(t) \quad (2.37)$$

donde $i(t)$ es la intensidad de la descarga atmosférica.

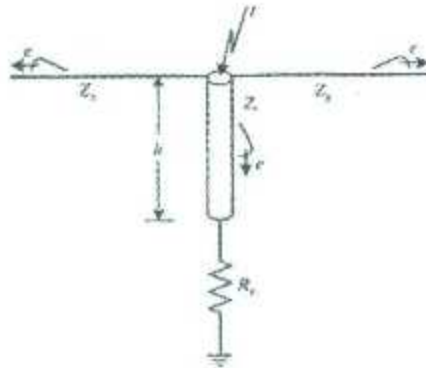


Figura 2.28: Impacto de un rayo en una torre de línea aérea. Tomado de [24].

El estudio se puede simplificar si se supone que

$$Z_t = \frac{Z_g}{2} \quad (2.38)$$

En tal caso queda:

$$e(t) = \frac{Z_g}{4} \cdot i(t) - \frac{Z_t}{2} \cdot i(t) \quad (2.39)$$

Los coeficientes de reflexión en ambos extremos de la torre serán:

- Unión torre-puesta a tierra

$$\Gamma_t = \frac{R_p - Z_t}{R_p + Z_t} \approx \frac{2R_p - Z_g}{2R_p + Z_g} \quad (2.40)$$

- Unión torre-cable de tierra

$$\Gamma_g = \frac{Z_g/2 - Z_t}{Z_g/2 + Z_t} \approx 0 \quad (2.41)$$

Puesto que la aproximación 2.41 significa que no hay reflexión de ondas en el punto de unión de la torre con el cable de tierra. La tensión máxima que se alcanzará en la torre antes de que llegue ninguna onda reflejada desde la puesta a tierra se obtiene de acuerdo con la siguiente expresión:

$$V_t = e(2\tau_t) = \frac{Z_t}{2} \cdot i(2\tau_t) = \frac{Z_t}{2} \cdot 2\tau_t \cdot \frac{I_{max}}{t_f} \quad (2.42)$$

La relación (I_{max}/t_f) es la pendiente inicial de la corriente de la descarga; usando la notación S_i para designar a este factor se tiene:

$$V_t = Z_t \cdot \tau_t \cdot S_i \quad (2.43)$$

Después de que llegue la onda reflejada en la puesta a tierra, la tensión en la unión torre-cable de tierra puede continuar subiendo hasta alcanzar un valor máximo, que vendrá dado por la siguiente expresión:

$$V_{tmax} = e(t_f) + \Gamma_t e(t_f - 2\tau_t) = e(t_f) \cdot [1 + \Gamma_t \frac{t_f - 2\tau_t}{t_f}] = [R_e t_f - \Gamma_t Z_t \tau_t] \cdot S_i \quad (2.44)$$

siendo

$$R_e = \frac{Z_g \cdot R_p}{Z_g + 2R_p} \quad (2.45)$$

Se puede comprobar que el valor máximo de la tensión que se alcanzará es proporcional a la pendiente del frente de la onda de corriente de la descarga del rayo. Otro factor que tiene una influencia notable en este valor máximo es la resistencia de puesta a tierra; en general, cuanto más elevado sea su valor, más elevada será la tensión que se originará por cebado inverso.

Un análisis más riguroso de este proceso debería tener en cuenta las reflexiones de ondas en las torres próximas a la del impacto.

La experiencia ha demostrado que, con independencia de que el rayo caiga sobre una torre o sobre un cable de tierra, el arco se suele cebar entre la torre y los conductores, siendo muy poco frecuente el cebado entre cables de tierra y conductores. El riesgo de fallo por cebado inverso puede reducirse disminuyendo la resistencia de puesta a tierra de las torres y estableciendo una distancia suficiente entre los cables de tierra y los conductores de fase en medio del vano [24].

2.5.2. Impacto en un conductor de fase

La Figura 2.29 muestra un esquema con el impacto de un rayo en un conductor de fase, que generalmente será el conductor situado en la fase más elevada o en una fase exterior. La corriente del rayo se dividirá en dos partes iguales que darán lugar a dos tensiones que se propagarán en ambos sentidos. La tensión máxima vendrá dada por la expresión:

$$V_1 = Z_c I_{max} / 2 \quad (2.46)$$

siendo Z_c la impedancia característica de un conductor de fase.

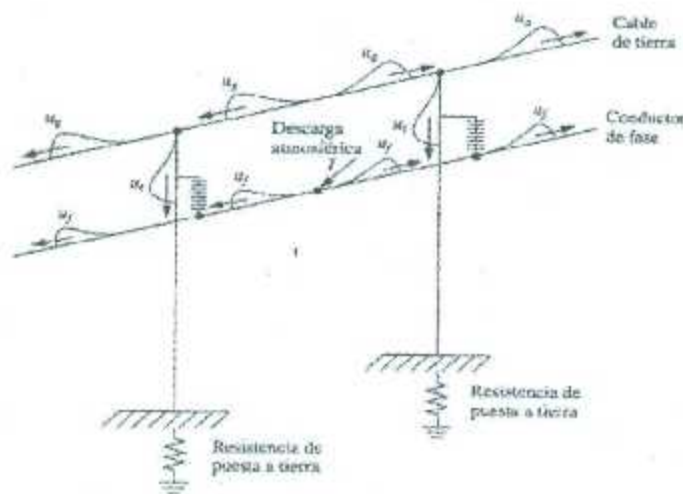


Figura 2.29: Sobretensiones por fallo de apantallamiento. Modificado de [24].

En las otras fases de la línea también se originarán sobretensiones por acoplamiento.

Si K es el coeficiente de acoplamiento entre dos fasces, la tensión máxima inducida en otra fase será:

$$V_2 = KU_1 = KZ_c I_{max}/2 \quad (2.47)$$

El contorneo en la línea puede originarse entre conductores de fase si la diferencia de tensiones

$$V_1 - V_2 = (1 - K)Z_c I_{max}/2 \quad (2.48)$$

es superior a la rigidez dieléctrica entre los conductores, o en la cadena de aisladores más próxima al impacto si las tensiones que se propagan desde el punto de impacto superan la tensión soportada. Sólo se producirá contorneo si la intensidad del rayo que cae sobre un conductor supera un cierto valor crítico I_c . Dada la distribución estadística de las intensidades de las descargas atmosféricas, la mayor parte de las descargas daría lugar a un fallo de aislamiento si el impacto se produjera sobre un conductor de fase, por esta razón, debe evitarse la caída directa de rayos sobre los conductores de fase, lo que se consigue instalando cables de tierra que sirvan de pantalla contra el rayo [24].

Capítulo 3

Metodología

3.1. Diseño de Estudio

El trabajo realizado es una investigación del tipo cuantitativa, no experimental, longitudinal, ya que pretende medir la actividad de rayos principalmente sobre los estados de Chihuahua, Coahuila y Durango y regiones adyacentes, y así definir tres niveles de riesgo.

3.2. Muestra

Serán medidos la cantidad de rayos que se han presentado durante el periodo 2009 – 2013 sobre las regiones delimitadas entre 32° y $25,25^\circ$ latitud norte, -109° y -103° longitud oeste, correspondientes al estado de Chihuahua, 30° y $24,5^\circ$ latitud norte, -104° y $-99,5^\circ$ longitud oeste, correspondientes al estado de Coahuila y finalmente las latitudes $26,5^\circ$ y 22° norte y las longitudes $-107,15^\circ$ y $-102,15^\circ$ oeste, del estado de Durango.

3.3. Proceso de Recolección y Filtrado de Datos

Los datos utilizados para realizar el análisis estadístico provienen del dispositivo LIS y son información pública que la NASA difunde a través su sitio de internet 3.1 [25].

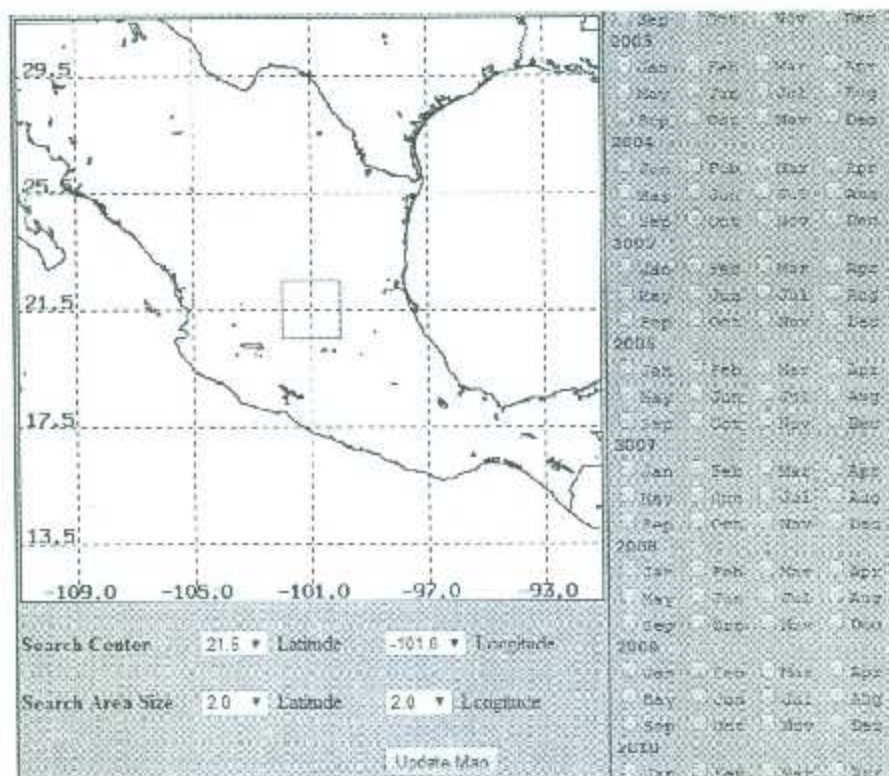


Figura 3.1: Ventana de datos del LIS. Tomada de [25].

La información puede ser seleccionada y filtrada en línea, por mes, año y zona de interés, con un límite de 12 meses para elegir al mismo tiempo. Los datos al seleccionarse son copiados en un archivo de texto como el mostrado en la Figura 3.2, en el cual se puede observar que el dispositivo LIS nos proporciona datos de interés para nuestro estudio, como lo son: localización geográfica, fecha y hora de cada rayo.

Una vez descargada el total de la información, se procede a generar un algoritmo computacional con ayuda del lenguaje de programación Python y la librería Numpy [26] para leer el archivo de texto y filtrar la información por estado. Cada estado está delimitado por una rejilla cuadrada con resolución de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ que coincide con el rango aproxi-

Flash time (UTC)	Lat	Lon	radiance	milliseconds	Groups	Events	orbit-ID
2013-006T04:01:48.5672Z	(24.010, -101.143)		491281	243	7	41	86257
2013-006T04:02:00.1158Z	(24.000, -101.053)		171679	317	11	28	86257
2013-006T04:02:00.7178Z	(24.202, -100.628)		92908	19	2	14	86257
2013-006T04:02:07.2041Z	(24.007, -101.065)		449826	277	21	64	86257
2013-006T04:02:07.8578Z	(24.197, -100.603)		4340	0	1	1	86257
2013-006T04:02:13.6428Z	(24.006, -101.076)		12080	30	2	3	86257
2013-006T04:02:17.3407Z	(24.191, -100.628)		23475	21	2	5	86257
2013-006T04:02:26.3768Z	(24.036, -101.086)		100311	250	7	10	86257
2013-006T04:02:34.4033Z	(24.018, -101.049)		124820	170	6	21	86257
2013-006T04:02:39.2520Z	(24.718, -100.643)		22883	202	2	4	86257
2013-006T04:02:39.4831Z	(24.027, -100.996)		1086254	535	34	103	86257
2013-006T04:02:46.0434Z	(24.048, -101.026)		2191363	369	30	122	86257
2013-006T04:02:54.5659Z	(24.222, -100.613)		54002	23	7	9	86257
2013-006T04:03:11.9571Z	(24.214, -100.570)		139112	207	9	16	86257
2013-006T04:03:13.5505Z	(24.062, -101.036)		10759	0	1	2	86257
2013-006T04:03:19.1453Z	(24.036, -100.924)		9739	0	1	2	86257
2013-006T04:03:24.3007Z	(24.365, -100.714)		54326	32	3	6	86257
2013-006T10:34:31.2472Z	(22.144, -100.536)		28662	189	3	4	86261
2013-006T10:34:37.2647Z	(24.504, -99.564)		1342337	458	23	136	86261
2013-006T10:34:37.6481Z	(22.107, -100.486)		193583	47	4	18	86261

Figura 3.2: Archivo de texto para almacenado de información.

mado de audición del trueno por un observador que se aproxima a los 25 km [9], y puede ser comparado con otros estudios ya realizados a nivel mundial, que en general, utilizan una resolución de $0,2^\circ \times 0,2^\circ$. El número de rayos en cada celda de la rejilla se determina adicionando un evento cada vez que la línea de información leída por el algoritmo coincida con la celda en cuestión, como se muestra en la Figura 4.16 de la sección de resultados. Una vez que el algoritmo en mención termina de procesar la información, imprime un archivo de texto con los datos ordenados en tres vectores (x,y,z) como se muestra en la figura 3.3, el vector “x” corresponde a latitud, el “y” a longitud y el “z” corresponde al número de rayos promedio en cada celda de la rejilla, este procedimiento se realiza en cada región a evaluar y es necesario organizarlo de esta forma por que así lo requiere nuestro SIG.

3.4. Representación Gráfica mediante el SIG

Los sistemas de información geográfica son un caso especial de sistemas de información; están diseñados para trabajar con información organizada en bases de datos y georreferenciada a una unidad de análisis espacial a través de sus coordenadas geográficas, por lo que tienen la capacidad de representar en un mapa las variables contenidas en esas

The image shows a Notepad window titled 'C:\traza.txt - Notepad'. The window contains a text file with three columns of data. The first column represents latitude, the second represents longitude, and the third represents the number of rays. The data is as follows:

Latitude	Longitude	Number of Rays
29.875	-103.875	18.4
29.625	-103.875	10.6
29.375	-103.875	16.4
29.125	-103.875	6.4
28.875	-103.875	3.0
28.625	-103.875	5.2
28.375	-103.875	12.0
28.125	-103.875	10.2
27.875	-103.875	6.6
27.625	-103.875	6.0
27.375	-103.875	8.0
27.125	-103.875	8.6
26.875	-103.875	3.2
26.625	-103.875	5.8
26.375	-103.875	3.4
26.125	-103.875	5.8
25.875	-103.875	2.6
25.625	-103.875	7.6
25.375	-103.875	9.6
25.125	-103.875	10.4
24.875	-103.875	9.8

Figura 3.3: Archivo de texto para lectura en un GIS, las columnas de izquierda a derecha son: latitud, longitud y número de rayos.

bases de datos, una vez analizada la información mediante un conjunto de operaciones y de funciones definidas previamente.

Podemos decir que un sistema de información geográfica es una herramienta basada en computadora y utilizada para mapear y analizar eventos que ocurren en un área geográfica [27].

Un SIG tiene que trabajar con cartografía y bases de datos al mismo tiempo, uniendo ambas partes y constituyendo con todo ello una sola base de datos geográficos.

Los SIG trabajan con una estructura generalmente en capas, las cuales se seleccionan dependiendo de la utilidad que se vaya a dar a la información a compilar, como se muestra en la Figura 3.4.

Existen tres formas principales de modelar las relaciones existentes entre los objetos geográficos para poder representarse por medio de capas, estas son: vectoriales, raster y orientados a objetos, pero en realidad la mayor parte de los sistemas existentes pertenecen a los dos primeros [28].

- SIG vectoriales

Son aquellos que para la descripción de los objetos geográficos utilizan vectores definidos

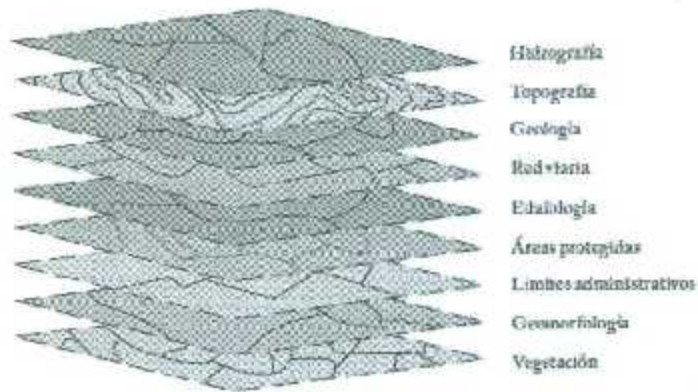


Figura 3.4: Estructura de capas en un SIG. Tomado de [28].

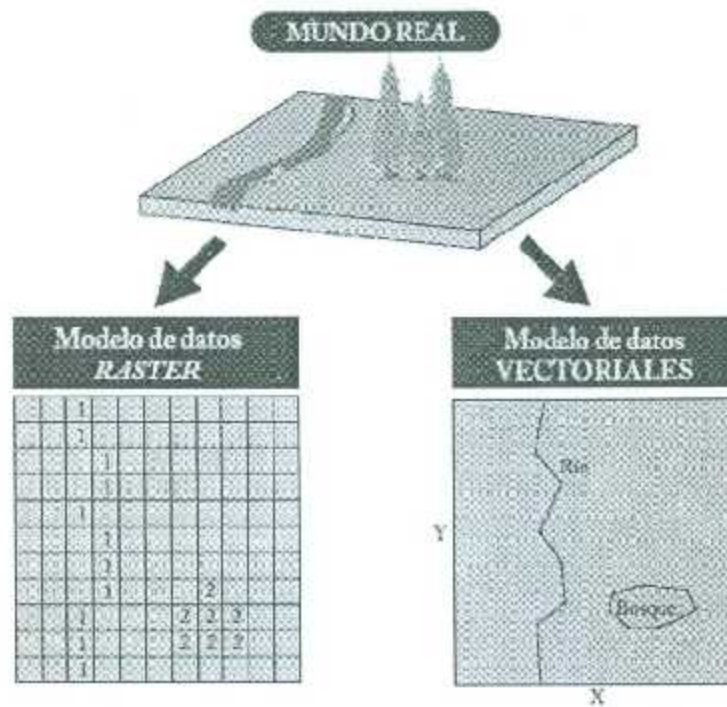


Figura 3.5: Modelos raster vs vectorial. Tomado de [28].

por pares de coordenadas relativas a algún sistema cartográfico.

Con un par de coordenadas y su altitud gestionan un punto (como un vértice geodésico), con dos puntos generan una línea y con una agrupación de líneas forman polígonos [28].

- SIG raster

Éstos basan su funcionalidad en una concepción implícita de las relaciones de vecindad entre los objetos geográficos. Su modo de proceder es dividir la zona de afección de la base de datos en una retícula o malla regular de pequeñas celdas (a las que se denomina pixel) y atribuir un valor numérico a cada celda como representación de su valor temático. Dado que la malla es regular (el tamaño del pixel es constante) y que conocemos la posición en coordenadas del centro de una de las celdas, se puede decir que todos los pixeles están georreferenciados [28].

Existen varios programas SIG de paga y gratuitos como el ArcGis y el Grass, para nuestro caso en específico se decidió utilizar una herramienta de accesos libre y avalada por la Fundación Nacional de Ciencia, desarrollada por Paul Wessel y Walter H.F. Smith en 1987 nombrada Generic Mapping Tools (GMT) [29], la cuál está compuesta por cerca de 80 herramientas de comandos de línea para la manipulación de bloques de datos geográficos y cartesianos.

Para comenzar con la representación gráfica de los datos descargados, se tienen que cambiar las extensiones de los archivos .txt a .xyz para que GMT pueda reconocerlos y comenzar a trabajar, después se tiene que convertir este archivo .xyz al formato raster con extensión .nc con el módulo xyz2grd para generar la capa de información numérica (matriz de datos) que representa el vector "z" de nuestro archivo y después generar una paleta de color con el módulo makecpt. Los módulos que serán utilizados para la generación de los mapas son: grdimage (para mostrar la capa raster mediante color), pscoast (para imprimir la información referente a límites políticos, ríos y océanos), psbasemap (genera una capa base para el mapa) y psscale (construye una escala de colores de la información mostrada). Finalmente el SIG imprimirá la información capturada en formato postscript con extensión .ps.

Capítulo 4

Resultados: Análisis Descriptivo y Representación Gráfica por Estado

4.1. Chihuahua

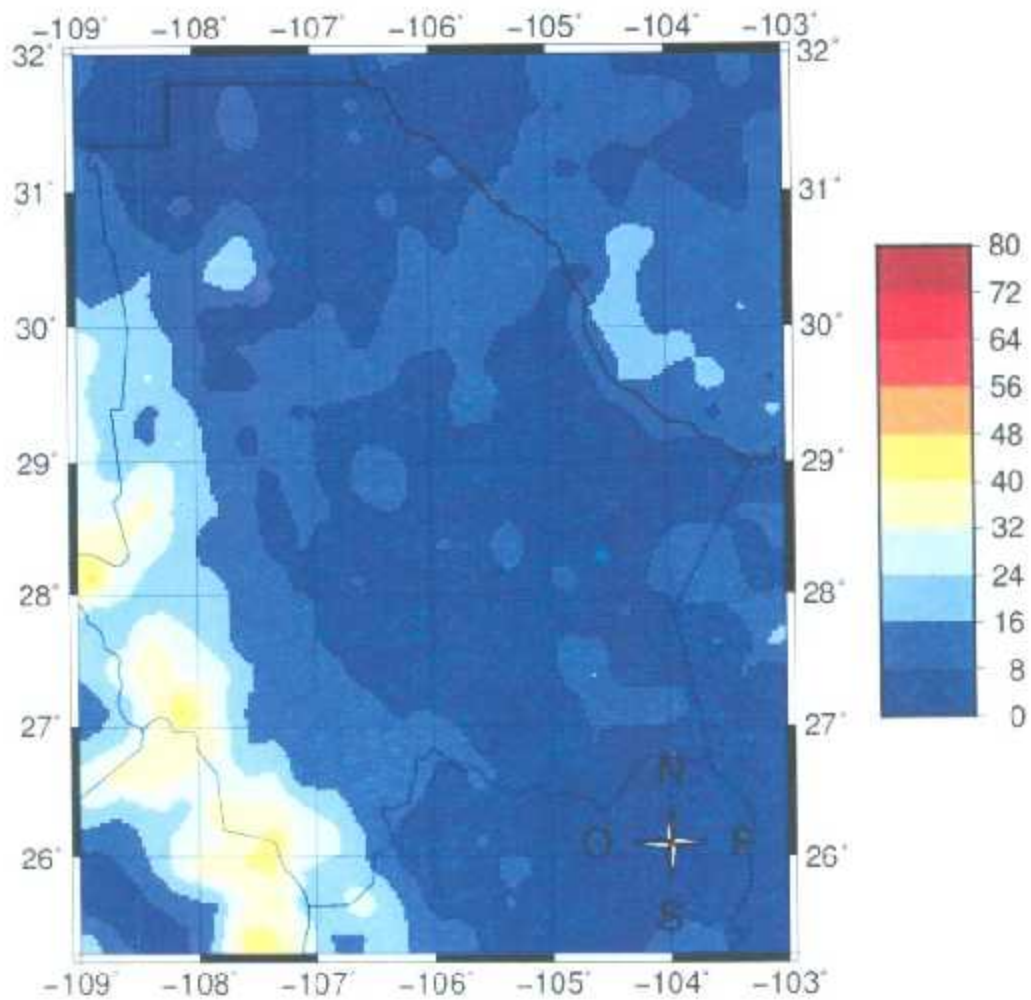


Figura 4.1: Densidad de rayos promedio $\times \text{km}^2$ en el Estado de Chihuahua.

Agrupando la información que se obtiene del LIS, nos podemos dar cuenta que una gran cantidad de los rayos que se presentan en general, sobre la región norte del país, se concentran sobre regiones montañosas, como podemos observar en la Figura 4.1, la cantidad de rayos se incrementa conforme nos acercamos a la Sierra Madre Occidental, la cuál también es frontera entre el estado de Chihuahua y el de Sinaloa, esto a su vez es la razón por la cuál se produce este incremento de descargas, en general producidas por la evaporación del agua que se produce en la costa sinaloense y generando ascensos de masas de aire por la orografía de la región.

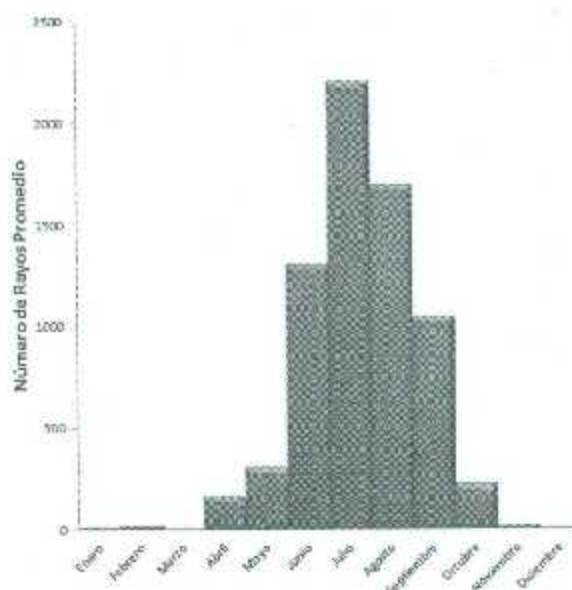


Figura 4.2: *Distribución de Rayos por mes en el Estado de Chihuahua.*

La actividad de rayos observada sobre esta región nos muestra también que la mayor parte se presenta entre los meses de Junio y Septiembre (ver Figura 4.2), que coincide con los meses en que se presenta la temporada de ciclones en el pacífico mexicano. El mes con la mayor actividad es Julio en el cuál el LIS visualiza en promedio alrededor de 2,205 rayos sobre territorio chihuahuense y poblaciones vecinas, en contraste, los meses de Marzo y Diciembre son los que menor actividad presentan 6 y 7 rayos respectivamente.

En promedio en esta región el LIS logra observar más de 7,000 rayos al año, en la Figura 4.3 claramente podemos ver que el año 2011 presenta la menor actividad de rayos, esto debido a la fuerte relación que existe entre la generación de rayos y las tormentas, produciéndose en este año la mayor sequía de la que se tenga conocimiento en el norte del país.

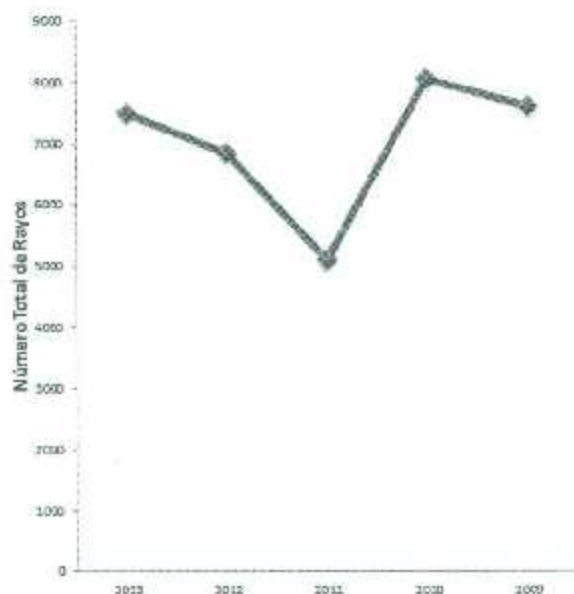


Figura 4.3: *Distribución de Rayos por año en el Estado de Chihuahua.*

Realizando el análisis estadístico se genera un histograma de frecuencias (ver Figura 4.4), en el cuál podemos ver la distribución de rayos, en promedio cada porción de territorio de aproximadamente 694 km^2 presenta 10,84 rayos al año con una desviación estándar de 8,5, lo cuál para nuestro interés se interpreta como zona de riesgo moderado, la cuál ocupa la mayor parte de la región, la zona de riesgo bajo se encuentra por debajo de esta desviación estándar, muy pocas porciones del mapa que se presenta en la Figura 4.5 tienen esta característica (entre 0 y 2,34 rayos al año) casi una actividad de rayos nula, la mayor parte de ellas muy próximas a la región desértica cercana a Ojinaga. Por otro lado la zona de mayor intensidad en la generación de descargas atmosféricas, y por lo tanto denominada zona de riesgo alto, es visualizada en color rojo, y como se había mencionado corresponde

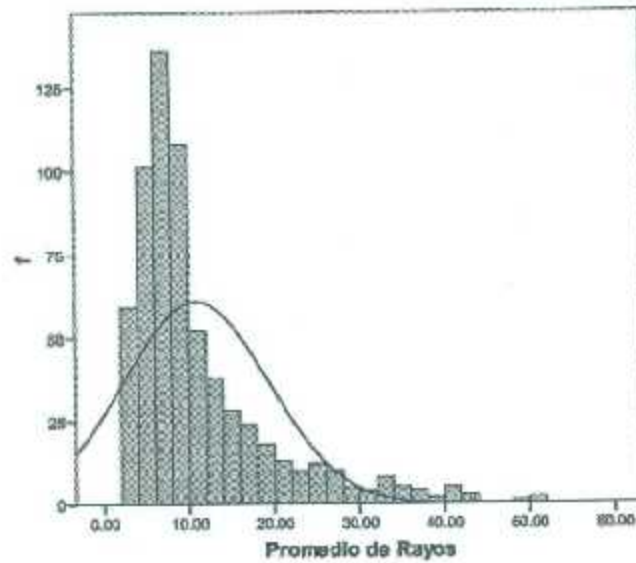


Figura 4.4: Histograma de frecuencias en el Estado de Chihuahua, la frecuencia representa el número de celdas con igual cantidad de rayos.

a las zonas aledañas a la Sierra Madre Occidental, la actividad en esta región mantiene una tendencia de entre 19 y 51 rayos, donde los picos máximos se encuentran en latitud $28,125^\circ$ longitud $-108,875^\circ$ en Sierra Oscura, Chihuahua cerca de los 2,000 m sobre el nivel del mar, latitud $27,125^\circ$ longitud $-108,125^\circ$ en Barranca del Cobre, Chihuahua, y latitud $26,125^\circ$ longitud $-107,375^\circ$ entre los municipios de Badiraguato, Sinaloa y Guadalupe y Calvo, Chihuahua, con 51, 50 y 48 rayos respectivamente.

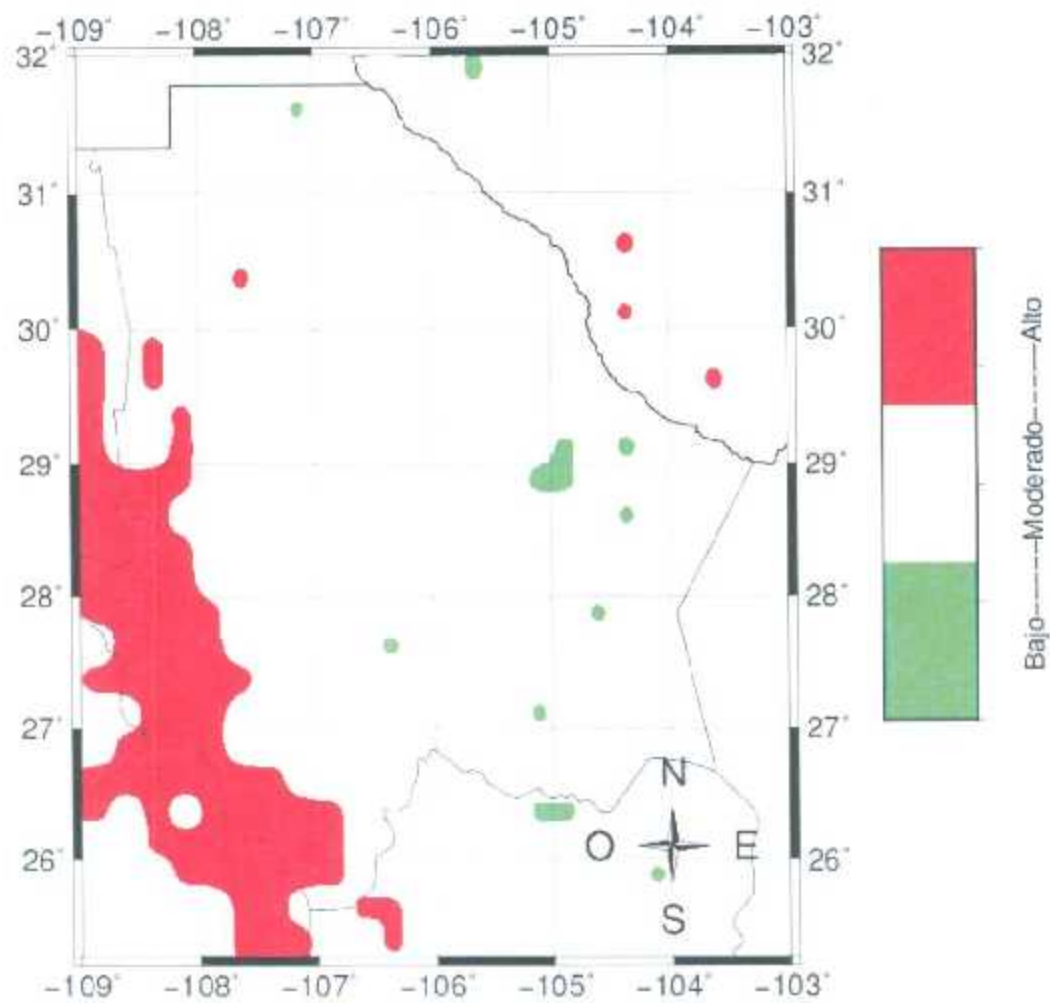


Figura 4.5: Mapa de los niveles de riesgo de descarga atmosférica en el Estado de Chihuahua.

4.2. Coahuila

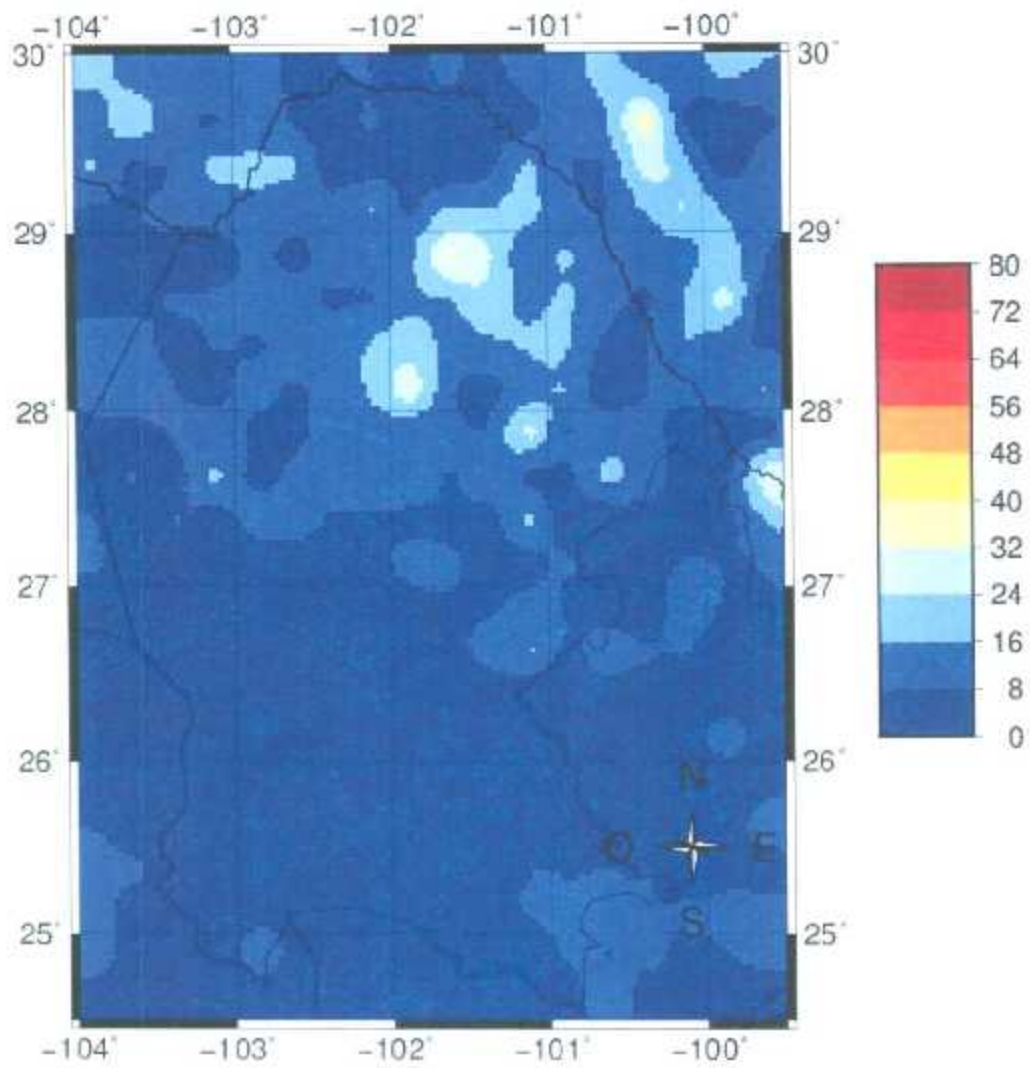


Figura 4.6: Densidad de rayos promedio \times km² en el Estado de Coahuila.

Una gran parte del estado de Coahuila mantiene una densidad de entre 0 y 8 rayos, en su mayoría sobre las partes más áridas y al sur del estado, alejándose de estas zonas y hacia el norte de Coahuila, se incrementa la actividad de rayos conforme nos acercamos a la zona montañosa adyacente a los municipios de Muzquiz y Palaú, y avanzando hacia los municipios de Allende, Piedras Negras y Acuña, esta región presenta la mayor actividad (entre 24 y 32 rayos) en comparación con el Parque Nacional Ocampo y el Parque Nacional Maderas del Carmen que tienen una actividad mayor a las zonas áridas del estado pero menor que la región descrita con anterioridad (entre 8 y 16 rayos).

Como se puede observar nuevamente, como en el caso de Chihuahua, la mayor densidad de rayos se presenta sobre las regiones montañosas, al ser estas, regiones que durante el verano presentan altas temperaturas de alrededor de 40°C , una concentración de humedad mayor a la del resto del Estado, y también, es una parte del país en la que infieren frentes del norte del planeta, esto da lugar a que se conviertan en lugares proclives a la formación de cumulonimbus que producen descargas atmosféricas.

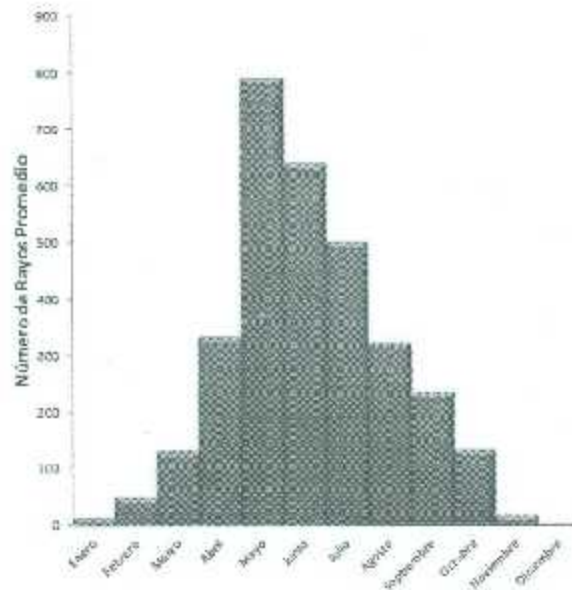


Figura 4.7: *Distribución de Rayos por mes en el Estado de Coahuila.*

En la Figura 4.7 nos muestra que la actividad más importante se presenta a partir del

mes de mayo con cerca de 800 rayos y comienza a descender progresivamente hasta los meses de agosto y septiembre en los que aun se presentan algunas lluvias pero con menor actividad eléctrica. Los meses con menor cantidad de rayos son los que representan la temporada invernal y parte del otoño, estos son Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero, siendo Diciembre el mes con menor actividad con un promedio de 0,2 rayos al año.

El LIS visualiza sobre Coahuila una cantidad de rayos de entre 3000 y 3500 pero en el año 2011 se observa un dramático descenso, año en el que se presentó la mayor sequía de la que se tenga registro en el norte del país como se puede ver en la Figura 4.8, el LIS solamente logró captar 1731 eventos casi la mitad de la media anual, mientras que en el 2011 se presentó un incremento con 4266 eventos captados.

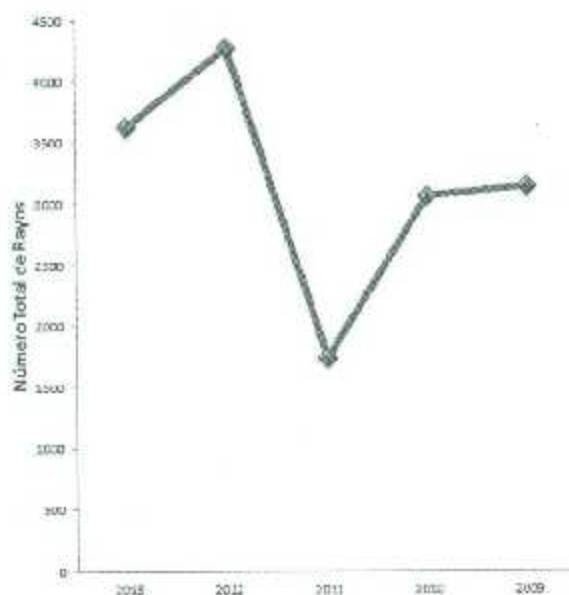


Figura 4.8: *Distribución de Rayos por año en el Estado de Coahuila.*

A diferencia de Chihuahua y Durango, Coahuila tiene un menor promedio de rayos con solo 8 rayos al año y una desviación estandar de 5,8 con lo cual podemos determinar la zona de riesgo moderado. Como ya se menciono algunas de las zonas de riesgo son las regiones montañosas cercanas a Múzquiz y desplazándose hacia la frontera con Estados Unidos con una actividad mayor a los 13,8 rayos en promedio que se puede ver en color

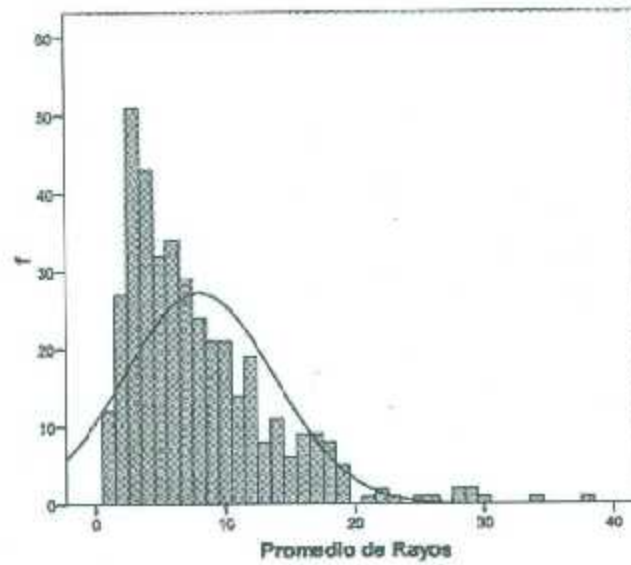


Figura 4.9: *Histograma de frecuencias en el Estado de Coahuila, la frecuencia representa el número de celdas con igual cantidad de rayos.*

rojo en la Figura 4.10, mientras que una de las zonas de riesgo bajo más extensas es la comprendida entre los municipios de Saltillo y Parras de la Fuente con un promedio de entre 0 y 2,2 rayos al año.

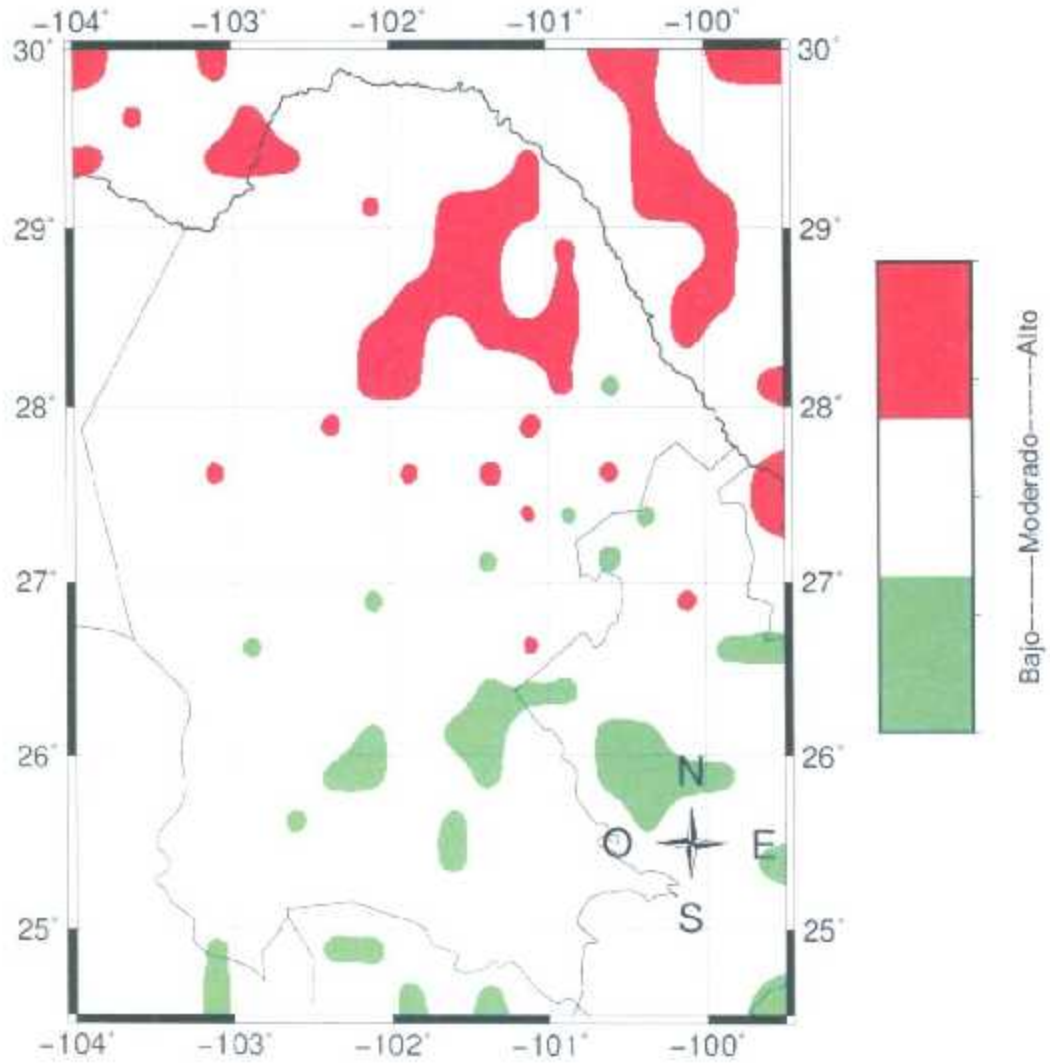


Figura 4.10: Mapa de los niveles de riesgo de descarga atmosférica en el Estado de Coahuila.

4.3. Durango

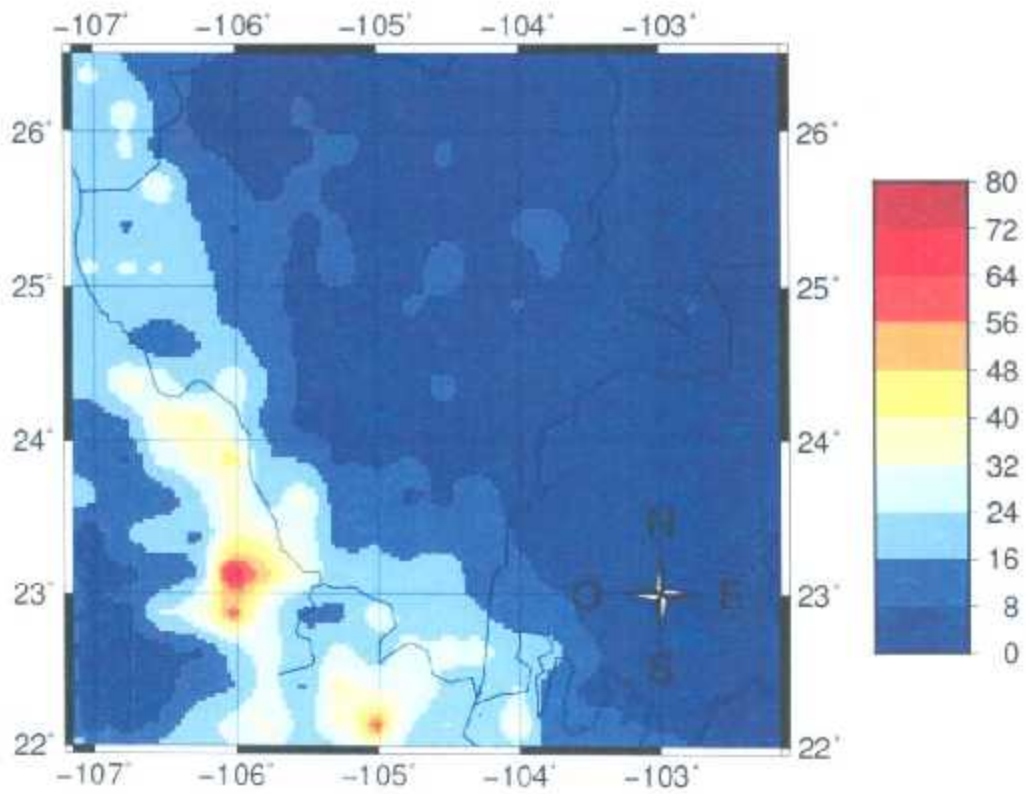


Figura 4.11: Densidad de rayos promedio $\times km^{-2}$ en el Estado de Durango.

Durango al ser un estado pequeño en comparación con Coahuila y Chihuahua el comportamiento de las nubes de tormenta sobre esta región tiene mucho que ver con los estados con los que comparte frontera, por ejemplo, su frontera con el estado de Sinaloa presenta una gran cantidad de rayos visualizados y en general provoca que la media de rayos al año se la mayor de los tres estados en estudio con 10,92 así como una desviación estándar de 11,35 por compartir frontera con la extensión desértica de Coahuila, así podemos ver que la generación de descargas atmosféricas tiene un rango bastante amplio debido a la gran variedad de rasgos orográficos que mantiene, como se puede observar en la Figura 4.11 hacia el sur del estado sobre la parte correspondiente a la Sierra Madre Occidental, encontramos valores que oscilan entre los 16 y 32 rayos disminuyendo conforme se avanza hacia el norte alejándose de la zona montañosa e internándose hacia los lugares desérticos de la región colindantes con los estados de Coahuila y Chihuahua en los que los valores mínimos se encuentran entre los 0 y 8 rayos.

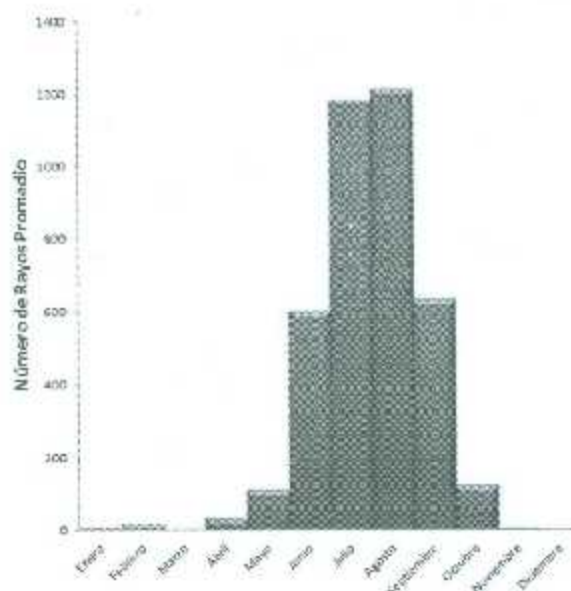


Figura 4.12: *Distribución de Rayos por mes en el Estado de Durango.*

Los meses en los que se encuentra alrededor del 60% de los rayos sobre el estado son Julio y Agosto, con 1184,4 y 1213 rayos en promedio respectivamente, como se muestra

en la Figura 4.12 el período comprendido entre Noviembre y Mayo es muy bajo, tan solo representa el 7,63 % de la actividad total en el año, repartiendo el restante entre los meses de Junio y Septiembre con 600,4 y 634,4 rayos respectivamente.

En la Figura 4.13 nuevamente aparece (como en 4.3 y 4.8) el año 2011 como el que menos rayos presentó con 3218, aunque con un descenso menos dramático que el visualizado en el resto de los estados. Entre el año 2011 y 2010 tan solo existe una diferencia de 184 rayos, y entre 2011 y 2009 el año con más descargas atmosféricas con 4828, hay una diferencia de 1610 rayos.

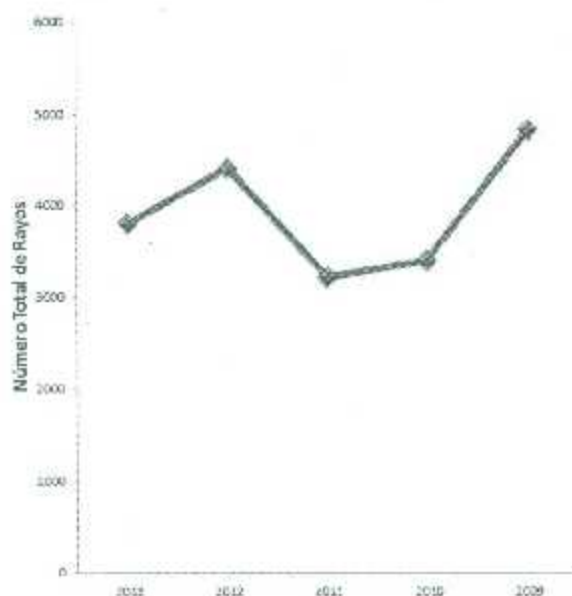


Figura 4.13: *Distribución de Rayos por año en el Estado de Durango.*

La estadística nos indica que la media en el estado de Durango es de 10,9 rayos al año, con una desviación típica de 11,4, una media mayor que la de los estados antes mencionados, y una desviación estándar también mayor debido a los cambios geográficos en su frontera, podemos decir que Durango se divide en dos zonas de actividad de rayos, la de mayor actividad es la que comparte límites con Sinaloa y perteneciente a la Sierra Madre Occidental y la que menor actividad presenta es la región llana al norte, colindante con los estados de Coahuila y Chihuahua, aquí la actividad más intensa es sobre la región de

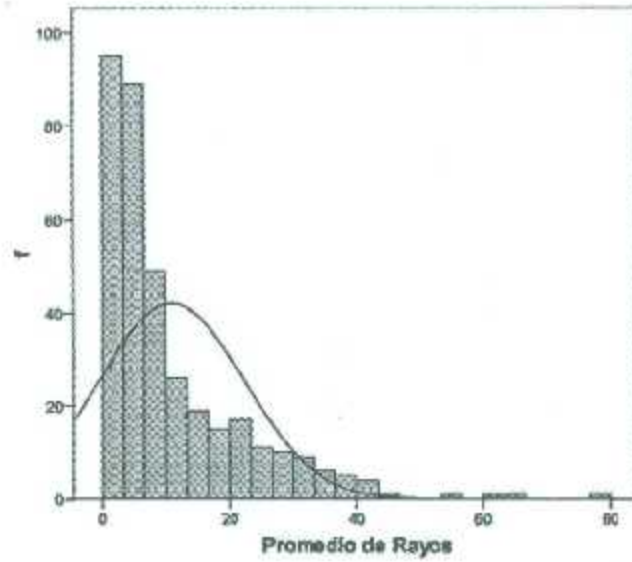


Figura 4.14: *Histograma de frecuencias en el Estado de Durango, la frecuencia representa el número de celdas con igual cantidad de rayos.*

Escuinapá, Sinaloa con cerca de 80 rayos al año.

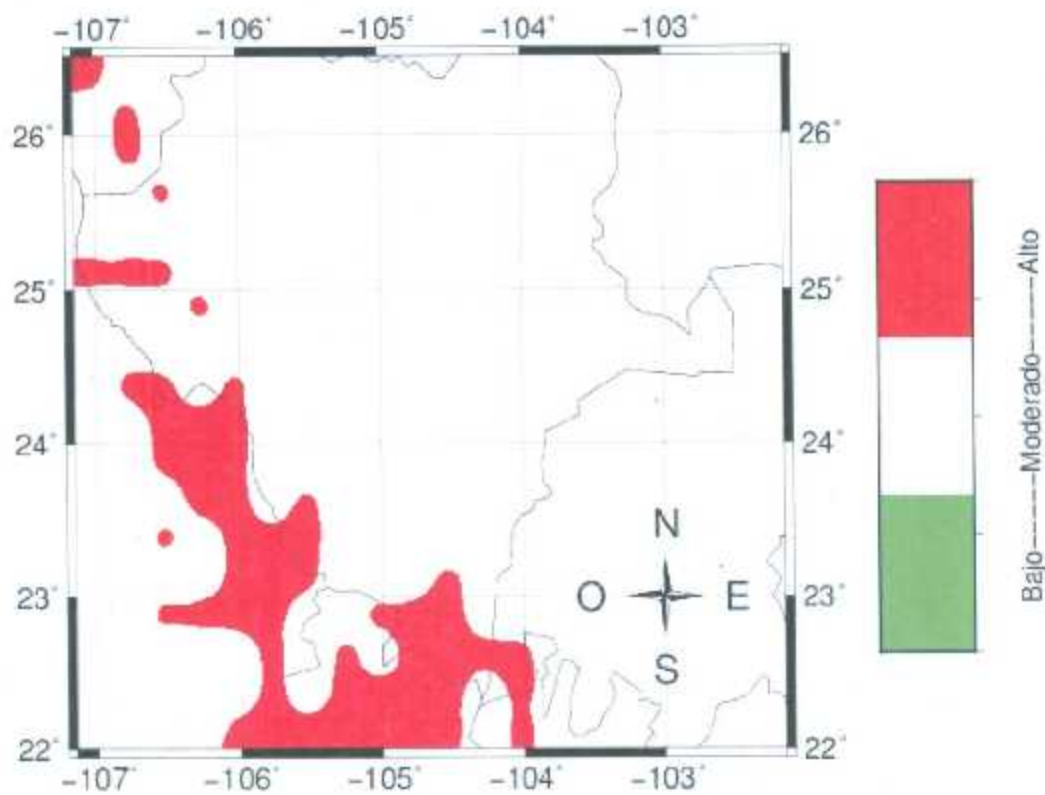


Figura 4.15: Mapa de los niveles de riesgo de descarga atmosférica en el Estado de Durango.

4.4. Algoritmo de lectura y filtrado en Python

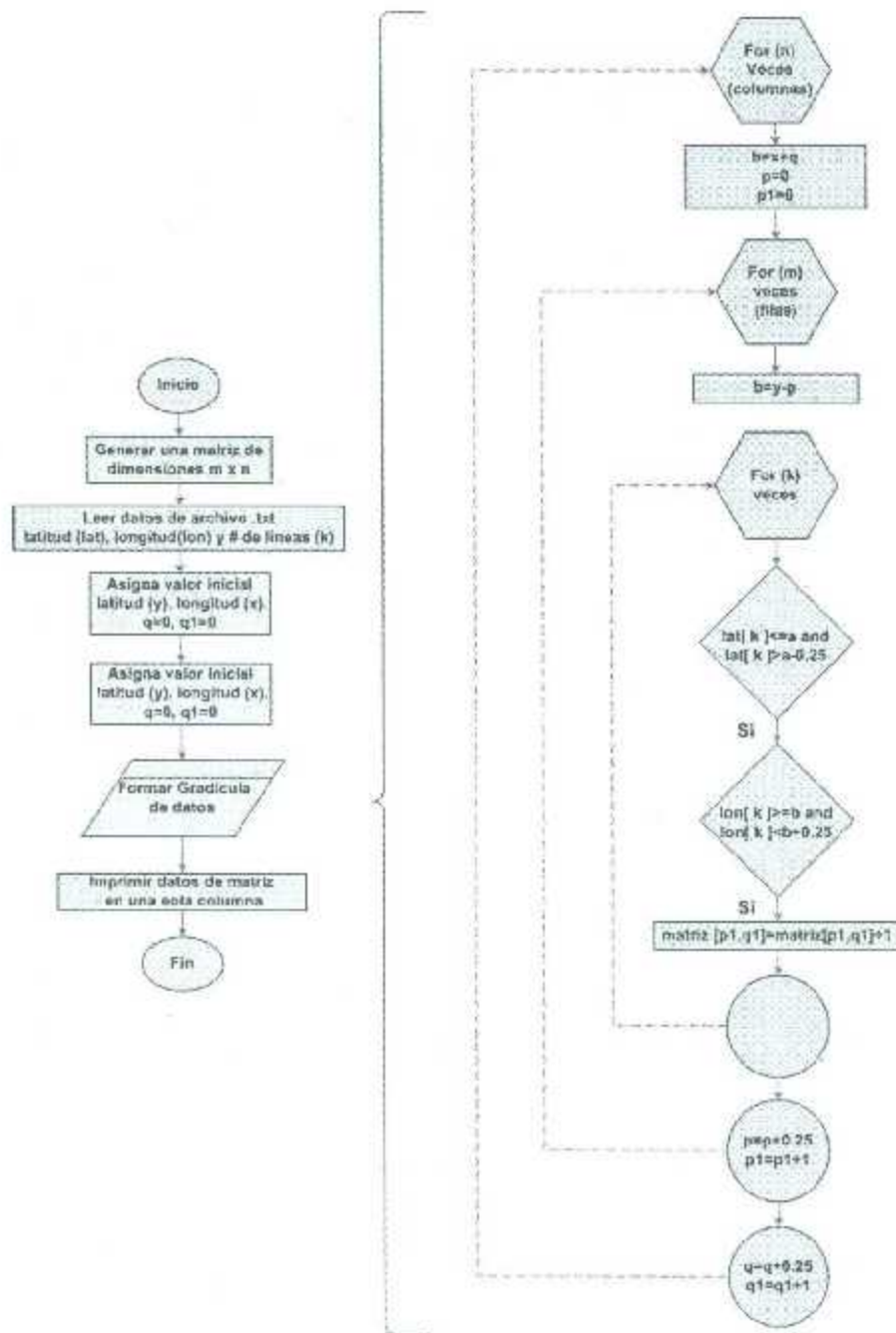


Figura 4.16: Algoritmo de lectura y filtrado en Python.

4.5. Días de Tormenta al Año en el Norte del País

En las Figuras 4.17 y 4.18 se presentan los días de tormenta al año para la región comprendida entre las latitudes 32° y 22° y las longitudes -109° y -99° que corresponde en su mayor parte a los estados bajo estudio. En el mapa de días de tormenta promedio se presentaron máximos de 8 entre los estados de Durango y Chihuahua, la mayor parte de la imagen muestra alrededor de 6 días promedio al año, la región que menos días de tormenta tiene es aquella que se observa entre Acuña y Piedras Negras, Coahuila.

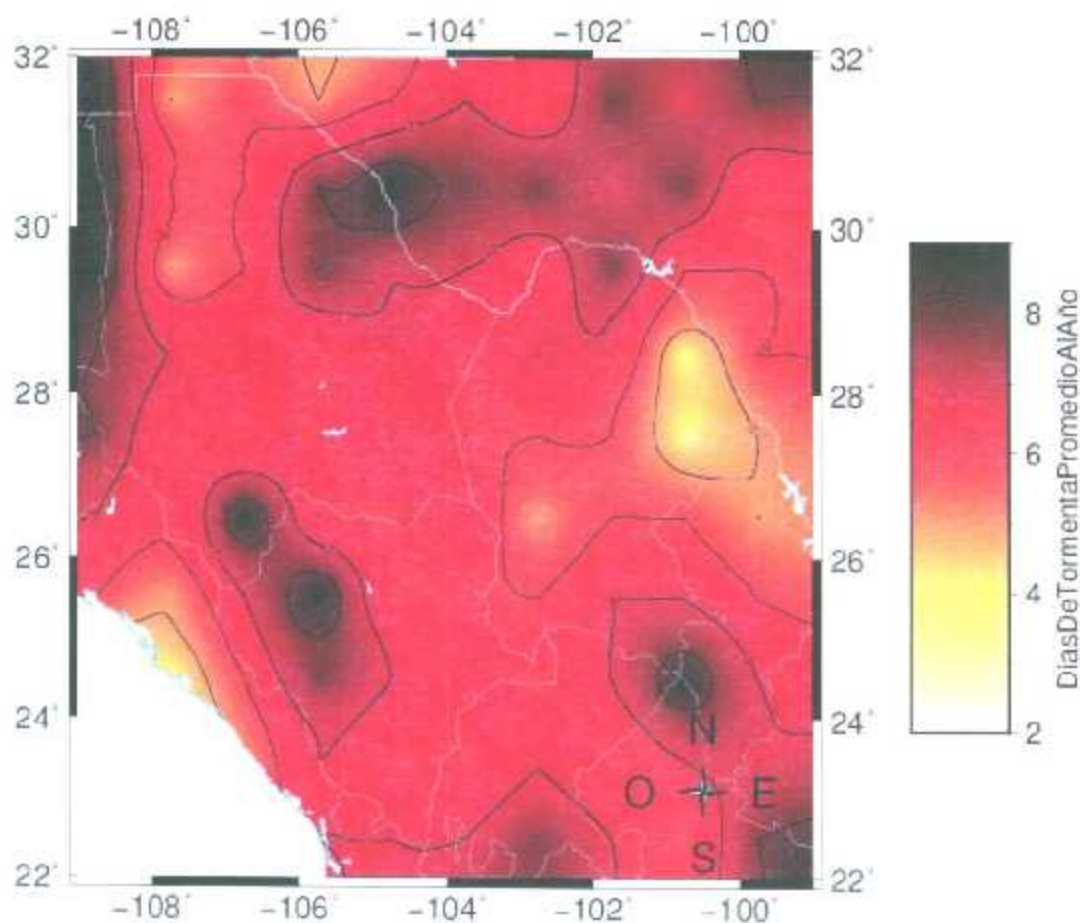


Figura 4.17: Mapa de días de tormenta promedio al año a resolución $1^\circ \times 1^\circ$.

En la Figura 4.18 se observa que las zonas con máximos de días de tormenta al año coinciden con los que mayor densidad de rayos presentan, se visualizan máximos de 18 y

mínimos de 16. Para cálculo de la densidad de rayos nube tierra, se utilizan por lo general mapas promedio de días de tormenta, aunque hay países en los que se prefiere utilizar las máximas variables que se presentan en un periodo de tiempo.

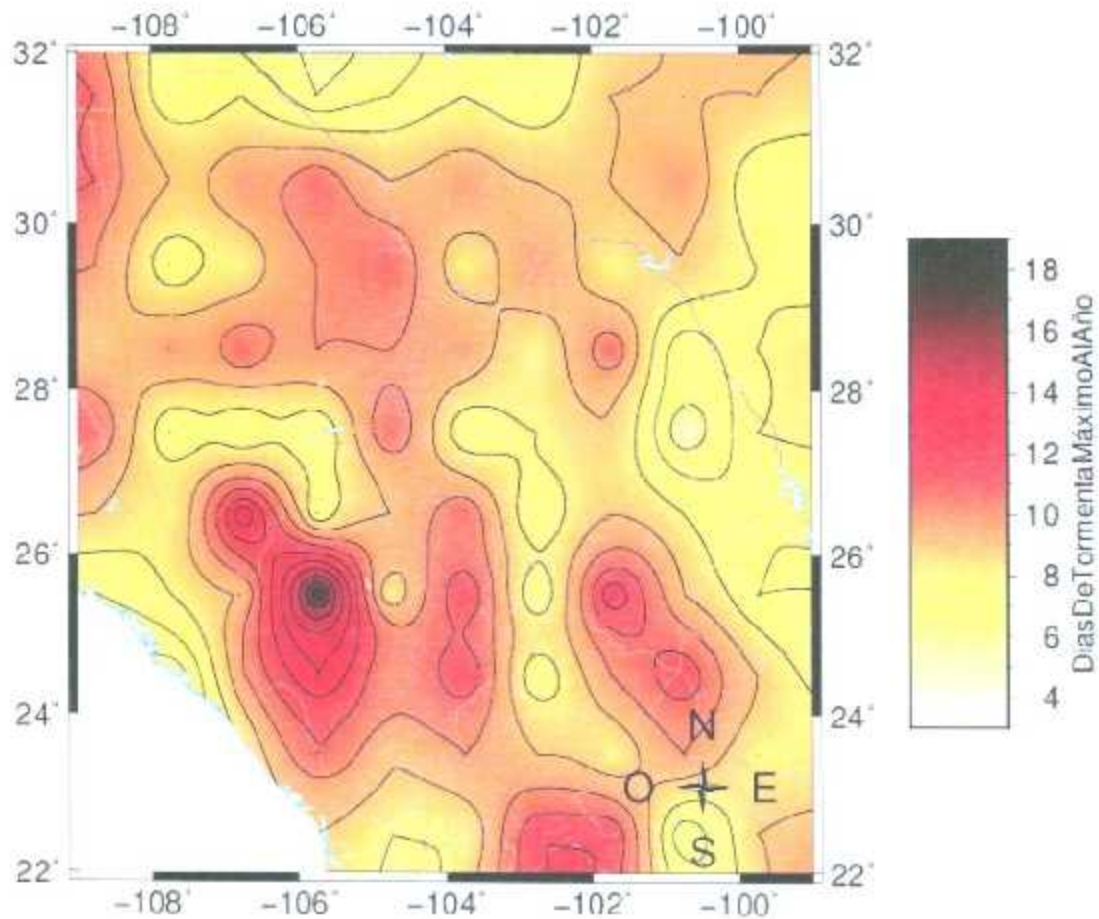


Figura 4.18: Mapa de días de tormenta máximo al año a resolución $1^{\circ} \times 1^{\circ}$.

Capítulo 5

Conclusiones

- Se puede observar que la mayor densidad de descargas se presenta sobre las regiones montañosas de los tres estados, sin embargo los estudios realizados por medio de los contadores de descargas solo permiten ver de forma clara este aspecto sobre la Sierra Madre Occidental, uno de los sistemas montañosos más importantes del país, pero en el estado de Coahuila sobre el borde norte de la Sierra Madre Oriental esta información no resalta de la misma forma, tal vez por que la ubicación de los contadores no permitía la medición correcta en esa región en específico. La presencia de rayos sobre los sistemas montañosos es afín a numerosas publicaciones sobre este mismo tema en las que se detallan esta característica, y puede deberse en su mayor parte a factores climáticos, como la lluvia, el viento y la temperatura que convergen en estos lugares para dar lugar a la formación de las nubes de tormenta.
- Los lugares que presentaron densidades altas también son aquellos que se clasificaron como zonas de riesgo alto y como consecuencia se debe prestar mayor atención en el diseño, operación y mantenimiento de líneas de transmisión que atraviesen o se encuentren cercanas a estas zonas, poniendo principal interés en los ángulos de blindaje y en las resistencias a pie de torre.
- El inicio de la temporada de ciclones y lluvias y la orografía de los estados tiene mucha relevancia en la distribución de rayos, ya que el movimiento de las masas de aire sobre

el territorio nacional generan ascensos de aire caliente y humedad que producen este fenómeno meteorológico. Las regiones cercanas a los sistemas montañosos tienen un riesgo mayor de caída de rayo.

- La Sierra Madre Occidental presenta una actividad de rayos mayor que la Sierra Madre Oriental por su cercanía al mar y a la costa sinaloense que presenta altas temperaturas durante la temporada de ciclones.
- De acuerdo a los comentarios realizados por el personal de CFE las líneas que más salidas por caída de rayo tienen, se encuentran situadas en los lugares definidos como de alto riesgo.

Como indica el estándar 1410 del IEEE y la bibliografía consultada [3]-[30], es posible utilizar los mapas de densidad de rayos generados con información de satélite para estimar la densidad de rayos de nube a tierra en lugares donde no exista equipo de medición, siendo esta una medida mucho más precisa que los antiguos mapas de días de tormenta al año, sin embargo es necesario estudiar con mayor profundidad la relación existente entre esta información y la recabada por equipos en tierra, así como la forma en que puede afectar la resolución utilizada en el archivo raster.

- Es importante mencionar que el conocimiento de esta distribución de rayos es de ayuda para identificar las zonas más adecuadas para la localización de los sistemas de detección de rayos en tierra, y lograr así aproximaciones más precisas en posteriores investigaciones.

5.1. Trabajos Futuros

- Es necesario realizar estimaciones de las tasas de salidas de la líneas de transmisión utilizando el programa FLASH propuesto por el IEEE en su estándar 1243, para determinar que segmentos de línea provocarían más problemas de acuerdo a la densidad de rayos y las resistencias a pie de torre, y comparar estos resultados con las

tasas de salida reales, ya que algunas de los tramos de línea con afectaciones por caída rayo tienen resistencias a pie de torre muy altas.

- Generar mapas de resistividades de terreno de los mismos estados y cruzar esta información con los mapas de riesgo de descarga atmosférica para completar un atlas de riesgo de falla en líneas de transmisión y mejorar la planificación y mantenimiento de estas mismas.
- Realizar estudios de polaridad y multiplicidad del rayo para una mejor clasificación de las zonas de riesgo, para esto es necesario la adquisición de equipos en tierra dedicados a la localización y clasificación de rayos.
- Actualizar el mapa actual de isodensidades de rayos de nube a tierra del país una vez adquiridos los equipos.
- Determinar la relación existente para nuestra región, entre las descargas nube-tierra y los eventos visualizados por el LIS.

Referencias

- [1] Rodríguez Ma, Zabre E. Sistema de análisis y monitoreo remoto de descargas atmosféricas. Technical report, Instituto de Investigaciones Eléctricas, <http://www.iie.org.mx/publica/boljul96/arttec2.htm>, Julio-Agosto 1996.
- [2] Christian et. Al. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the optical transient detector. *Journal of Geophysical Research*, 108:ACL 4-1-ACL 4-15, 2003.
- [3] Ieee std 1410-2010 guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines, 2010.
- [4] Gerardo Montoya T. Carlos Romualdo-Torres Isaias Ramirez-Vazquez, Ramiro Hernandez-Corona. Analysis of the mexican lightning activity monitored by nasa satellites. *Electric Power Systems Research*, 72:187-193, 2004.
- [5] J. Ramírez y J. Rodríguez L. Díaz, M. Martínez. Actualización de la actividad de rayos en venezuela, empleando la información del proyecto satelital de la nasa. In *II Congreso Venezolano de Redes y Energía Eléctrica*, 2009.
- [6] R. Montaña M. Martínez, J. Ramírez. Lightning activities in venezuela using the lightning imaging sensor of trmm nasa project. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 26(2):127-139, Julio 2003.
- [7] Ieee std 1724-2011 guide for the preparation of a transmission line design criteria document, 2011.

- [8] Ieee std 1243-1997 guide for improving the lightning performance of transmission lines, 1997.
- [9] Martin A. Uman. *Lightning*. Dover Publications, 1984.
- [10] Martin A. Uman. *The Art and Science of Lightning Protection*. Cambridge University Press, 2008.
- [11] H.D. Betz. *Lightning:Principles, Instruments and Applications*. Springer, 2009.
- [12] Murphy M. J. y Tuel J. V. Cummins K. L. Lightning detection methods and meteorological applications. In *IV International Symposium on Military Meteorology, Hydro-Meteorological Support of Allied Forces and PJP Members Tasks Realization*, 2000.
- [13] R. H. Golde. *Lightning*. Academic Press, 1977.
- [14] Fernando I.M.K Somnadara D.U.J., Edirisinghe C.M. Performance comparison between the magnetic direction finding technique and the time of arrival technique. *Proceedings of the Technical Sessions*, 17:30-36, 2001.
- [15] J. V. Cummins K. L., Murphy M. J. y Tuel. Introduction to lightning detection. Technical report, Vaisala-GAI Inc., 2004.
- [16] Cummins K. L. Lojou J.Y. Total lightning mapping using both vhf interferometry and time-of-arrival techniques. In *19th International Lightning Detection Conference*, 2006.
- [17] Poelman D.R. On the science of lightning: An overview. Technical report, Royal Meterological Institute of Belgium, 2010.
- [18] Spitzer N. Ryan P.A. Stormscope, 1977.
- [19] Michael Goodman. Optical transient detector. <http://lightning.nsstc.nasa.gov/otd/>, 1998 January.

- [20] Hugh J. Christian et Al. The lightning imaging sensor. In *NASA conference publication*, pages 746–749. NASA, June 1999.
- [21] Vernon Cocray. *Lightning Protection*, volume 58 of *IET Power and Energy*. The Institution of Engineering and Technology, United Kingdom, ebook edition, 2010, ISBN 978-1-84919-106-7.
- [22] Low-voltage surge protective devices - part 12: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems - selection and application principles - iec 61643-12.
- [23] V.A. Rakov. Lightning: Phenomenology and parameters important for emc. In *The 4th Asia-Pacific Conference on Enviromental Electromagnetics*, 2006.
- [24] Juan A. Martinez Velasco. *Coordinacion de Aislamiento en redes electricas de alta tension*. McGrawHill, 2008.
- [25] NASA. Lightning and atmospheric electricity research at the ghcc. <http://lightning.nsstc.nasa.gov/>, January 1998.
- [26] David M. Beazley. *Python Essential Reference*. Developer's Library, fourth edition edition, 2009.
- [27] Manuel Salvador Luzania Valerio. Qué son los sistemas de información geográfica? *Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Universidad Veracruzana*, XVIII(3), Septiembre-Diciembre 2005.
- [28] Gabriel Ortiz Rico. Sistemas de información geográfica (sig). *Boletín de los Sistemas Nacionales Estadísticos y de Información Geográfica*, 1(2):56–65, 2006.
- [29] Walter H.F Smith Paul Wessel. *The Generic Mapping Tools: A Map-Making Tutorial*, 4 edition, October 2004.

- [30] Australian Government: Bureau of Meteorology. Annual lightning data (base climatological data sets): Annual lightning ground flash density & annual lightning total flash density. Technical report, Bureau of Meteorology, 2007.
- [31] The University of Arizona. Lightning location at lf and vlf using magnetic direction finding and time of arrival. <http://www.atmo.arizona.edu/index.php?section=courses>, 2008.
- [32] Asociación de Normalización y Certificación "ANCE". Nmx-j-549-ance-2005 - sistema de protección contra tormentas eléctricas - especificaciones, materiales y métodos de medición. Diario Oficial de la Federación, Marzo 2006.
- [33] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Mapas para imprimir: Mapa nacional de relieve. inegi.org.mx.
- [34] Comisión Federal de Electricidad. Programa de obras e inversiones del sector eléctrico. sener.gob.mx, 2007.

Anexos

Anexo A

Sistema Detector de Rayos Boltek

LD-250



Figura A.1: Boltek LD-250. Cortesía de Subgerencia de Subestaciones y Líneas Región Norte de CFE.

Los equipos de localización de la compañía Boltek Corporation con sede en la ciudad de Buffalo en Nueva York, E.U., utilizan en combinación una antena goniométrica y un demodulador de señal que aplica el método de intensidad de señal para determinar la ubicación de la fuente de radiación electromagnética.

Como lo menciona en su manual de instalación, la información que provee el Boltek LD-250 es únicamente aproximada y no debería usarse para aplicaciones de seguridad, y debido a que tampoco existe información científica acerca del funcionamiento de este dispositivo, asumiremos que la operación y metodología de operación es similar al de los Sistemas Mapeadores de Clima “Stormscope” los cuales fueron los primeros instrumentos desarrollados específicamente para detectar y mapear las tormentas eléctricas analizando las señales radiadas de las descargas eléctricas de las células de tormenta, con la finalidad de detectar las zonas de riesgo de turbulencia para aeronaves.

La antena o sensor goniométrico magnético utiliza por lo general dos antenas de lazo

ortogonales. Cuando una descarga distante se presenta se producirá un campo magnético horizontal \mathbf{B} , que atravesará la antena como se muestra en la Figura A.2.

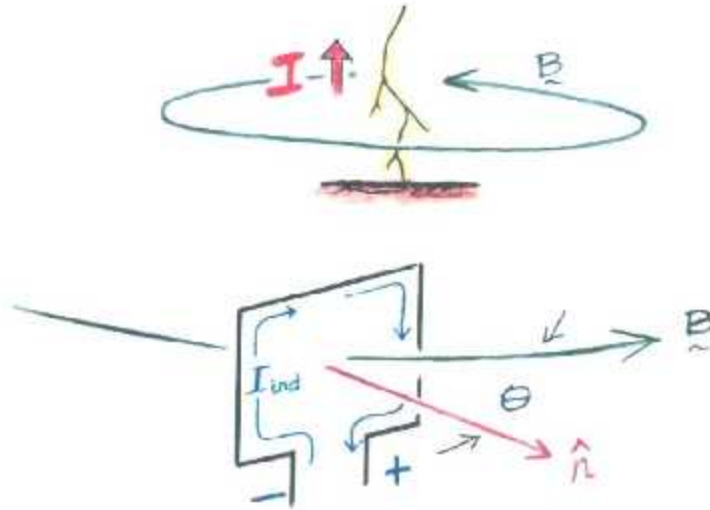


Figura A.2: Campo magnético en antena de lazo. Modificado de [31].

La ley de Faraday establece que la tensión a través del final abierto de la antena de lazo, será igual a la razón de cambio del flujo a través de la antena.

$$V = -\frac{\partial}{\partial t} \int_s \mathbf{B} \cdot \hat{\mathbf{n}} dA \quad (\text{A.1})$$

$$V = -A \cos\theta \frac{dB}{dt} \quad (\text{A.2})$$

Se asume que \mathbf{B} es uniforme a través de la superficie de la antena. Esta señal de tensión puede ser integrada para dar una señal que es proporcional a la \mathbf{B} .

Un punto importante de la ecuación es que la señal de salida de la antena dependerá del lugar de la descarga con respecto al plano de la antena (el término $\cos\theta$).

Entonces el ángulo de llegada de una descarga atmosférica puede ser determinado usando las señales de dos antenas ortogonales como se puede ver en la Figura A.3.

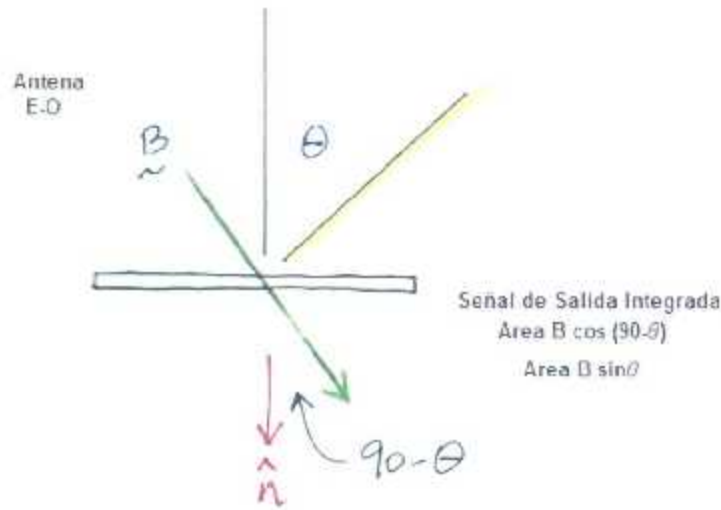


Figura A.3: La señal del lazo Este-Oeste es proporcional al seno del ángulo de llegada. Modificado de [31].

$$\frac{E - O}{N - S} = \text{Tan}\theta \quad (\text{A.3})$$

$$\theta = \text{Tan}^{-1} \frac{E - O}{N - S} \quad (\text{A.4})$$

La raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las dos señales nos da la amplitud de campo **B**.

$$\sqrt{(E - O)^2 + (N - S)^2} = \sqrt{\text{Area}^2 B^2 \text{Cos}^2\theta + \text{Sen}^2\theta} \quad (\text{A.5})$$

Por lo tanto al ser una antena sensible a los campos electromagnéticos irradiados por el rayo, se induce una tensión proporcional en la antena por medio de acoplamientos electromagnéticos. Esta tensión inducida es comparada con el mínimo de tensión inducida necesaria para iniciar la secuencia de análisis de la forma de onda de la señal como se muestra en la Figura A.6.

Conocido alguno de los componentes del espectro electromagnético medido a cierta distancia en un rango de frecuencia determinado, es posible estimar la localización de la

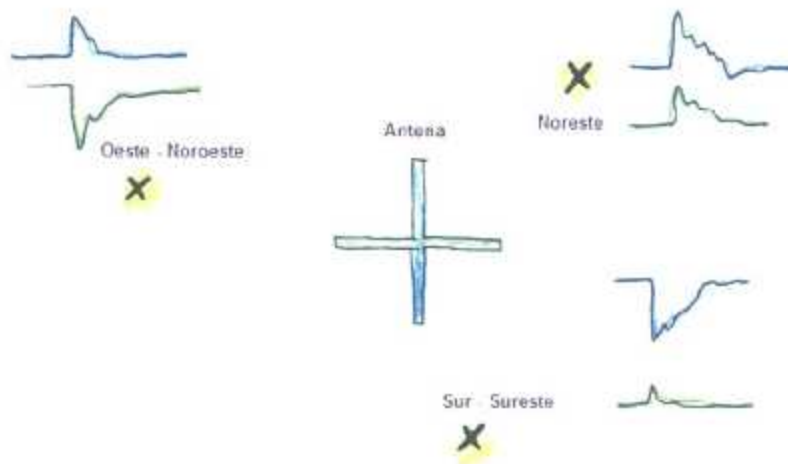


Figura A.4: Diversos tipos de señales de lazo dependientes del ángulo de llegada. Modificado de 41.

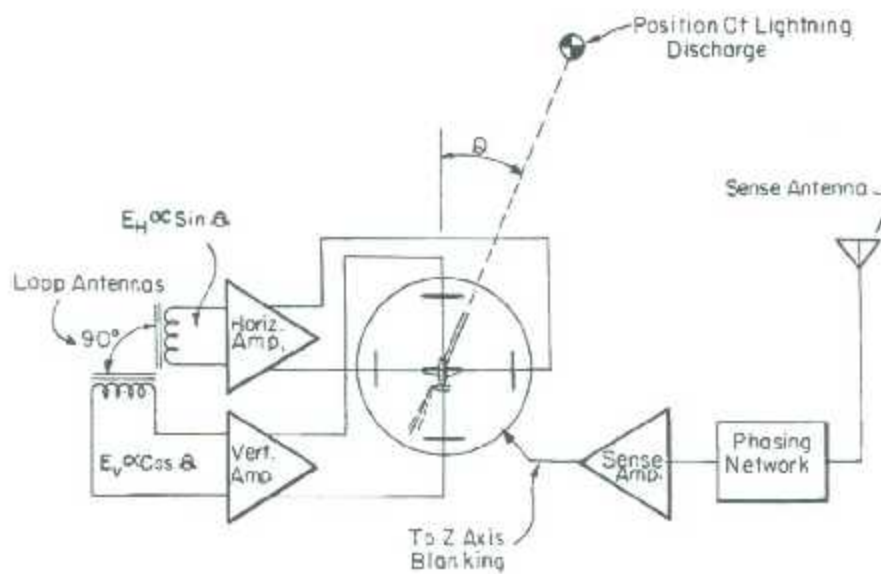


Figura A.5: Diagrama de operación Stormscope. Tomado de cite10.

fuentes, en este caso el Stormscope utiliza como referencia un golpe de retorno de 19000 A, probablemente el Bolttek utilice un valor ubicado entre los 19000 y los 28000 A.

Este dispositivo por lo tanto es un equipo móvil y compacto que puede utilizarse en aeronaves o en automóviles, que proporciona una idea de la magnitud de las tormentas eléctricas y su cercanía, y es mucho más económico que un equipo dedicado a la localización de rayos.

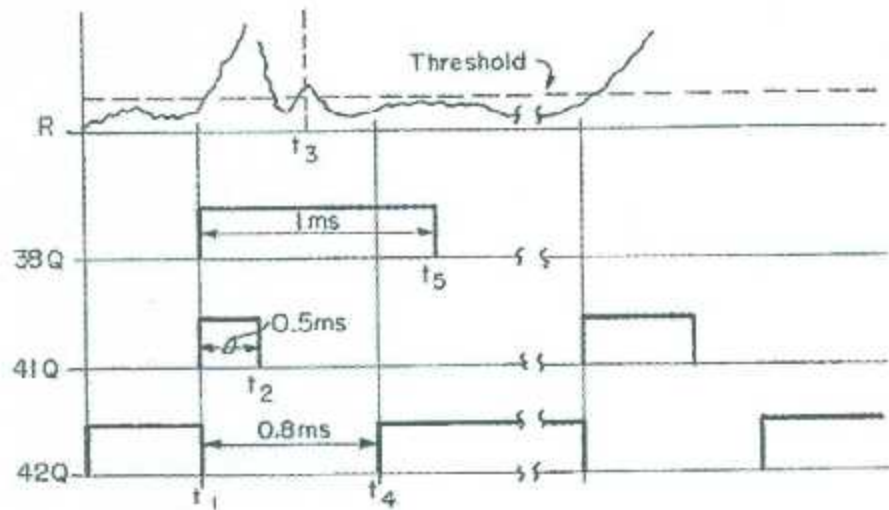


Figura A.6: Diagrama de pulsos stormscope. Tomado de [18].

El problema con estos dispositivos radica en la frecuencia de operación que por lo general se encuentra en la banda VHF, esto puede provocar falsos positivos debido a la cercanía con fuentes interferentes como lo pueden ser líneas de transmisión o equipos electrónicos, el otro problema que se presenta es que el uso de antenas goniométricas generan márgenes de error de entre 0,5 y 3 grados, lo cual se transforma en un error de varias decenas de kilómetros de la ubicación real.

Resulta complicado también realizar una comparación de la efectividad en la localización, comparando resultados entre el Boltek LD-250, encontramos una baja similitud, la primera debido al poco tiempo que se encuentra el LIS contabilizando descargas en comparación con Boltek, que se encuentra las 24 horas en operación, como se puede observar en la Figura A.7.

La comparación en la Figura A.7 muestra el total de los resultados entre el Boltek LD-250 para los meses de Junio y Julio, el número de eventos por minuto de Boltek y el LIS, en lo que respecta a la cantidad de datos arrojados, se vuelve errática la forma en que proporciona la información, ya que pareciera repetir el "Flash" en un corto periodo de tiempo, lo que se puede interpretar como un falla en la lectura de la multiplicidad del rayo,

Anexo B

Mapa del Promedio Anual de Densidad de Rayos a Tierra por Estados (1983 – 1993)

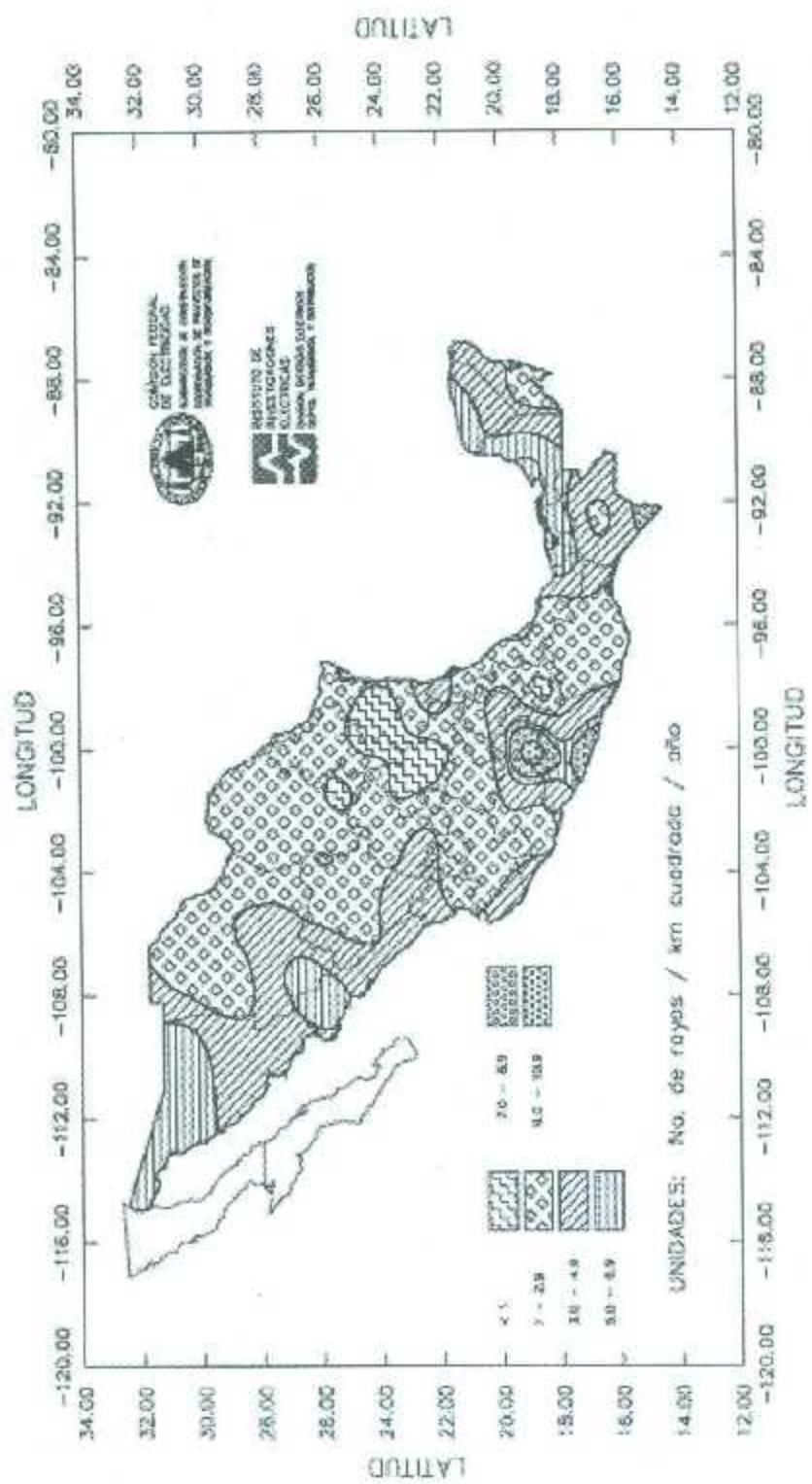


Figura B.1: Mapa de Isodensidad de Rayos a Tierra 1983 – 1993. Tomado de [32]

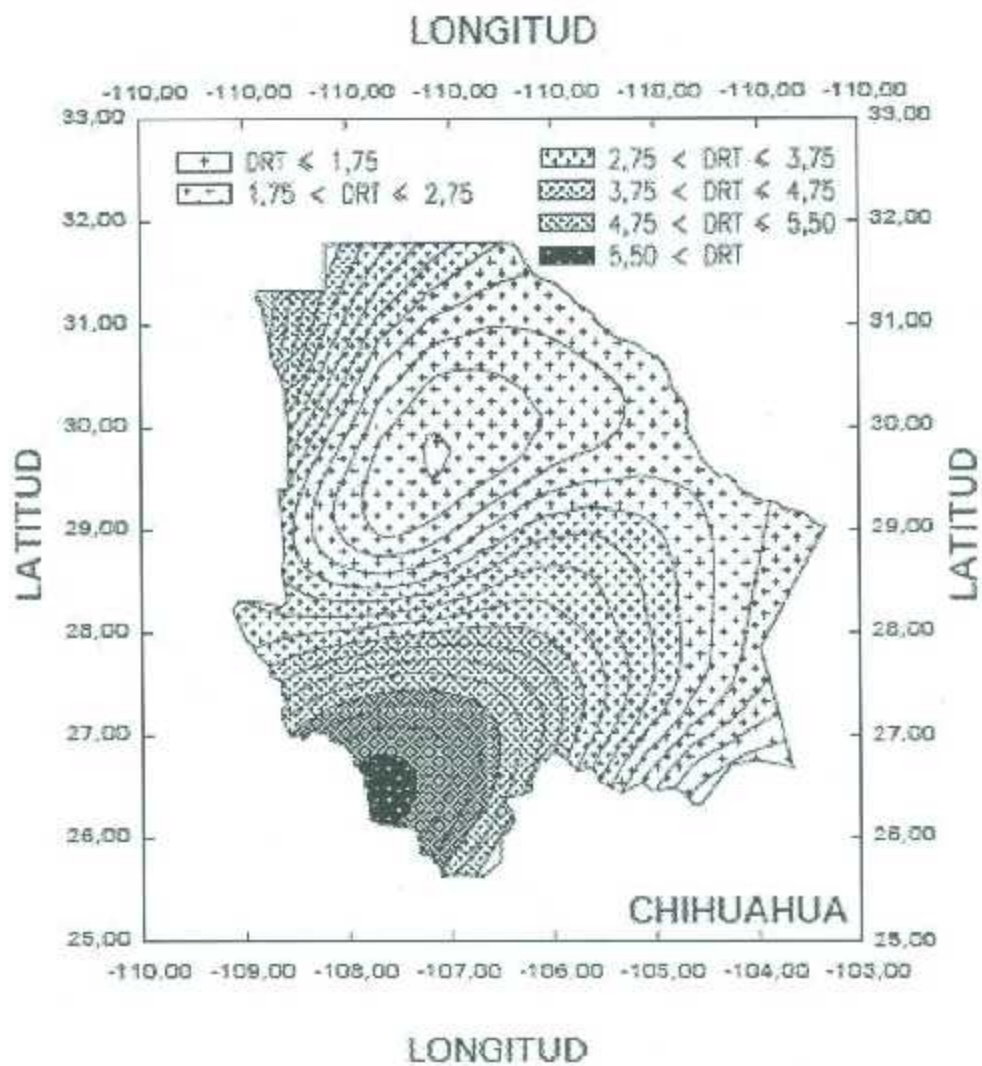


Figura B.2: Isodensidad de Rayos a Tierra Chihuahua 1983 – 1993. Tomado de [32].

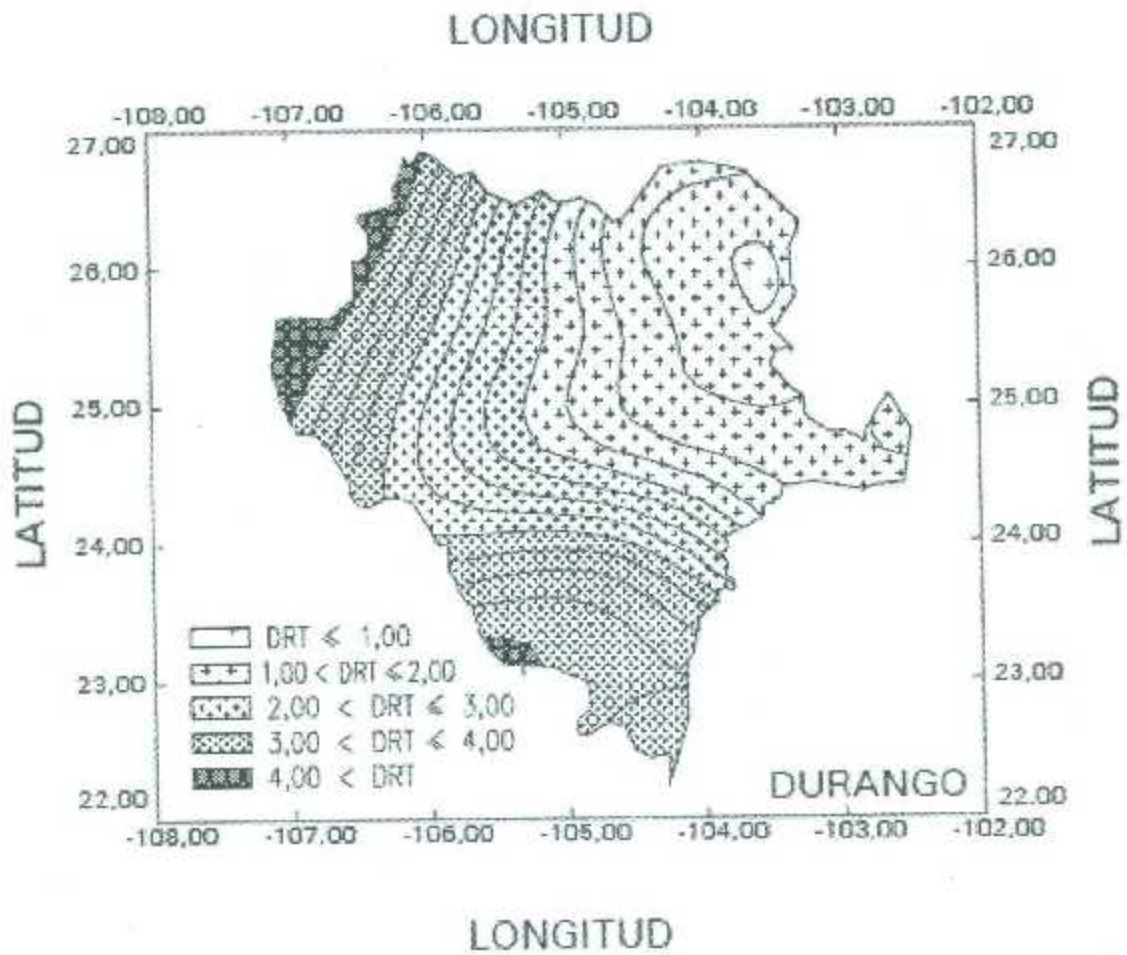


Figura B.4: Isodensidad de Rayos a Tierra Durango 1983–1993. Tomado de [92].

Anexo C

Mapa de Relieve en México

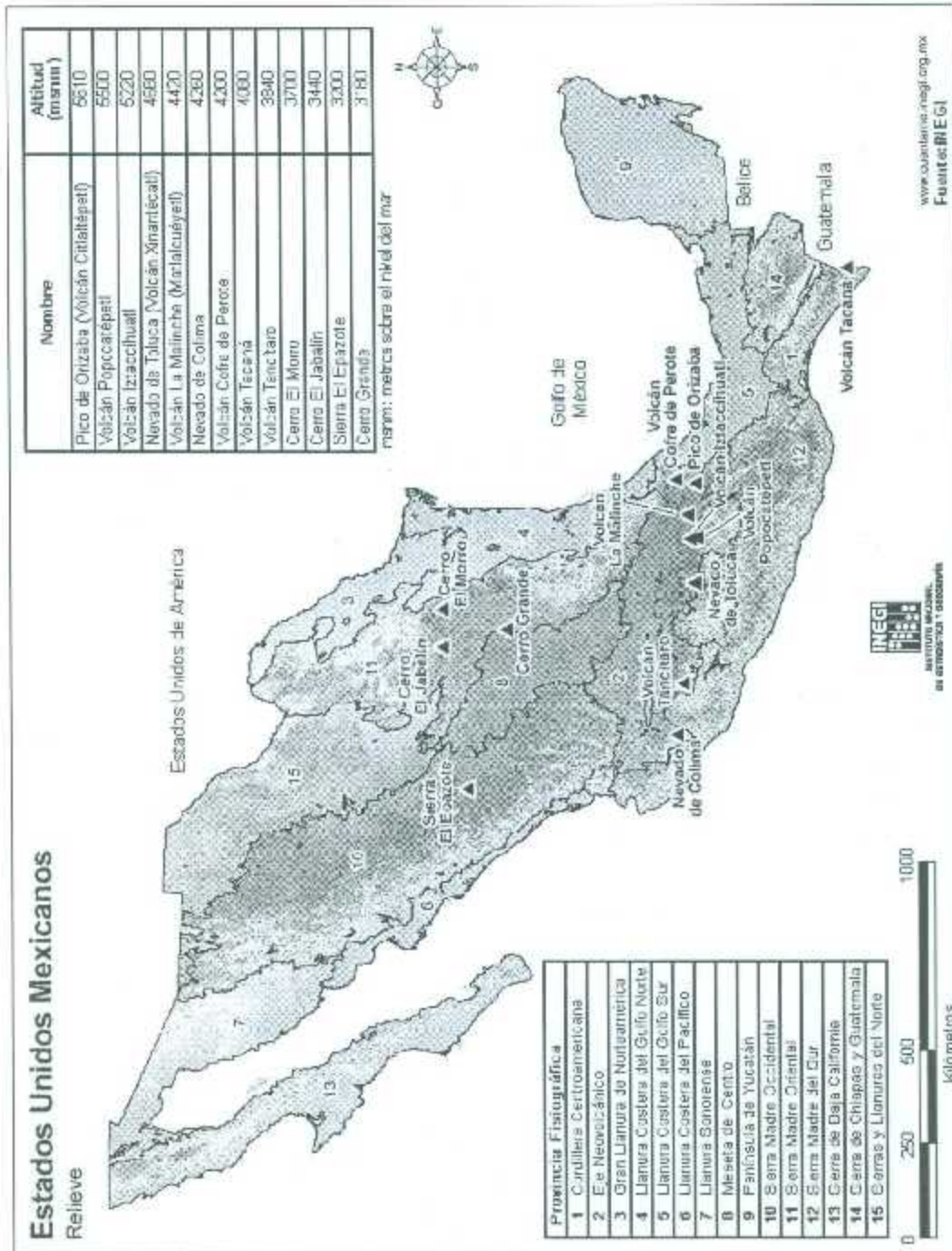


Figura C.1: Mapa de Relieve en México. Tomado de [33].

Anexo D

Regiones del Sistema Eléctrico Nacional

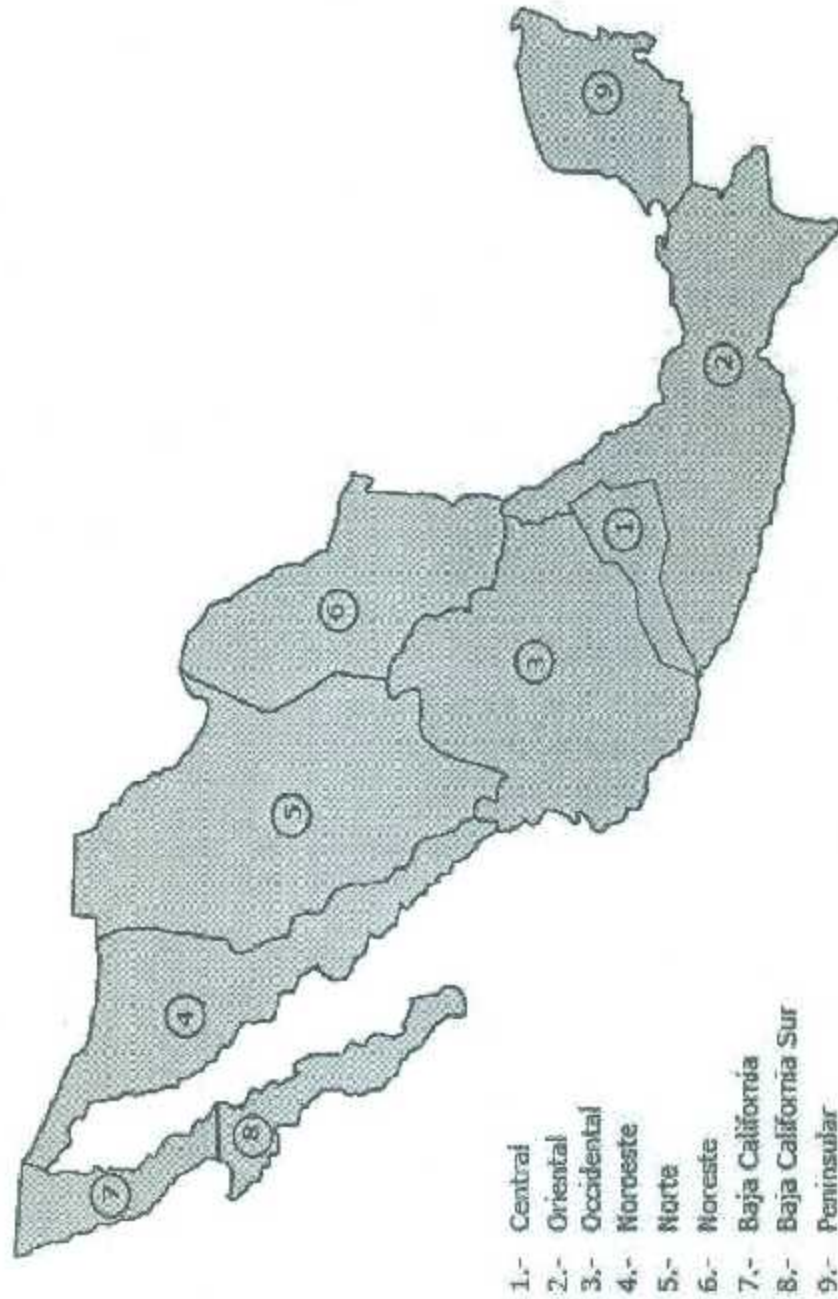


Figura D.1: Sistema Eléctrico Nacional por Regiones [34].

Trabajos Publicados

- G. Avila, A. Gallegos, V.M. Cabrera, F.S. Sellschopp - "Análisis Transitorio en Devanados de Transformadores" - En 2º Congreso Nacional de Electromecánica y Electrónica CONAEE 2013 - ISBN 978 – 607 – 96071 – 1 – 1
- G. Avila, V.M. Cabrera, F.S. Sellschopp - "Técnicas de Radiocalización Aplicadas a Descargas Atmosféricas" - En 3º Congreso Nacional de Electromecánica y Electrónica CONAEE 2014 - ISBN 978 – 607 – 96071 – 2 – 8

