



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Desempeño de Sensores de Campo Electrostático en Sistemas de Alerta de Tormentas

Harby Daniel Aranguren Fino

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá D.C., Colombia
2011

Desempeño de Sensores de Campo Electrostático en Sistemas de Alerta de Tormentas

Harby Daniel Aranguren Fino

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Doctor en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Director:
Prof. Horacio Torres Sánchez

Línea de Investigación:
Descargas Eléctricas Atmosféricas
Grupo de Investigación:
Programa de Investigación sobre Adquisición y Análisis de Señales - PAAS

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá D.C., Colombia
2011

Dedicatoria

Con mucho amor dedico este trabajo a mi Madre, a mi Padre, al pequeño Sami y a Nata.

Agradecimientos

Al profesor Horacio Torres por la dirección de esta tesis y por su respaldo y amistad, pero sobre todo, por las valiosas enseñanzas siempre enmarcadas alrededor de los valores éticos.

Al profesor Joan Montanyà por toda la orientación y soporte durante mi estadía de investigación en la Universidad Politécnica de Cataluña.

Al grupo de investigación LRG de la UPC por la acogida y amistad durante varios años, a Gloria, David, Victor y Oscar y a la empresa Fulgura.

A Javier Herrera, Ernesto Pérez, Camilo Younes, Johny Montaña, Luís Gallego y Mauricio Vargas con quienes hemos compartido en los últimos años los retos de la experimentación sobre rayos en Colombia.

Al grupo de investigación PAAS de la Universidad Nacional de Colombia y al valioso grupo de trabajo conformado por Edisson Olarte, Juan Carlos Inampué, Israel Santoyo y Jesús López.

A Colciencias que brindó el apoyo para la realización de los proyectos de investigación en Colombia.

A Milton Salgado y a la empresa Codensa con quienes se realizó parte de la experimentación y campañas de medida.

A Miguel Alvarez y demás funcionarios de Acciona Wind Power que brindaron todo el apoyo para el desarrollo de la investigación en la comunidad de Navarra.

A Ángel Illa e Ingesco con quienes se abordó gran parte del trabajo experimental.

Al KSC Weather Office y al Dr. Frank Merceret quienes brindaron el soporte para el uso de la información de los sistemas de medida en el Kennedy Space Center.

A Yury por su incondicional apoyo.

Daniel Aranguren,
Junio de 2011.

Resumen

Esta tesis presenta un estudio operacional y científico de sensores de campo electrostático mediante el análisis de tormentas eléctricas en tres lugares: Colombia (2010), usando una estación de medida en Bogotá; Florida - EE.UU (2009), usando 31 sensores en el *Kennedy Space Center* - KSC y Navarra - España (2010), con 11 molinos de campo en parques eólicos. En total se analizaron cerca de 67000 medidas de variaciones de campo eléctrico producidas por rayos. En cada sitio se uso adicionalmente información de redes de detección de rayos disponibles, incluyendo sistemas de detección total y de VHF. Mediante el uso de un volumen elevado de información en tres lugares, a latitudes y condiciones geográficas distintas, se generó conocimiento acerca de aspectos de grado científico como son la caracterización de modelos carga y estructura eléctrica de la nube de tormenta y de grado operacional como la calibración, efectos de la topografía y desempeño de criterios de predicción de rayos.

Palabras clave: Predicción de Tormentas Eléctricas, Molino de Campo Eléctrico, Sistemas de Localización Total de Rayos, Patrón de Calibración.

Abstract

This thesis presents an operational and scientific study about electric field sensors by analyzing thunderstorm episodes in three places: Colombia (2010), using a measurement station in Bogotá, Florida - USA (2009), using 31 electric field mills in the Kennedy Space Center - KSC and Navarra - Spain (2010), using 11 field mills at wind farms. About 67000 electric field changes due to lightning flashes were analyzed. Further information from lightning location systems, including total lightning and VHF detections, was used. Thanks to the large amount of data in three places at different latitudes and geographical conditions, it was possible to generate scientific knowledge about the thundercloud charge models and structure and operational knowledge related to different aspects such as calibration, topographical effect and lightning warning criteria.

Keywords: Thunderstorm Nowcasting, Electric Field Mill, Total Lightning System, Calibration Reference.

Índice general

Resumen	VII
1. Presentación	3
1.1. Sistemas de Alerta de Tormentas - SAT para proteger vidas humanas, industrias e instalaciones	4
1.1.1. Muertes y lesiones en personas a causa de de rayos	5
1.1.2. Ejemplos de aplicación de sistemas de alerta de tormentas en la industria	6
1.2. Casos de aplicación real que conforman la tesis	7
1.3. Organización de la tesis	8
2. Generalidades	11
2.1. Evolución de la técnica	11
2.1.1. El rango de medida	19
2.1.2. La lluvia intensa y las tormentas cercanas	19
2.1.3. La medida de la distancia	20
2.1.4. Diferenciación de rayos intranube y nube-tierra	20
2.2. Estructura de la nube de tormenta	21
2.2.1. Mecanismos convectivos de electrificación	22
2.2.2. Mecanismos de electrificación por inducción electrostática	23
2.2.3. Mecanismos no inductivos	24
2.3. Tipos de tormenta	25
2.3.1. Tormentas monocelulares	25
2.3.2. Tormentas Severas y Supercelulares	25
2.3.3. Sistemas Convectivos de Mesoescala	26
2.3.4. Tormentas eléctricas en el trópico	26
2.4. Generalidades sobre aspectos de predicción de rayos	27
2.4.1. Fases de formación de la tormenta y tecnologías de detección	29

3. Modelos	33
3.1. Modelamiento de los cambios de campo eléctrico asociados al rayo	35
3.2. Algoritmos de localización de descargas a partir de medidas de campo eléctrico	38
3.2.1. El método de Reynolds y Neill	39
3.2.2. El método de Jacobson y Krider	40
3.2.3. Método de optimización de mínimos cuadrados no-lineal	42
4. Sistemas de medida	45
4.1. Molinos de campo eléctrico	46
4.1.1. Generalidades	46
4.1.2. Principios de funcionamiento de los molinos de campo	48
4.1.3. Sensor diseñado	51
4.1.4. Molinos de campo eléctrico en el KSC/CCAFS Florida, USA	62
4.1.5. Molinos de campo eléctrico en Navarra, España	64
4.2. Sistemas de localización de rayos	68
4.2.1. CGLSS - <i>Cloud-to-Ground Lightning Surveillance System</i>	68
4.2.2. LDAR - <i>Lightning Detection and Ranging</i>	68
4.2.3. LINET - <i>LIghtning NETwork</i>	69
4.2.4. SID - <i>Sistema de Información de Descargas</i>	69
5. Desarrollo de un sistema Patrón	73
5.1. Definición de un sistema patrón	75
5.2. Base teórica	75
5.3. Procesamiento de datos	78
5.4. Criterios para la depuración de datos	89
5.4.1. Eventos que se ajustan al modelo de carga	94
5.4.2. Eventos que no se ajustan al modelo de carga	97
5.5. Parámetros del patrón de calibración	99
6. Estudio de instalaciones en montaña y terreno plano	107
6.1. Definición del problema	108
6.2. Medidas de campo electrostático en zona montañosa en Navarra, España . . .	111
6.2.1. Procesamiento de datos	111
6.2.2. Depuración de datos	115
6.2.3. Resultados	118
6.3. Medidas de campo electrostático en Colombia	132
7. Predicción de rayos a partir de medidas de campo eléctrico	139
7.1. Análisis	140
7.2. Verificación de predicciones	140
7.3. Criterios de alarma basados en la medida de campo eléctrico	143
7.3.1. Terrassa, verano 2004 y 2006	144
7.3.2. Florida, verano de 2009	147

7.3.3. Bogotá, noviembre de 2010	152
8. Discusión de resultados y Conclusiones	157
8.1. Principales aportes sobre la técnica de medida	157
8.2. Principales aportes sobre los aspectos operacionales	160
8.3. Conclusiones	168
A. Patrones comportamiento de los sensores del KSC/CCAFS	169
Bibliografía	183

Índice de figuras

2.1.	Esquema de medida y montaje utilizado por Wilson en 1916. Tomado de [1] .	12
2.2.	Ejemplo de registro de campo eléctrico y medida de la “distancia” de los experimentos de Wilson en 1917. Tomado de [2].	13
2.3.	Cambios de campo eléctrico en función de la distancia reportados por Wilson en 1920. Tomado de [2].	14
2.4.	Electrodo de medida invertido presentado por Wormell en 1939. Tomado de [3].	15
2.5.	Cambios de campo eléctrico en función de la distancia reportados por Wormell en 1939. Tomado de [3].	16
2.6.	Estación de medida de Reynolds. Tomado de [4].	17
2.7.	Modelo tripolar de la nube de tormenta y campo electrostatico a nivel del suelo	22
2.8.	Sistema Convectivo de Mesoescala [5].	27
2.9.	Densidad de Descargas a Tierra - DDT global (Flashes/ km^2 año) [6].	28
2.10.	Evolución de los centros de carga en el interior de una nube de tormenta típica y número de rayos por minuto ocurridos. Florida 29 de Julio de 1991[7]	29
3.1.	Modelo de carga puntual	35
3.2.	Modelo de doble carga bipolar	36
3.3.	Cambio de campo eléctrico ΔE_z debido a la ocurrencia de rayos nube-tierra (HP=7km, HN=4km)	37
3.4.	Cambio de campo eléctrico debido a la ocurrencia de rayos intranube (HP=7km, HN=4km)	38
3.5.	Localización de descargas eléctricas atmosféricas por medio de redes de molinos de campo.	39
3.6.	Parámetros de descargas nube-tierra e intranube ocurridas en la Florida usando los modelos de Carga Puntual y Dipolo Eléctrico. Los valores dentro de los círculos corresponden al valor de ΔQ encontrado. Tomado de [8].	41

3.7. Red de molinos de campo de La Florida - USA y mínima variación carga eléctrica ΔQ detectable asumiendo el modelo de carga puntual.	41
4.1. Fluxómetro electrostático desarrollado por <i>Malan y Schonland</i> (1950)[9]. a) Componentes del equipo. b) Arreglo para la detección de la polaridad del campo eléctrico incidente. c) Señal generada.	47
4.2. Esquema general del molino de campo eléctrico típico. a) Ilustración de los componentes mecánicos. b) Amplificador sensible a la carga. El amplificador puede encontrarse con la entrada no inversora conectada a tierra cuando se trata de un único electrodo de medida o midiendo en forma diferencial cuando se trata de dos electrodos de medida.	49
4.3. Formas de onda de la señal de salida y señal producida por el detector de posición. a) Señales para campo eléctrico de polaridad positiva. b) Señales para campo eléctrico de polaridad negativa.	50
4.4. Funcionamiento de los componentes fijos y móviles del molino de campo . . .	52
4.5. Variaciones periódicas de área y capacitancia producidas por los componentes mecánicos del molino de campo	53
4.6. Señal de salida del molino de campo para campo eléctrico de polaridad positiva y negativa. La asimetría de la señal es definida por la polaridad del campo eléctrico incidente.	54
4.7. Molino de campo diseñado y señal de salida producida por la incidencia de un campo eléctrico de polaridad positiva.	55
4.8. Señal asimétrica afectada por ruidos de frecuencia industrial y defectos mecánicos	56
4.9. Comportamiento en frecuencia de la señal asimétrica sin distorsión.	57
4.10. Señal original y señal filtrada. En la señal original se incluyen ruidos producidos por fallas mecánicas y ruido de 60 ciclos.	58
4.11. Montaje de calibración del molino de campo	59
4.12. Relación campo eléctrico aplicado vs tensión de salida para el molino de campo prototipo	60
4.13. Prueba de calibración realizada en sitio.	61
4.14. Componentes del sistema de medida de campo eléctrico ambiental	62
4.15. Ejemplo de tormentas eléctricas medidas en Bogotá.	63
4.16. Localización de los molinos de campo eléctrico y la red de detección de rayos en el KSC y CCAFS. Los números del 1 al 34 ilustran la posición de cada molino de campo; las posiciones 3, 23 y 33 no se encuentran en funcionamiento. Los sensores de la red de detección de rayos son marcados con DF (Direction Finder). Adaptado de [10].	64
4.17. Molino de campo eléctrico en el Centro Espacial Kennedy, Florida, USA. a. Sensor de campo eléctrico invertido instalado a 1 m de altura sobre plataforma de concreto. b. Adecuación de las cercanías para eliminar elementos cercanos.	65
4.18. Localización de los once molinos de campo en Navarra.	66
4.19. Características del lugar de instalación de los sensores. a. Montaje del molino de campo en la estación no. 10. b. Característica de montaña de la estación no. 2.	67

4.20. Curva de calibración en sitio de uno de los sensores de la red de molinos de campo de Navarra.	68
4.21. Red LINET en Europa y ubicación de la zona de estudio en Navarra, España.	70
4.22. Sistema de Información de Descargas SID.	71
5.1. Montaje de un molino de campo eléctrico en el KSC. Tomado de [11].	76
5.2. Modelos de carga puntual y bipolar	77
5.3. Distribución de probabilidad de la carga total transferida ΔQ para rayos negativos	78
5.4. Comportamiento del ΔE en función de la distancia, teniendo en cuenta la distribución de probabilidad de ΔQ	79
5.5. Distribución de cambios de campo eléctrico para 600 rayos simulados usando valores de carga y altura aleatorios a partir de sus distribuciones log-normal y normal respectivamente.	79
5.6. Datos de localización del CGLSS correspondientes a la tormenta ocurrida el 23 de junio de 2009 sobre el KSC. las x rojas indican la localización de cada stroke y las + negras indican la ubicación de cada molino campo.	80
5.7. Señal de campo electrostático medida por el molino de campo número 31 el 23 de junio de 2009 y ubicación de los strokes detectados por el CGLSS con respecto al mismo sensor.	81
5.8. Comparación de variaciones de campo eléctrico vs. detecciones del CGLSS (3 de Julio de 2009, sensor no. 8). Las x rojas muestran la distancia de ocurrencia de cada stroke con respecto al molino de campo mientras la línea continua muestra el valor instantáneo del campo eléctrico.	82
5.9. Variaciones de campo eléctrico ΔE en función de la distancia medidos por un molino de campo durante un episodio de tormenta (5 de Julio de 2009, sensor no. 8).	83
5.10. Curva DE vs D para el molino de campo 05 del KSC usando datos de tormentas ocurridas entre junio y julio de 2009. a y b son las curvas lineal y logarítmica respectivamente.	84
5.11. Curva DE vs D para el molino de campo 10 del KSC usando datos de tormentas ocurridas entre junio y julio de 2009. a y b son las curvas lineal y logarítmica respectivamente.	85
5.12. Curva DE vs D para el molino de campo 24 del KSC usando datos de tormentas ocurridas entre junio y julio de 2009. a y b son las curvas lineal y logarítmica respectivamente.	86
5.13. Ubicación de las radiaciones de VHF detectadas por LDAR en el evento 2009-07-17 (75585s) y de la detección realizada por CGLSS.	87
5.14. Diagrama de tiempo contra distancia, campo eléctrico medido por el sensor no. 10 y el parámetro SD para el episodio del 17 de julio de 2009.	88
5.15. Diagrama de tiempo contra distancia, campo eléctrico medido por el sensor no. 29 y el parámetro SD para el episodio del 08 de julio de 2009.	89
5.16. Comportamiento de los parámetros ΔQ y H obtenidos del métodos de optimización.	91

5.17. ΔE medidos por todos los molinos de campo durante un evento CG. En el título de la gráfica se especifica la fecha y el segundo de ocurrencia entre paréntesis. La figura ilustra el ajuste de los datos medidos a los modelos Q y 2QA.	92
5.18. ΔE medidos por todos los molinos de campo durante un evento CG. En el título de la gráfica se especifica la fecha y el segundo de ocurrencia entre paréntesis. La figura ilustra el ajuste de los datos medidos a los modelos Q y 2QA.	94
5.19. Ubicación de las radiaciones de VHF detectadas por LDAR en el evento 2009-07-17 (74383s) y de la detección realizada por CGLSS.	96
5.20. ΔE medidos por todos los molinos de campo durante un evento CG. En el título de la gráfica se especifica la fecha y el segundo de ocurrencia entre paréntesis. La figura ilustra el ajuste de los datos medidos al modelos Q. . . .	97
5.21. ΔE vs Distancia para el molino de campo 01	99
5.22. Regresión para el ajuste de los ΔE . Molino de campo no. 1.	101
5.23. ΔE y curva de ajuste para el molino de campo 01.	102
5.24. Número de rayos a menos de 5 km y error de ajuste para los 34 molinos. . . .	103
5.25. Modelos matemático y físicos para la distribución patrón de ΔE	105
6.1. Efecto topográfico en la distribución del potencial eléctrico.	109
6.2. ΔE en función de la distancia para los casos en montaña y terreno plano. . .	109
6.3. Factor k para el caso del sensor de campo eléctrico en montaña.	110
6.4. Tormenta presentada sobre la red de medida el 29 de abril de 2010. Los puntos rojos muestran la detección de strokes nube-tierra realizada por LINET; los círculos azules muestran la ubicación de cada molino de campo.	113
6.5. Medida de campo eléctrico realizada por la estación no. 6 durante un evento de tormenta el 29 de abril de 2010.	114
6.6. Comparación de variaciones de campo eléctrico vs detecciones de LINET (estación no. 6, 29 de abril de 2010). Las x rojas muestran la distancia de ocurrencia de cada stroke con respecto al molino de campo mientras la línea continua muestra el valor instantáneo del campo eléctrico.	115
6.7. Campo eléctrico en la estación no. 1 y descargas nube-tierra detectadas por LINET para el evento de 9 de mayo de 2010. Arriba: Esquema de distancia vs tiempo y señal de campo eléctrico. Abajo: Comportamiento de los DE's en función de la distancia.	116
6.8. Distribución de ΔE 's en función de la distancia para el sensor de la estación 9. Las líneas discontinuas ilustran los límites de filtrado para datos extremos.	117
6.9. Distribución de ΔE 's en función de la distancia para el sensor de la estación 2. Las líneas discontinuas ilustran los límites de filtrado para datos extremos.	118
6.10. Distribución de ΔE vs d para las estaciones 1 a 6.	119
6.11. Distribución de ΔE vs d para las estaciones 7 a 11.	120
6.12. Distribución de ΔE en función de la distancia y análisis de regresión para el sensor no. 9. a. Distribución de $\log(\Delta E)$ dada en V/m. b. Distribución de ΔE	121

6.13. Distribución de ΔE y modelo físico para el sensor no. 9 y comparación con el modelo físico del sistema patrón (Capítulo 4).	122
6.14. Caso de tormenta del 5 de mayo de 2010. Aproximación de una celda de tormenta al sensor no. 1 instalado a 1107 msnm. y perfil del terreno en la dirección de la aproximación.	124
6.15. Simulación de campo electrostático y variación de la componente vertical del campo eléctrico a nivel del suelo en función de la distancia.	125
6.16. Comportamiento de ΔE en función de la distancia y factor k	126
6.17. Análisis de regresión para la estación no. 1. a. En escala logarítmica. b. En escala lineal.	127
6.18. a. Curva ΔE vs d obtenida de la simulación de elementos finitos (Teórico) y de la regresión realizada a partir de las medidas obtenidas por el sensor no. 1 el 5 mayo de 2010 (Experimental). b. Relación entre $\Delta E_{Teórico}$ y $\Delta E_{Experimental}$ en función de la distancia.	128
6.19. Comparación de resultados teóricos y experimentales para los casos de montaña y terreno plano. Teórico corresponde con los resultados de simulación para el caso montaña mientras Teórico terreno plano corresponde con el caso de terreno plano a 420 msnm. Experimental* k_c corresponde con el valor obtenido del análisis de regresión para el sensor no. 1 afectado por la constante k_c y Referencia de terreno plano corresponde con el modelo obtenido de las medidas del sensor no. 9.	130
6.20. Factor k obtenido de los resultados teóricos y experimentales	131
6.21. Detección de strokes nube-tierra realizada por el SID el 17 de noviembre de 2010.	133
6.22. Medida de campo eléctrico realizada por la estación en Bogotá durante un evento de tormenta el 17 de noviembre de 2010.	133
6.23. Comparación de variaciones de campo eléctrico vs detecciones del SID (Bogotá, 17 de noviembre de 2010). Las x rojas muestran la distancia de ocurrencia de cada stroke con respecto al molino de campo mientras la línea continua muestra el valor instantáneo del campo eléctrico.	134
6.24. Variaciones de campo eléctrico en función de la distancia producidos por strokes nube-tierra el día 17 de noviembre de 2010.	134
6.25. Distribución ΔE en función de la distancia para los 9 episodios de tormenta entre el 4 y el 28 de noviembre de 2010. a. distribución en escala lineal. b. distribución en escala logarítmica.	136
6.26. Análisis de regresión para el molinode campo eléctrico en Bogotá.	137
7.1. Método de predicción de rayos basado en la medida del campo electrostático en un punto de interés - PI.	141
7.2. Campo eléctrico en la estación no. 1 y descargas nube-tierra detectadas por LINET para el evento de 9 de mayo de 2010.	143
7.3. Comportamiento de los diferentes parámetros en función del umbral de campo eléctrico.	144
7.4. POD y FAR en función del umbral de campo eléctrico.	145

7.5. a) Número de descargas a tierra pronosticadas y no pronosticadas en función del umbral de campo eléctrico. b) Relación de descargas a tierra pronosticadas contra no pronosticadas en función del umbral de campo eléctrico.	146
7.6. Comparación de parámetros de eficiencia para los criterios de generación de alarmas por umbral de campo eléctrico y cambios de polaridad	146
7.7. POD y FAR en función del campo eléctrico para el sensor no. 8	147
7.8. Rayos pronosticados y fallos de alarma en función del umbral de campo eléctrico para el sensor no. 8.	148
7.9. <i>Lead-Time</i> en función del campo eléctrico para el sensor no. 8.	149
7.10. Número de alarmas, alarmas efectivas y falsas en función del umbral de campo eléctrico, para el total de alarmas producidas por los 31 molinos de campo.	149
7.11. POD y FAR para el total de alarmas producidas por los 31 molinos de campo.	151
7.12. Rayos pronosticados y fallos de alarma en función del umbral de campo eléctrico.	151
7.13. <i>Lead-Time</i> en función del campo eléctrico.	152
7.14. Número de alarmas, alarmas efectivas y falsas en función del umbral de campo eléctrico, para el total de alarmas producidas por los 31 molinos de campo.	153
7.15. POD y FAR para el total de alarmas producidas por el molino de campo en Bogotá.	154
7.16. Rayos pronosticados y fallos de alarma en función del umbral de campo eléctrico.	154
7.17. <i>Lead-Time</i> en función del campo eléctrico.	155
A.1. Molinos de campo 2 a 5.	170
A.2. Molinos de campo 6 a 8.	171

Introducción

La motivación para realizar la presente tesis de doctorado surge, por un lado, de la curiosidad del autor por la electricidad atmosférica y su liderazgo en relación con el desarrollo tecnológico de instrumentos como los molinos de campo y, por otro lado, por el gran impacto que tiene dicho desarrollo tecnológico, principalmente para salvar vidas mediante metodologías de predicción de rayos y medidas de prevención.

Colombia es un país tropical en el que la actividad de rayos trae consigo consecuencias muy graves tanto en muerte de personas como en pérdidas económicas. Además de la alta incidencia del fenómeno, hay dos factores más que contribuyen a empeorar el problema: la poca disponibilidad de medios tecnológicos para monitorear el fenómeno y la falta de educación pública en relación con los riesgos.

Un sinnúmero de investigaciones acerca del fenómeno del rayo se han realizado en Colombia por más de 20 años, en donde la principal hipótesis ha sido la “variación espacio-temporal de los parámetros del rayo” y principalmente el comportamiento del fenómeno en zona tropical. El análisis durante varios años alrededor de varios de los parámetros del rayo, ha permitido comprobar que la zona tropical presenta un comportamiento particular, en donde parámetros como la densidad de descargas a tierra o la amplitud de la corriente de retorno, tienden a presentar valores mayores comparados con otras latitudes .

Dentro de la misma hipótesis, la presente tesis aborda el desempeño de los sensores de campo electrostático como sistemas de predicción de rayos. La medida de campo electrostático es una de las más complicadas, dado el alto número de factores que intervienen como son la topografía, el sitio de instalación o las condiciones climáticas, entre muchos otros. En lugares como Colombia, dichos factores cobran aún mayor importancia.

La presente tesis es resultado de un trabajo continuo realizado desde 2004, en el que se hace desarrollo tecnológico en sensores de campo electrostático y sistemas de predicción de

rayos. En 1976, Gordillo y Ortiz desarrollaron el primer prototipo de molino de campo eléctrico en Colombia con el propósito de hacer estudios de electricidad atmosférica. El desarrollo de este instrumento no se retomó sino hasta 2004; en ese año y como parte de la tesis de pregrado del autor de esta tesis, se construyó una versión de molino de campo con muchas mejoras y se realizaron las primeras campañas de medida del campo electrostático asociado a las tormentas eléctricas en el país.

Mas allá del desarrollo tecnológico, el alcance de la presente tesis se sustenta en el estudio de instalaciones reales de molinos de campo en tres lugares diferentes del mundo (Estados Unidos, España y Colombia), para generar conocimiento acerca de los aspectos de calibración, modelos de carga, efectos de la topografía y desempeño de criterios de alarma.

Presentación

Dentro de los fenómenos naturales relacionados con el clima, la actividad eléctrica atmosférica se ha mostrado como uno de los mayores riesgos para la vida de las personas y para instalaciones, estructuras y equipos. La comunidad científica ha tratado de dar respuesta a la problemática mediante diferentes normativas como la IEC62305 [12] “Protection Against Lightning” partes 1 a 5 que envuelven el análisis de riesgo, los daños físicos a estructuras, los daños a sistemas eléctricos y electrónicos y el daño a servicios. No obstante, la IEC62305 y en general la mayoría de normativas de ámbito regional o nacional se han concentrado en los sistemas de protección externa e interna contra rayos, dejando un poco de lado un componente de mucho impacto para la reducción de las muertes y los daños como es la predicción y prevención.

Debido a ello, en los últimos años se han empezado a notar esfuerzos para el desarrollo de normalización relacionada con los sistemas de alerta de tormentas. Las principales referencias que existen en la actualidad son la norma europea EN50536 “Protection Against Lightning - Thunderstorm Warning Systems” del 2010 [13] y el ACRP Report 8 “Lightning-Warning Systems for Use by Airports” de la Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos en 2008 [14].

La presente tesis busca crear conocimiento de tipo operacional para el uso de una de las tecnologías más importantes en los sistemas de alerta de tormentas como son los sensores de campo electrostático. En las dos normativas mencionadas, la EN50536 y el ACRP Report 8, se considera que los molinos de campo son los instrumentos más efectivos para detectar la

aparición de una nube de tormenta. La EN50536 le asigna a los molinos de campo la Clase I, que se refiere a los sistemas capaces de detectar una nube de tormenta en todo su ciclo de vida; mientras que el ACRP Report 8, se refiere a los molinos de campo como el único sistema capaz de detectar la tormenta eléctrica antes de la primera descarga.

Los anteriores argumentos permiten considerar que un estudio de tipo operacional sobre los molinos de campo es de gran impacto para el desarrollo de sistemas de alerta de tormentas, aportando a la reducción de los efectos negativos asociados a los rayos. A continuación se hace una breve descripción del impacto que tiene el uso de metodologías de predicción de tormentas para la prevención de muertes y daños en instalaciones.

1.1. Sistemas de Alerta de Tormentas - SAT para proteger vidas humanas, industrias e instalaciones

La norma EN50536 “Protection Against Lightning - Thunderstorm Warning Systems” del 2010 [13], define el Sistema de Alerta de Tormentas - SAT (Thunderstorm Warning System - TWS) como:

“Sistema compuesto por detectores de tormenta capaz de monitorear la actividad de tormenta en un *área de monitoreo*, y algoritmos para elaborar alertas válidas relacionadas con *eventos asociados al rayo* para un sitio a proteger específico”

En donde los *eventos asociados al rayo* se definen como:

“Cualquier evento peligroso causado por un impacto directo, cualquier otro efecto causado por la nube de tormenta o efectos inducidos debidos a impactos cercanos”

La norma EN50536 [13] describe alrededor de 30 definiciones más, variables de tiempo y espacio y parámetros probabilísticos de verificación de predicciones asociados con el desempeño de un SAT.

En el capítulo 2 se presenta una descripción más detallada de las tecnologías de detección de tormentas consideradas por la normativa EN50536 [13], no obstante la siguiente clasificación de sistemas de detección permite entender la importancia de realizar estudios de tipo operacional sobre los molinos de campo electrostático:

- Clase I: Sistemas que detectan una tormenta en todo su ciclo de vida; Fases I a IV (ver definiciones en sección 2.4.1). (Ej. Molinos de campo eléctrico)
- Clase II: Sistemas que detectan actividad de rayos intranube - IC y nube-tierra CG (Actividad total de rayos), Fases II a IV. (Ej. Sistemas VHF, VLF/LF, interferometría)
- Clase III: Sistemas que detectan únicamente actividad de rayos CG. Fases III

- Clase IV: Instrumentos que detectan actividad de rayos CG y otras fuentes electromagnéticas con una eficiencia muy limitada.

La normativa ACRP report 8 [14], aunque no presenta una clasificación de tecnologías como tal, recomienda el uso de sistemas Clase I y II al referirse al uso de molinos de campo o sensores similares y sistemas de detección de actividad total de rayos.

1.1.1.1. Muertes y lesiones en personas a causa de rayos

Según estadísticas de la National Oceanic and Atmospheric administration - NOAA [15], la actividad de rayos en Estados Unidos es una de las mayores causas de víctimas mortales, en algunos años sobrepasando el número de víctimas ocasionadas por los huracanes y los tornados. Se estima que al año se presentan alrededor de 70 muertes en Estados Unidos. Estadísticamente tan sólo el 10 % de las personas impactadas por rayos pierden la vida; por lo tanto cerca de 600 personas quedan lesionadas.

Recientes publicaciones revelan cómo las estadísticas de fatalidades en países tropicales y subtropicales, a pesar de contar con sistemas deficientes de reporte de casos, son mucho mayores a los reportados en otros lugares. Según los resultados de los estudios realizados por *Cooper y otros* [16] y *Holle y otros* [17] la cantidad de muertes en países tropicales es mucho mayor: *“en general, las muertes y lesiones por rayos dependen del sistema económico y el mejoramiento en la construcción de las viviendas. En las áreas tropicales y subtropicales del mundo, donde la actividad de rayos es más común, el número total de muertes por rayos se estima en 24.000 y cerca de 240.000 lesionados anualmente”*. Dichas estadísticas se han basado principalmente en datos del sur de Asia para varios estados de la India, Sri Lanka, Bangladesh, Buthan, Maldivia, Nepal, Indonesia y el norte de Pakistan, entre otros. Para países tropicales y subtropicales se obtienen estadísticas como las reportadas en India durante el 2001 en que se presentaron 1507 casos de muerte de personas.

Una revisión global de las fatalidades por rayos presentada por *Cooper* [18] confirma el gran número de muertes en regiones tropicales y subtropicales con respecto a otras latitudes. Para países desarrollados en Europa, Estados Unidos y Japón se observa que en general no se supera una tasa de fatalidades mayor a 0.5 muertes/millón de habitantes al año.

En Colombia se estima que alrededor de 100 personas mueren cada año a causa de rayos; si se considera que por cada muerte se presentan 9 casos de lesiones, la cifra de afectados podría ser de 900 personas al año [19]. Lamentablemente las estadísticas acerca de las víctimas de rayos son escasas y más aún en países en vía de desarrollo.

La Universidad Nacional de Colombia inició durante el 2010 un programa de recolección de datos de casos de muertes y lesiones por rayos, el cual puede consultarse en [19]; para el final del 2010 se habían reportaron 39 muertes y 165 lesionados. Dichos resultados provienen principalmente de noticias en periódicos regionales. Sin embargo, observaciones locales de

ciertos municipios en Colombia muestran que el porcentaje de casos no reportados es aún muy grande. Un análisis local sobre el municipio de La Palma en Colombia, una población con cerca de 11100 habitantes, reporta alrededor de 5 muertes al año, con dicha información se obtienen 451 muertos/millón de habitantes para esta zona del norte de Cundinamarca; es decir, una tasa de fatalidades casi 1000 veces mayor a la reportada en países desarrollados.

La gran mayoría de los casos de muerte se ven relacionados con actividades como la pesca, la agricultura, recreación o el refugio en tiendas de campaña y en lugares no adecuados. *Cooper y otros* [20] encontraron que los mecanismos en los que se presentan los accidentes de personas se distribuyen de la siguiente forma: i) impacto directo: 3 a 5 % de los casos; ii) lesión por contacto: 3 a 5 % de los casos; iii) impacto indirecto a través de un objeto cercano: 30 a 35 % de los casos; iv) tensiones de paso: 50 a 55 % de los casos; v) líderes ascendentes: 10 a 15 % de los casos y vi) lesiones causadas por la onda expansiva: desconocido el porcentaje de casos. La mayor causa de accidentes es la tensión de paso y su gran porcentaje es debido en parte a que con frecuencia ocurren casos de múltiples víctimas en campos deportivos, pistas de carreras, senderos, excursiones y operaciones militares, entre otras.

Adicionalmente, *Cooper y otros* [21] muestran que el número de accidentes puede ser reducido drásticamente mediante educación pública y medidas de prevención. Los anteriores argumentos permiten concluir que la reducción del riesgo por rayos para la vida de las personas, además de ser un tema relacionado con los sistemas convencionales de protección externa, es más una temática de predicción y prevención.

1.1.2. Ejemplos de aplicación de sistemas de alerta de tormentas en la industria

Con el crecimiento industrial de las últimas décadas puede notarse también el incremento en los efectos negativos causados por las tormentas eléctricas. Los rayos comúnmente destruyen componentes eléctricos, electrónicos, de comunicaciones y de control que generan altas pérdidas económicas principalmente debidas a los tiempos de parada de producción u operación. A modo de ejemplo, en las siguientes secciones se describen las problemáticas de algunos sectores.

En el caso del sector aeronáutico, las políticas y prácticas de seguridad internacionales exigen que las operaciones en pista de aeropuertos sean suspendidas mientras exista un riesgo potencial por actividad de rayos. El ACRP Report 8 [14] evalúa los costos de dichas interrupciones que incluyen todas las facetas de operación de un aeropuerto categorizandolas como la operación terrestre, del terminal, la operación aérea y la operación del espacio aéreo nacional. El impacto económico de las interrupciones puede ser reducido mediante la implementación y mejora de los sistemas de alerta por rayos haciéndolos más efectivos para identificar los momentos exactos en que las operaciones en pista deben ser interrumpidas.

El ACRP Report 8 [14] presenta un análisis de costo operacional asociado a las inte-

rrupciones debidas a rayos; para ello se modelaron los costos y ahorros asociados con una toma de decisiones mejorada con respecto a los tiempos de cierre y reapertura de operaciones. El modelo fue implementado en los aeropuertos internacionales de Orlando y Chicago en Estados Unidos. Los resultados muestran que con una disminución de 10 minutos en la duración de las interrupciones durante horas pico, la reducción de pérdidas es de 2.8 millones de dólares en el aeropuerto de Orlando y de 6.2 millones de dólares en el aeropuerto de Chicago, al año.

Varios accidentes por rayos con resultados fatales han ocurrido en las instalaciones petroleras en el mundo. Muchos de los países mayores productores de petróleo se encuentran ubicados en zona tropical y en otras regiones de alta actividad de rayos; tal es el caso de Sur América tropical, Centroamérica y el sur de Estados Unidos, el centro de África, el sur Asiático y Oceanía. En Nigeria en 1990 un incendio causado por un rayo produjo la pérdida de 670000 barriles de petróleo. En Dronka, Egipto, en 1994 murieron 530 personas a causa de un incendio por un impacto de un rayo en un tanque de almacenamiento de crudo [22]. En Puerto Berrío, Colombia, en Octubre de 1950, 20 personas murieron debido a un impacto de rayo en una embarcación que transportaba gasolina.

Uno de los sectores industriales que presentan un incremento acelerado del riesgo por rayos es la generación eólica; los aerogeneradores se construyen cada vez con mayores alturas, alcanzando en la actualidad a los 150 m; adicionalmente, dada la relevancia que han tomado las energías alternativas, cada vez se instalan parques eólicos más extensos y en zonas con alto riesgo como la parte alta de montañas.

1.2. Casos de aplicación real que conforman la tesis

La presente tesis se realiza a partir de varios casos de aplicación en los que diferentes sectores han apoyado la investigación acerca de los sistemas de predicción de rayos mediante la instalación de sistemas de medida piloto.

En primera medida se destaca el trabajo de investigación que adelantan actualmente la empresa de generación de energía eólica Acciona Wind Power y la Universidad Politécnica de Cataluña. En el marco de dicha investigación se implementó una red de monitoreo de tormentas eléctricas en toda la comunidad de Navarra en España, con sensores de campo eléctrico instalados en 11 parques. Los resultados de las primeras mediciones han sido muy valiosas en el desarrollo de la presente tesis para el estudio de los efectos de la topografía en el desempeño de los molinos de campo.

Un estudio semejante tuvo lugar entre 2008 y 2010 en el departamento de Cundinamarca en Colombia, en una región de alta actividad de rayos en la que las redes de distribución de energía están entre las principales víctimas. Gracias al apoyo brindado por la compañía eléctrica Codensa, la Universidad Nacional de Colombia y Colciencias, se instalaron 5 molinos de campo eléctrico los cuales han aportado información valiosa acerca de las características eléctricas de las tormentas en zona tropical. Los mismos sistemas de medida se encuentran

instalados hoy en día en campos petroleros y empresas de minería Colombianas. Experimentos similares con redes de molinos de campo se han realizado en las ciudades de Medellín y Manizales; dichos experimentos han permitido perfeccionar los sistemas de medida y tomar varios registros .

Finalmente, en la presente tesis se incluyen medidas de campo electrostático realizadas por la red de 31 molinos de campo del Centro Espacial Kennedy - KSC en Florida, EE.UU., durante el verano de 2009; ésta red es usada como sistema de alerta de tormentas para las operaciones del KSC y ha servido durante tres décadas como sistema experimental para el estudio de las características eléctricas de las tormentas.

1.3. Organización de la tesis

El segundo capítulo aborda los aspectos generales de la tesis, en donde se destaca una revisión detallada de la evolución de la técnica de medida del campo electrostático, desde el primer trabajo de Wilson en 1908; de ésta sección pueden extraerse las principales dificultades tecnológicas a las que se han enfrentado los investigadores a lo largo de la historia y que hoy en día marcan el desempeño de los sistemas actuales.

En éste mismo capítulo se hace una revisión breve de los estudios acerca de la estructura y tipos de tormentas eléctricas y se describen los aspectos generales acerca de la predicción de rayos y los sistemas de detección.

El tercer capítulo describe los modelos y los conceptos teóricos relacionados con el estudio de los cambios bruscos de campo electrostático producidos por rayos y los métodos usados para obtener soluciones de carga a partir de medidas simultáneas.

El capítulo cuarto describe los sistemas de medida involucrados en la tesis. Estos sistemas de medida son molinos de campo instalados en Colombia, España y Estados Unidos, de cuatro tipos diferentes de fabricantes; junto con redes de localización de rayos (LINET en España, SID en Colombia, LDAR y CGLSS en Florida - EE.UU).

El capítulo quinto muestra el desarrollo de un sistema patrón a partir de las medidas de campo electrostático realizadas por los 31 molinos de campo del KSC durante el verano de 2009. De éste capítulo se destaca el análisis de más de 200000 variaciones de campo eléctrico (ΔE) de las que se obtuvieron 35529 variaciones apropiadas para conformar la población del análisis estadístico que permitió construir un patrón de medida. Adicionalmente, el capítulo quinto aporta nuevos resultados sobre la naturaleza de las tormentas eléctricas.

El capítulo sexto aporta resultados sobre el efecto topográfico en instalaciones reales a partir de las medidas obtenidas de los sistemas experimentales en España y Colombia. Como principal resultado se presenta la determinación del efecto topográfico mediante simulaciones

detalladas de elementos finitos y su validación mediante medidas reales de sensores ubicados en terreno plano y en zona montañosa.

El séptimo capítulo presenta una breve revisión de los criterios de alarma basados en medidas de campo electrostático; dado que el análisis se hace a partir de sistemas reales instalados en diferentes lugares (España, Florida y Colombia) y bajo diferentes condiciones, fue posible hacer un estudio comparativo.

Finalmente el capítulo ocho describe las conclusiones obtenidas a partir de los resultados de los capítulos anteriores.

Generalidades

El desarrollo de la presente tesis se basa en los mismos principios usados desde hace cerca de 90 años, con una experimentación enfocada en encontrar el comportamiento de las variaciones de campo eléctrico producidas por rayos nube-tierra, ΔE , a nivel del suelo, en función de la distancia horizontal d entre el lugar de medida y la descarga eléctrica. Es interesante ver que a partir de ésta relación ΔE vs. d y los modelos físicos relacionados, a lo largo de la historia se han estudiado aspectos como la polaridad de las tormentas eléctricas, los modelos de nube de tormenta, la interacción eléctrica entre la atmósfera y el suelo, e incluso se predijo desde los primeros estudios (*Wilson* (1916)[1]) la ocurrencia de fenómenos eléctricos en la alta atmósfera descubiertos hace pocas décadas y hoy conocidos como los *Transient Luminous Events* TLEs [23, 24, 25].

Para propósitos de grado *operacional*, esa misma relación ΔE vs d resulta un buen punto de partida para poder abordar los problemas de calibración y de efecto topográfico que se presentan durante el uso de equipos como los molinos de campo eléctrico en sistemas de predicción de tormentas. Por tal motivo es de gran interés estudiar la evolución que ha tenido la técnica de medida y los medios tecnológicos disponibles actualmente.

2.1. Evolución de la técnica

Desde mediados del siglo XVIII se han realizado experimentos orientadas a estimar la carga eléctrica contenida en las nubes de tormenta. Una de las primeras y más importantes

referencias son los experimentos realizados por Benjamin Franklin entre 1746 y 1762 [26, 27], los cuales definitivamente comprobaron que las nubes de tormenta y el rayo eran fenómenos eléctricos. El experimento de la caja del centinela, su experimento más famoso, buscaba determinar si las nubes de tormenta contenían electricidad, no obstante, aún más sorprendente fue un experimento posterior que llevo a Franklin a la conclusión de que “las nubes de una tormenta están comúnmente en un estado negativo de electricidad, pero en algunas ocasiones en un estado positivo” [26], dicho experimento consistía en una varilla metálica instalada en el techo de su casa que terminaba en el interior en una ingeniosa campanilla, similar a como funciona un electrómetro, que sonaba cuando una nube electrificada se presentaba. Claramente es un experimento y un hallazgo sorprendente para su época.

El primer estudio sistemático de los cambios de campo eléctrico producidos por rayos fue realizado durante los años 20 por *C.T.R. Wilson* [1, 2]. En 1916 [1] Wilson proporciona las bases matemáticas acerca del modelo de carga puntual para la representación de descargas nube-tierra e intranube, e introduce los conceptos acerca del momento de carga. En el mismo trabajo [1] Wilson presenta las medidas hechas entre 1914 y 1915 en el *Solar Physics Observatory* en Cambridge, Inglaterra. El sistema se conformaba de una placa de medida (*test plate*) instalada a nivel de suelo sobre un volumen cilíndrico de tierra que se conectaba con el resto del terreno a través de un electrómetro capilar. Para apantallar la placa de medida el sistema contaba con un arreglo mecánico que mediante poleas se podía operar desde una caseta ubicada a 14 m del lugar de medida. La Figura 2.1 muestra los esquemas presentados por Wilson en 1916.

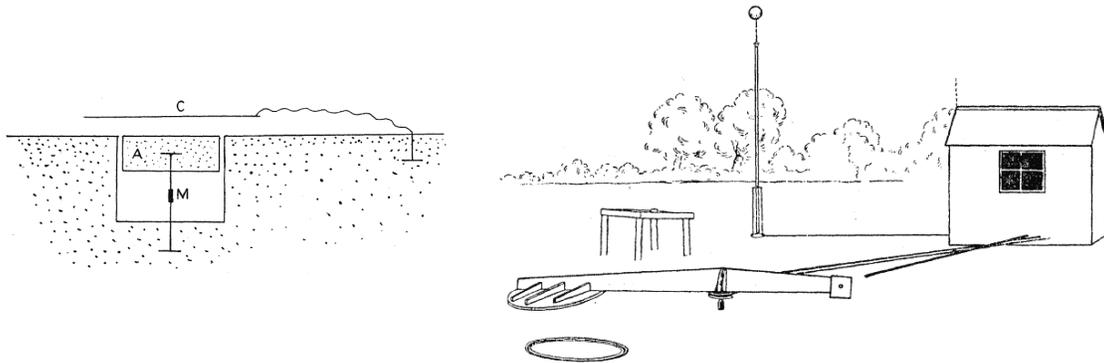


FIGURA 2.1: Esquema de medida y montaje utilizado por Wilson en 1916. Tomado de [1]

Además del *test plate*, Wilson realizó medidas de campo electrostático con una esfera metálica elevada la cual presentaba mayor sensibilidad que la placa a nivel del suelo. Los dos sensores se conectaban al mismo electrómetro por lo que era necesario coordinar el momento en que se debía usar uno u otro; la esfera se usaba para tormentas lejanas y campos débiles, mientras que la placa se usaba para campos eléctricos elevados.

El instrumento de medida era un electrómetro capilar y la observación debía realizarse con un microscopio debido al pequeño tamaño de las variaciones producidas por la carga inducida en la placa de medida. Las variaciones de campo eléctrico se detectaban en forma visual siguiendo la imagen del electrómetro en el microscopio y la distancia de ocurrencia de la descarga se medía mediante la diferencia de tiempo entre la detección del cambio de campo eléctrico y el inicio del trueno.

A pesar de las dificultades de su experimento, Wilson concluye que la carga transferida por el rayo se encuentra entre $-11,5$ y -40 C a una altura de 7 km. El valor medio de la carga transferida es -33 C. Con base en las observaciones, en este trabajo se propuso por primera vez el uso de medidas simultáneas de cambios de campo eléctrico como método para detectar y medir la descarga [1].

No obstante los resultados más importantes del trabajo de Wilson, que resultan de gran valor para el desarrollo de la presente tesis, son las medidas presentadas en 1920 [2]. Durante una campaña de medida en 1917 se registraron 711 cambios de campo eléctrico de polaridad positiva y negativa. Para ésta campaña el sistema de medida tuvo varias mejoras; el registro del campo eléctrico se hacía proyectando la imagen del microscopio sobre un papel fotográfico y la medida de la distancia se hacía en forma automática con un mecanismo de disparo (interrumpiendo la luz de una lámpara de parafina) que imprimía una línea sobre el papel fotográfico en el momento que se empezaba a escuchar el trueno. En la Figura 2.2 la señal instantánea de campo eléctrico es la proyección de la imagen del electrómetro capilar en el papel fotográfico y las líneas verticales corresponden con los momentos en que se percibe el trueno.

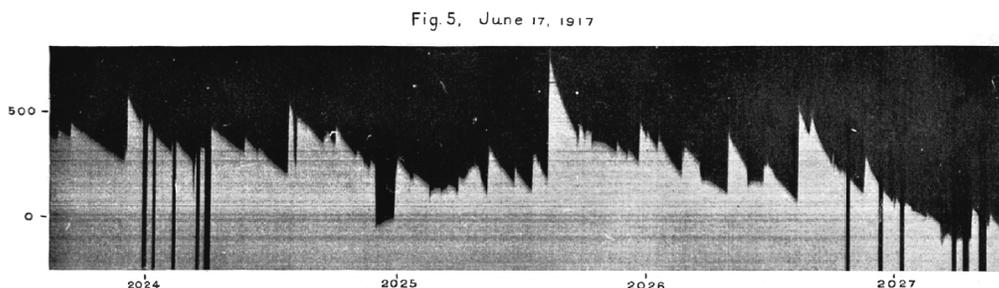


FIGURA 2.2: Ejemplo de registro de campo eléctrico y medida de la “distancia” de los experimentos de Wilson en 1917. Tomado de [2].

Las medidas entre 1914 y 1917 permiten obtener los primeros resultados experimentales del comportamiento de los cambios de campo eléctrico en función de la distancia; la Figura 2.3 describe el comportamiento de los cambios de campo negativos y positivos. Mediante un ajuste de datos sencillo Wilson concluye que la magnitud promedio del cambio de campo eléctrico a cualquier distancia puede ser calculado asumiendo que “el rayo promedio consiste en una descarga de -20 C a tierra desde una altura de 2 km”; igualmente remarca que ningún

evento de tormenta ocurrió exactamente sobre el lugar de medida lo que podría ser la razón para la subestimación de la altura obtenida.

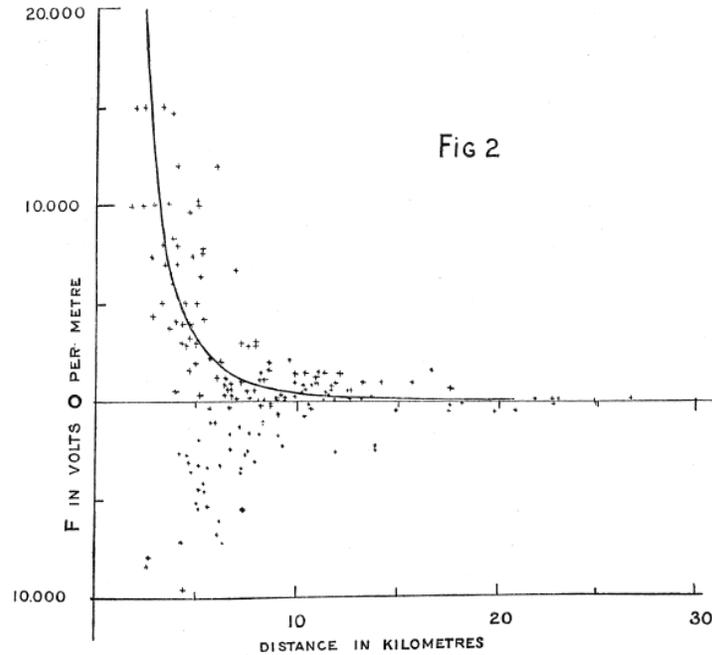


FIGURA 2.3: Cambios de campo eléctrico en función de la distancia reportados por Wilson en 1920. Tomado de [2].

En 1927 y 1928 *Schonland y Craib* [28] y *Schonland* [29, 30] presentaron estudios de electricidad atmosférica en Sur África. Las técnicas de medida estuvieron basadas en los experimentos de Wilson principalmente con la esfera elevada. Como principal modificación se introdujo un hilo horizontal elevado como conductor de medida. Durante los estudios se realizó la discriminación de rayos intranube y nube-tierra mediante un observador; pero dicha discriminación sólo era posible para tormentas lejanas. Las campañas de medida entre 1926 y 1927 proporcionaron una cantidad importante de datos, no obstante muy pocos casos pudieron identificarse sin ambigüedad como descargas nube-tierra. Entre las principales conclusiones están que el 90% de los cambios de campo eléctrico son positivos (correspondientes con rayos negativos)[29] y que sus resultados eran concordantes con un modelo de carga con una altura de 3 km y una carga de -15 C [30].

En 1939 *Wormell* [3] presenta resultados de campañas de medida realizadas en el *Solar Physics Observatory* (el mismo lugar de los estudios Wilson), entre 1928 y 1934. Los equipos de medida son la continuación de los aparatos usados por Wilson pero introduciendo un gran número de cambios. Además del *test-plate* y la esfera, *Wormell* introduce el *inverted test-plate*. Al igual que en los experimentos de los años 20, es necesario alternar entre los diferentes sensores debido a que se dispone de un solo sistema de registro. Para éste caso la

esfera sigue usándose para rayos lejanos, el *test-plate* para rayos cercanos y el *inverted test-plate* para cuando se presenta lluvia intensa y campos eléctricos muy elevados. El mínimo campo eléctrico medible para la esfera era 2 V/m, para el *test-plate* 18 V/m y para el *inverted test-plate* 200 V/m. En la Figura 2.4 se muestra el esquema del sensor invertido de Wormell en 1939.

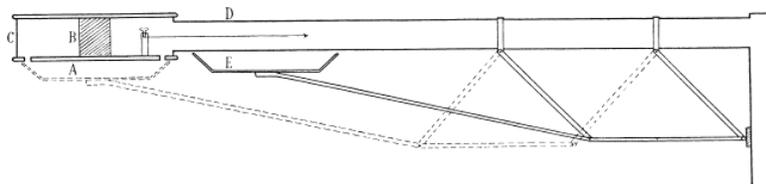


FIGURA 2.4: Electrodo de medida invertido presentado por Wormell en 1939. Tomado de [3].

Para el caso del *inverted test-plate*, la estructura de apantallamiento era conformada por una placa de aluminio conectada a tierra y un brazo que se movía operado por un electroimán. El electroimán era controlado por un reloj en el interior de la caseta de medida [3].

El estudio realizado por Wormell incluye 16 casos de tormenta entre 1928 y 1934; todos los eventos fueron registrados principalmente en la época de verano. Con base en las medidas, Wormell hace un análisis de la relación entre la distancia de la descarga y la amplitud de los cambios de campo eléctrico. La Figura 2.5 muestra las curvas obtenidas para los cambios de campo eléctrico positivos y negativos. Los casos graficados corresponden con aquellos en los que la distancia de la descarga pudo identificarse sin ambigüedad.

Las líneas continuas de los gráficos corresponden con el campo eléctrico asociado con una carga de 22 C a 5 km de altura; sin embargo debe notarse que las líneas continuas corresponden con ajustes realizados considerando que la distribución de la magnitud de la carga es normal; si se considerara una distribución log-normal, la cual se ha demostrado en estudios posteriores es más acorde con la naturaleza de ésta variable, es de esperarse que la altura real del rayo medio derivado de las medidas de Wormell sea mayor.

En su trabajo, Wormell también hace una discusión acerca de la gran dispersión que presentan los cambios de campo eléctrico a cortas distancias de hasta 6 km; A pesar de la gran dispersión se encuentra que estos cambios también pueden ser representados por un modelo de carga puntual y obtiene como resultado un equivalente de -17,6 C a 4,5 km de altura. Nótese como los anteriores resultados son coherentes con el modelo de carga bipolar para rayos nube tierra usado en trabajos más recientes como *Murphy* (1996) [10].

Por las características de las medidas realizadas por Wormell; las curvas mostradas en la Figura 2.5 y los equivalentes de carga obtenidos resultan de gran interés para realizar comparaciones con el mismo tipo de curvas obtenidas de medidas recientes.

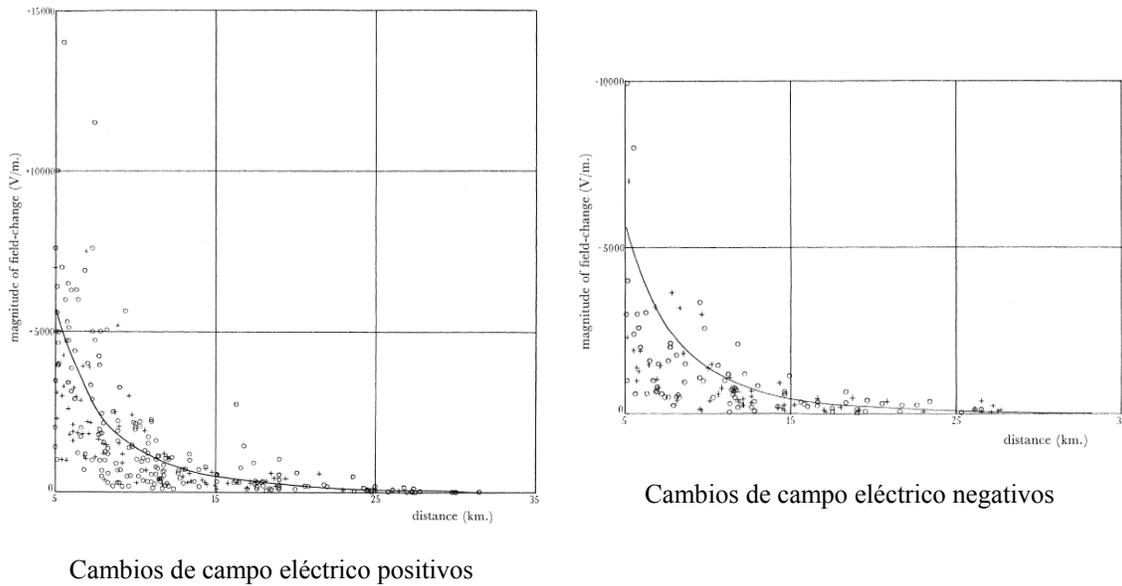


FIGURA 2.5: Cambios de campo eléctrico en función de la distancia reportados por Wormell en 1939. Tomado de [3].

Workman et al. [31] realizan en 1942 un primer experimento de medida de campo electrostático en diferentes puntos para localizar las soluciones de carga puntual asociada con rayos nube-tierra e intranube. En este experimento realizado en Nuevo Méjico - USA, se obtuvo un valor medio de -24 C y una altura que varía entre 4 y 7 km.

En 1952 *Reynolds y Neill* [4] llevaron a cabo un experimento similar al realizado por Workman también en Nuevo Méjico - USA. El sistema de medida lo constituían 11 sensores de campo eléctrico localizados sobre una zona plana a 2100 msnm. Los medidores eran una versión a escala del primer prototipo de Wilson, donde la superficie de apantallamiento se operaba en forma continua aplicando impulsos eléctricos a un solenoide. Los 11 sensores eran operados simultáneamente desde una estación central. El sistema de registro de cada estación lo conformaban un tubo de vacío, un galvanómetro y un arreglo óptico para grabar la imagen del galvanómetro en una cinta. La Figura 2.6 muestra una de las estaciones de medida del sistema de Reynolds y Neill.

Las medidas simultáneas permiten localizar las soluciones de carga para cada rayo nube-tierra o intranube; sin embargo también introducen mayor complejidad dado que para obtener las soluciones se debe resolver un sistema de ecuaciones no-lineal del mismo tamaño de la red. Los datos registrados por Reynolds y Neill [4] fueron analizados mediante un método de ensayo y error basado en datos tabulados. Las tablas contenían el valor de la expresión $H/(H^2 + R^2)^{3/2}$ donde H es la altura de la solución de carga y R es la distancia horizontal de la solución de carga con cada sensor. Una vez obtenidos los ΔE simultáneos de la descarga

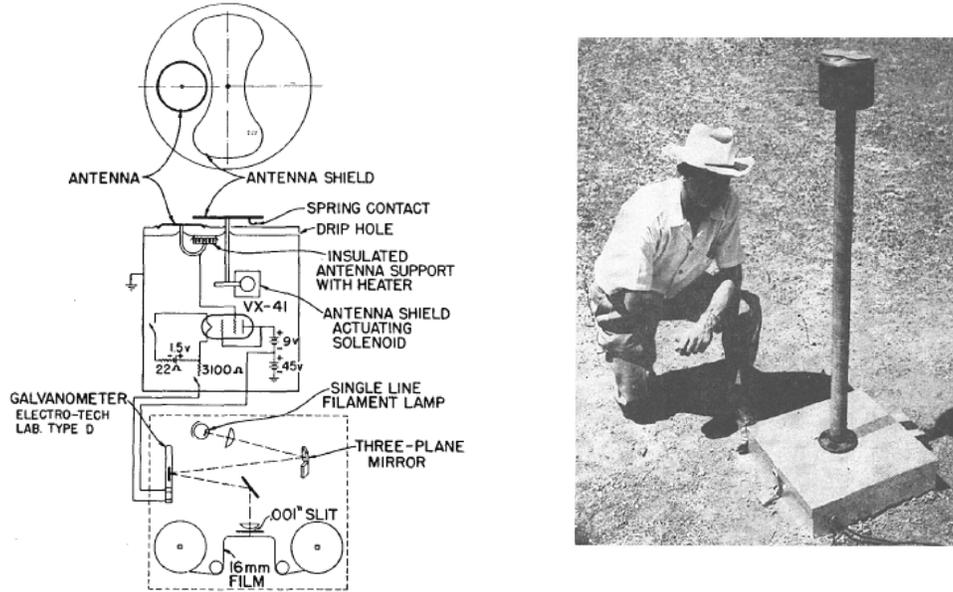


FIGURA 2.6: Estación de medida de Reynolds. Tomado de [4].

y partiendo de una solución inicial, las coordenadas de la solución se movían hasta que el error en el gradiente de potencial en cada sensor era menor a 50 V/m o estaba dentro del 5%.

A partir de los anteriores trabajos muchos investigadores desarrollaron experimentos con múltiples estaciones de medida. Redes pequeñas han sido usadas por *Takeuti* [32], *Ogawa y Brook* [33] y otros. Estudios más profundos se han desarrollado en Nuevo México (*Krehbiel et al.*, [34, 35]) y en Florida (*Jacobson y Krider*, 1976 [36]; *Maier y Krider*, 1986 [37]; *Koshak y Krider*, 1989 [8]; *Krider*, 1989 [38]; *Nisbet et al.*, 1990 [39]; *Murphy et al.* 1996 [10]; *Murphy*, 1996 [40] y otros). El sistema no lineal derivado de las medidas simultáneas de campo eléctrico fue solucionado numéricamente por *Jacobson y Krider* 1976 [36] usando un procedimiento de optimización de mínimos cuadrados.

Uno de los trabajos más recientes de medida de variaciones de campo eléctrico con una estación aislada es presentado por *Montanyà* [41] y *Montanyà et al* [42] con campañas de medida durante el verano de 2003 en Cataluña, España. Con respecto a los estudios previos, éstas nuevas medidas tienen como diferencia importante que se usó una estación móvil de medida de campo electrostático y una antena de plato. Adicionalmente la medida de la distancia entre la estación de medida y la descarga nube-tierra fue calculada a partir de dos sistemas de localización total de rayos. En total se consideraron ocho episodios de tormenta. El número total de descargas nube-tierra usadas para la estimación de la solución puntual de carga fue 260. Como resultado se obtuvo que la variación de carga ΔQ se encuentra entre -4.5 y -45 C a una altura promedio de 6.7 km.

CUADRO 2.1: Valores de carga eléctrica y altura derivados de medidas en diferentes lugares del mundo

Lugar	Carga [C]	Altura [km]	Investigador
Inglaterra	-11.5 a -43	7	Wilson (1916)
Inglaterra	-20	2	Wilson (1920)
Inglaterra	-10 a -40	4.5 a 5	Wormell (1939)
Sudáfrica	-15	3	Schonland (1928)
Sudáfrica	-4 a -40	2.5 a 8.7	Barnard (1951)
Sudáfrica	—	4 a 8.5	Malan (1951)
Nuevo Mexico	-24	4 a 7	Workman (1942)
Nuevo Mexico	-5 a -20	4.3 a 7.2	Reynolds (1955)
Nuevo Mexico	-5 a -60	3 a 8	Brook (1962)
Nuevo Mexico	-30 a -48	4.5 a 6	Krehbiel (1974)
Japón	-50 a -150	4 a 8	Hatekeyama (1958)
Japón	-6 a -55	6 a 8	Tamura (1954)
Japón	-20	3.5 a 5.5	Takeuti (1966)
Hong Kong	-25	4	Wnag (1963)
Australia	-17	3	Mackerras (1968)
Florida	-10 a -40	6 a 9.5	Jacobson (1976)
Nuevo Mexico	-47	5.5	Krehbiel (1979)
Florida	-7 a -49	8	Koshak (1989)
Florida	-5 a -33	5 a 10	Maier (1986)
Florida	-9 a -48.4	3.5 a 16.6	Krider (1989)
Florida	—	8	Murphy (1996)
Cataluña	-4.5 a 45 (-9.7)	6.7	Montanyà (2004)
Florida	-25.1, 5.55	8.98, 5.95 (bipolar)	Aranguren (2011)
Navarra (España)	—	9.19	Aranguren (2011)
Bogotá (Colombia)	—	8.42, 6.32 (bipolar)	Aranguren (2011)

La Tabla 2.1 resume los resultados encontrados por algunas de las investigaciones más importantes realizadas en diferentes lugares del mundo. Los últimos tres resultados hacen parte de la presente tesis.

Desde un punto de vista de *grado científico*, las soluciones de carga para descargas nube-tierra e intranube han sido ampliamente estudiadas mediante modelos de carga puntual, bipolar o dipolar; y los resultados más precisos han sido obtenidos a partir de estudios con medidas simultáneas de variaciones de campo eléctrico. Sin embargo, desde un punto de vista de *grado operacional* los antiguos análisis con una única estación como los realizados por *Wilson* [2] y *Wormell* [3], proporcionan una distribución de datos que puede analizarse en forma estadística y considerarse como la *curva de operación* de un molino de campo en una instalación y un lugar específicos. Otros estudios basados en la medida de variaciones de campo eléctrico con una única estación son: *Barnard*, 1951 [43]; *Tamura*, 1958 [44]; *Hatakeyama*, 1958 [45] y *Jacobson and Krider*, 1976 [36].

En la revisión histórica, desde los estudios realizados por *Wilson* (1916, 1920) [1, 2] hasta

los más recientes como los realizados por *Montanya* (2004) [41], los experimentos con una estación de medida aislada evidencian una serie de puntos tecnológicos comunes:

2.1.1. El rango de medida

Los trabajos de *Wilson* (1916, 1920)[1, 2], *Schonland* (1927)[29, 30] y *Wormell* (1939)[3], entre otros, usaron varios tipos de sensores con ganancias diferentes (placa a nivel del suelo, esfera elevada, placa invertida, hilo elevado, etc.) para lograr medidas tanto con tormentas lejanas como cercanas; durante los episodios de tormenta se usaba un solo equipo de medida (e.j. electrómetro capilar) y los sensores se iban cambiando dependiendo de la distancia estimada de la tormenta; los artículos entre 1920 y 1939 discuten acerca de la gran dificultad para escoger el momento y el tipo de sensor a usar, en la mayoría de los casos la medida era muy grande o muy pequeña para el equipo de registro.

Reynolds y Neil (1955)[4] realizaron medidas con su red de 11 sensores durante 18 episodios de tormenta en Nuevo Méjico, sin embargo solamente 6 episodios aportaron datos útiles y tan solo 2 episodios aportaron realmente un volumen de información útil para el estudio de las soluciones de carga. El principal problema reportado fue que en la mayoría de los episodios, la mayoría de los sensores se encontraban “fuera de escala” en el momento de la descarga.

Wormell (1939)[3] discutió acerca de la gran dispersión comúnmente presentada por las medidas de campo electrostático. *Jacobson and Krider* (1976) [36] llegaron a la conclusión de que una sola estación de medida no era suficiente para estimar la distancia a la que se encontraba la descarga debido a la gran dispersión.

En la actualidad, en la operación de cualquier molino de campo es imperante un sistema de autoescalas o un sistema de registro con un rango muy alto y una resolución del orden de V/m.

En el desarrollo de la presente tesis, el efecto de la gran dispersión de los ΔE a cortas distancias se vio aumentado al realizar los estudios en zonas montañosas. En muchos casos el rango de medida usado en los molinos de campo fue de hasta 150 kV/m. Para no perder variaciones de campo eléctrico muy pequeñas o el campo eléctrico de buen tiempo fue necesario usar sistemas de digitalización de hasta 14 o 16 bits.

2.1.2. La lluvia intensa y las tormentas cercanas

En respuesta a los múltiples problemas presentados por el *test-plate* durante la medida de tormentas cercanas, *Wormell* (1939)[3] desarrolló el *inverted test-plate*; a partir de éste nuevo sensor *Wormell* presenta un análisis de ΔE producidos por rayos cercanos mucho más extenso que el realizado en los años anteriores por *Wilson* (1920)[2]. El diseño de los sensores de *Reynolds y Neil* (1955)[4] era vertical no invertido, gran parte de los fallos de sus equipos también fueron asociados con la lluvia intensa.

Malan y Schonland (1951)[9] presentan un primer diseño de molino de campo conocido como *Fluxómetro Electrostático* y a la vez un mecanismo para invertir el sensor cuando la tormenta se encuentra muy cercana.

La gran mayoría de los sensores actuales son invertidos; para el caso de ésta tesis se usaron molinos de campo de 4 fabricantes diferentes y en lugares diferentes, todos ellos invertidos.

2.1.3. La medida de la distancia

Desde los trabajos de *Wilson* (1916, 1920)[1, 2] hasta *Jacobson and Krider* (1976)[36] la distancia entre la descarga nube-tierra y el lugar de medida se obtuvo midiendo la diferencia de tiempo entre el registro del ΔE y el trueno. Los principales problemas descritos por los diferentes autores coinciden en la dificultad para identificar el trueno correspondiente a cada ΔE . *Jacobson y Krider* usaron también registros fotográficos de los canales de las descargas nube-tierra.

Murphy y Murphy et al. en 1996 [10, 40] usaron el CGLSS (Cloud-to-Ground Lightning Surveillance System) y el LDAR (Lightning Detection and Ranging) como sistemas de localización de rayos para inferir la distancia y la altura de las soluciones de carga en Florida. Un estudio similar fue presentado en Cataluña, España por *Montanyà*(2004) y *Montanyà et al.* (2009)[41, 42] quienes usaron el SLDN (Spanish Lightning Detection Network) y el sistema de localización de rayos en VHF XDDE (por su siglas en Catalán).

La presente tesis combina la medida de campo electrostático con datos de varias redes de localización de rayos en los lugares de estudio. En Florida se usaron datos del CGLSS y el LDAR; en Navarra, España se usaron los datos del sistema LINET y en Colombia se usó la información proporcionada por el SID (Ver capítulo 4).

2.1.4. Diferenciación de rayos intranube y nube-tierra

En los primeros experimentos de *Wilson* [1, 2] no se evidencia que los registros hayan permitido identificar el tipo de descarga asociada con una variación de campo electrostático. Dado lo anterior no es posible conocer cual fue el efecto producido por las descargas intranube en la distribución de las variaciones ΔE en función de la distancia, y por lo tanto, en la estimación de la solución puntual de carga.

Schonland en 1928 [29] presenta un primer análisis de la polaridad de los ΔE asociados con descargas nube-tierra e intranube con el propósito de estudiar la polaridad de la nube de tormenta; para ello realizó la detección de rayos nube-tierra de forma visual.

Posteriormente con los experimentos de múltiples estaciones, si el número de estaciones

es mayor a 7, es posible identificar y obtener la solución de carga bipolar o dipolar para rayos intranube.

Dado que para la reconstrucción de la *curva de operación* de un molino de campo resulta más práctico usar únicamente medidas asociadas con rayos nube-tierra, en la presente tesis se usó la discriminación dada por la redes de localización. Para el caso del KSC, se usó la información del CGLSS que únicamente detecta rayos a tierra y para el caso de los registros del LDAR, sólo se usaron aquellos que coincidían con las detecciones del CGLSS. En Navarra se usó la discriminación realizada por LINET. En Colombia se usaron los registros de descargas nube-tierra dados por el SID.

2.2. Estructura de la nube de tormenta

Mediciones de campo electrostático han permitido caracterizar la estructura tripolar en nubes de tormenta aisladas. La carga negativa se encuentra confinada horizontalmente en la región de la nube con temperaturas entre -10°C y -20°C . La carga positiva superior es mas dispersa y se extiende por todo el volumen de la parte alta de la nube. Las cargas negativa y positiva de la nube se encuentran aisladas por un región quasi-neutral. La carga positiva inferior es menor en magnitud a la carga negativa y se extiende comúnmente debajo de la isoterma de 0°C .

El campo eléctrico producido por una nube tormenta a nivel del suelo puede obtenerse mediante un análisis sencillo basado en el método de las imágenes, considerando los centros de carga como cargas puntuales [5, 6, 46]. El campo eléctrico normal a la superficie terrestre producido a una distancia horizontal D asociado con una carga puntual Q a una altura H está dado por la expresión (2.1).

$$E = \frac{2QH}{4\pi\epsilon_0(H^2 + D^2)^{3/2}} \quad (2.1)$$

El campo eléctrico vertical producido por varios centros de carga puede calcularse mediante la superposición de los campos eléctricos asociados a cada uno de los centros. La Figura 2.7 ilustra la distribución de carga eléctrica en el interior de la nube y el campo eléctrico producido a nivel del suelo para diferentes valores de los centros de carga. Como puede apreciarse, la mayor amplitud de campo eléctrico vertical se obtiene justo debajo de la base de la nube con un LPCC de 0 C o 10 C; pero para un *Low Positive Charge Center* LPCC de 5 C el mayor valor de campo eléctrico se obtiene alrededor de 3 km y justo debajo de la base de la nube el campo eléctrico tiende a 0 V/m; por otro lado, para los tres tipos de nube se presenta un cambio de polaridad alrededor de los 10 km.

Un sinnúmero de investigaciones se han realizado acerca de los mecanismos de electrificación de la nube de tormenta. Algunas revisiones generales han sido presentadas por *Moore y Vonnegut* [47], *Magono* [48], *Illingworth* [49], *Williams* [50], *Latham* [51], *Krehbiel* [52] y

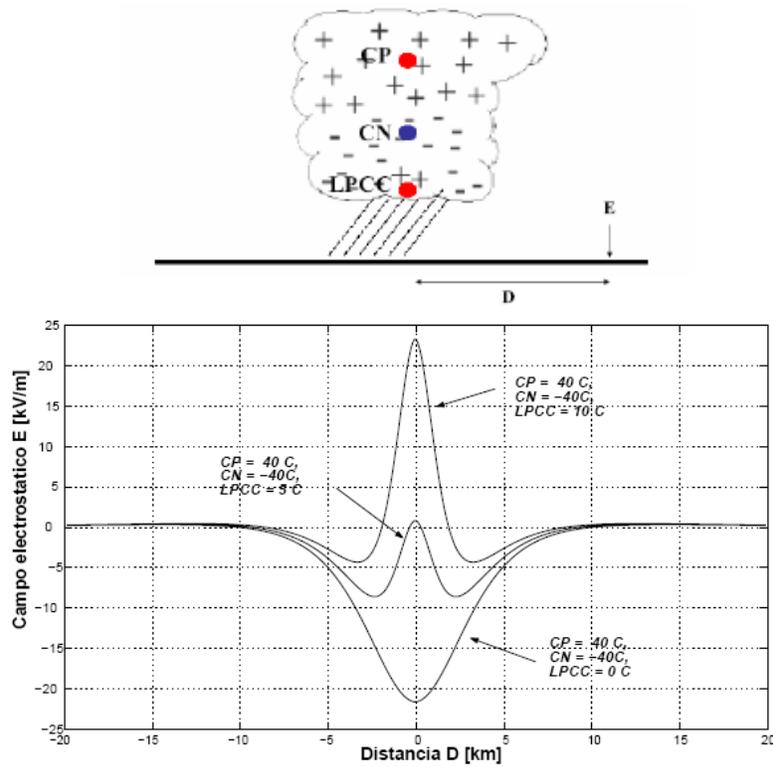


FIGURA 2.7: Modelo tripolar de la nube de tormenta y campo electrostático a nivel del suelo

McGorman y Rust [5], entre muchos otros. A continuación se describen en forma muy breve los principales mecanismos de electrificación.

2.2.1. Mecanismos convectivos de electrificación

Las cargas eléctricas en este mecanismo de electrificación están dadas por fuentes externas como la carga espacial producida por efecto corona en la superficie terrestre o rayos cósmicos en la parte alta de la nube. De acuerdo con éste mecanismo, defendido principalmente por *Moore y Vonnegut* [47, 53], las corrientes ascendentes de aire cálido transportan carga espacial positiva de buen tiempo hasta la parte superior del cúmulo en crecimiento. Cargas negativas producidas por rayos cósmicos son atraídas hacia la nube por la carga positiva en su interior. La carga negativa es atrapada por las partículas de la nube formando una capa conocida como *screen layer*. Las corrientes descendentes debidas a la convección y precipitación transportan la carga negativa hacia regiones más bajas; ésta carga sirve adicionalmente para generar más carga positiva en la superficie terrestre por efecto corona, realimentando el proceso.

La principal debilidad de ésta teoría radica en que no puede explicar por qué la región de carga negativa, en diferentes tipos de tormenta, tiende a localizarse en regiones con un rango

de temperatura similar.

Chauzy y Soula [54, 55, 56, 57] desarrollaron una serie de experimentos en Francia y en Florida para estimar la cantidad de carga eléctrica producida por efecto corona bajo nubes de tormenta que podía contribuir al mecanismo convectivo de electrificación. Sus experimentos se basaban en medidas de campo electrostático a diferentes alturas; uno de sus experimentos más interesantes fue realizado en Florida en donde mediante un globo aerostático se hicieron medidas simultaneas desde el nivel del suelo hasta 980 m de altura [56].

En 1999, *Chauzy y Soula* [58] describen como la cantidad de carga generada por un área de $10 \times 10 \text{ km}^2$, durante todo el ciclo de vida de la tormenta, varía entre decenas y pocos cientos de Culombios; valor que es del mismo orden de magnitud que la carga transferida por una sola descarga a tierra. Dado lo anterior, aparentemente la carga espacial generada por efecto corona en la superficie terrestre no es suficiente para explicar la electrificación total de la nube de tormenta por efecto convectivo; sin embargo, si podría estar relacionada con la formación del centro inferior de carga positiva.

2.2.2. Mecanismos de electrificación por inducción electrostática

Éste mecanismo considera que las partículas de precipitación en la nube son polarizadas por efecto del campo eléctrico del ambiente; cuando una partícula de precipitación polarizada colisiona con una partícula de nube (partículas en suspensión) también polarizada, parte de la carga en la zona inferior de la partícula de precipitación es transferida a la partícula de nube; la partícula de nube queda por tanto con un exceso de carga después de la colisión, de la misma polaridad de la carga en la parte baja de la partícula de suspensión; dada la polaridad del campo eléctrico del ambiente, la partícula en suspensión presentaría un exceso de carga positiva.

El mecanismo de inducción fue propuesto inicialmente por *Elster y Geitel* [59] en 1988; posteriormente muchos investigadores como *Latham y Mason* [60], *Paluch y Sartor* [61, 62] y *Chiu* [63], entre muchos otros, aportaron conceptos físicos para el modelamiento de la generación de carga mediante inducción electrostática.

En la actualidad se considera que solamente las colisiones entre partículas de precipitación congeladas y gotas de agua superenfriadas podrían tener relación con la electrificación de la nube de tormenta; *Aufdermaur y Johnson* [64], encuentran a partir de experimentos de laboratorio, que la electrificación por inducción puede generar la separación de carga suficiente para mantener la nube electrificada, no obstante, para ello es necesario contar con un campo eléctrico de 10 kV/m; teniendo en cuenta que el campo eléctrico del ambiente es mucho menor, el mecanismo de electrificación por inducción sólo podría darse una vez la nube de tormenta ya se encuentre electrificada mediante otro mecanismo.

La inducción electrostática requiere de un tiempo suficiente para que la carga eléctrica

pueda transferirse de una partícula a otra, principalmente por la baja conductividad de las partículas de hielo. El mecanismo por inducción cuenta actualmente con poca aceptación dado que no puede explicar muchos de los comportamientos observados en tormentas reales como son la rápida recuperación que presenta la carga en la nube entre rayos o la separación de grandes distancias de regiones de cargas. Los resultados de laboratorio muestran que éste mecanismo si se da en nubes de tormenta, pero ocurre al lado de otros mecanismos.

2.2.3. Mecanismos no inductivos

Los mecanismos considerados como no inductivos son aquellos en los que no se requiere polarización de los hidrometeoros por un campo eléctrico. *Workman y Reynolds* [65] en 1950, estudiaron la separación de carga que se presentaba en la interfaz entre hielo y agua; más adelante, *Reynolds* [66] encuentra que la separación de carga es debida también a colisiones entre granizo y gotas de agua o entre granizo y partículas de hielo. El mecanismo más aceptado actualmente es el *graupel-ice mechanism* (granizo - partículas de hielo), derivado principalmente de las investigaciones de *Reynolds* [66, 67], en el cual las partículas de granizo son capaces de tomar mucha más carga por colisión, cuando se encuentran en crecimiento por *riming* en cercanías de cristales de hielo.

El mecanismo *graupel-ice* es el único que al parecer explica la estructura tripolar de la nube de tormenta; las partículas de granizo que son las más pesadas caen por gravedad, a través de partículas en suspensión más pequeñas de hielo y gotas de agua súperenfriadas. Las gotas de agua súperenfriadas se congelan al hacer contacto con la superficie del hielo y se adhieren, generando un proceso de crecimiento conocido como *riming*. Éste mecanismo puede explicar la estructura tripolar de la nube gracias a que la polaridad y cantidad de carga que toman las partículas durante las colisiones, presenta una relación con la temperatura; *Jarayatne et al.* [68] en 1983, realizó experimentos de laboratorio en los que encontró que cuando la temperatura se encuentra por debajo de un valor crítico, las partículas de granizo adquieren carga negativa durante las colisiones con partículas de hielo; por encima de éste valor crítico de temperatura el granizo toma carga positiva, mientras el hieo toma carga negativa; la temperatura crítica o de cambio de polaridad T_R se encuentra generalmente entre -10 y -20 °C; éste rango de temperaturas coincide con la región de carga negativa encontrada comúnmente en nubes de tormenta.

El mecanismo *graupel-ice* presenta una fuerte dependencia con las características del ambiente, por lo que daría lugar a explicar porque en ciertos casos de tormenta se produce la electrificación y en otros no. Una descripción más detallada acerca de éste mecanismo puede encontrarse en [67, 69, 70, 5, 6].

2.3. Tipos de tormenta

Generalmente pueden distinguirse dos tipos principales de tormentas eléctricas: Tormentas convectivas o termales y tormentas frontales o ciclónicas [5].

Las tormentas de origen convectivo aparecen después del calentamiento de la tierra ocurrido durante el día, usualmente en horas de la tarde y extendiéndose en algunas regiones hasta la madrugada. Éste tipo de tormentas es afectado por la orografía en donde su origen se da principalmente en zonas montañosas desplazándose posteriormente hacia las zonas planas.

Las tormentas frontales son el resultado de la interacción de frentes de aire, donde pueden distinguirse los frentes fríos, cálidos y ocluidos. La interacción entre los frentes produce la convección que conduce posteriormente a la generación de los cúmulos que se comportan en forma de “frentes de tormenta” con un desplazamiento que está definido principalmente por factores de mesoescala.

Diferentes factores influyen en la ocurrencia de tormentas eléctricas en una determinada región, sin embargo, la radiación solar, la humedad y la orografía son los factores más determinantes. La ocurrencia de tormentas eléctricas guarda una relación estrecha con la latitud. En la región tropical del planeta, debido principalmente a la alta radiación solar, se presentan la mayor cantidad de tormentas, mientras que en los polos la actividad es prácticamente nula. La actividad eléctrica también muestra variaciones en las diferentes épocas del año. En las zonas templadas del planeta las tormentas eléctricas ocurren principalmente durante el verano cuando la radiación solar es mayor, no obstante, en las demás estaciones también ocurren tormentas que pueden asociarse en algunos casos con las diferencias de temperatura entre el mar y la tierra.

Las anteriores variaciones en espacio y en tiempo justifican la realización de estudios del fenómeno en diferentes regiones y por periodos prolongados de tiempo que permitan su entendimiento. Los estudios de tormentas eléctricas han sido realizados en su gran mayoría en Europa, USA y Japón, lo que ha permitido hacer caracterizaciones en estas regiones, sin embargo, en regiones como la zona tropical del planeta, posiblemente la zona con mayor actividad eléctrica atmosférica, la información disponible es muy poca.

2.3.1. Tormentas monocelulares

Las tormentas monocelulares son el tipo más común, en el cual la fase de formación presenta vientos ascendentes de hasta 20 m/s, con una altura de hasta 12 km, un diámetro de 10 km y una duración cercana a 30 min. En este tipo de tormentas la actividad de descargas intranube es mayor a la actividad de rayos nube-tierra.

2.3.2. Tormentas Severas y Supercelulares

El National Weather Service en Estados Unidos, denomina tormenta severa a aquella que produce en tierra un tornado, vientos con velocidades mayores a 26 m/s o granizo con un

diámetro mayor a 1.9 cm (Jonhs and Doswell, 1992, McGorman, 1998) [71][5]. Diferentes tipos de tormentas pueden categorizarse como tormentas severas, sin embargo, la gran mayoría de ellas son del tipo tormentas supercelulares. Este tipo de tormentas se caracteriza por constituirse de una sola célula con una vida entre 4 y 6 horas, reflectividad muy alta superior a 55 dBZ y con corrientes verticales continuas con velocidades mayores a 40 m/s. La extensión de una supercélula varía entre 20 y 50 km.

2.3.3. Sistemas Convectivos de Mesoescala

Los *Mesoscale Convective Systems* - MCS son grupos de tormentas que interactúan unas con otras generando un sistema tormentoso de larga duración con dimensiones mucho mayores a las de una tormenta individual. Las dimensiones de estos sistemas pueden ser de cientos de kilómetros con una duración que puede ser mayor a 6 horas. La región de convección más profunda es llamada la región *convectiva* mientras que la parte de la tormenta con corrientes ascendentes débiles, con velocidades menores a 1 m/s, es llamada la región *estratiforme* [72].

Madox en 1980 [73], definió las principales características de los MCS; estas características son: una extensión horizontal mayor a 250 km, un área de mas de 50,000 km² con temperaturas inferiores a $-52^{\circ}C$ y 100,000 m² con temperaturas inferiores a $-32^{\circ}C$ y una duración mínima de 6 horas.

En los MCS la actividad de rayos está principalmente concentrada en rayos intra-nube. En 1983, Mazur y Rust [74] reportaron una relación de descargas intranube contra descargas nube-tierra IC/CG igual a 40 y otros estudios (Schuur et al, 1991; Rutledge et al, 1992) [75][76] han encontrado valores aún más altos. De otro lado, la frecuencia de ocurrencia de rayos *flash rate* en la región estratiforme tiende a ser mucho menor que en la región convectiva. En la mayoría de los casos la mayor densidad de descargas ocurren en las regiones de mayor reflectividad en la línea convectiva de la tormenta; densidades altas de ocurrencia de descargas también son observadas en los lugares de surgimiento de nuevas células tormentosas.

En la región estratiforme tienden a aparecer rayos con gran extensión horizontal conocidos como *spider lightning*. Algunos investigadores han reportado descargas que se propagan decenas de kilómetros en forma horizontal en la región estratiforme del MCS (Rust et al, 1985; Schuur et al, 1991). Con base en observaciones hechas con sistemas LMA - *Lightning Mapping Array*, se ha encontrado que los *spider lightning* se propagan desde la línea convectiva de la tormenta hacia el final de la región estratiforme, en algunos casos con longitudes mayores a 100 km. La región estratiforme del MSC también suele asociarse con rayos nube-tierra positivos y con la ocurrencia de TLEs. La Figura 2.8 describe el modelo del MSC.

2.3.4. Tormentas eléctricas en el trópico

Muy pocos estudios sobre tormentas eléctricas en el trópico han sido realizados y la información disponible es escasa. Según Takahashi (1975) aparentemente en el trópico se presentan

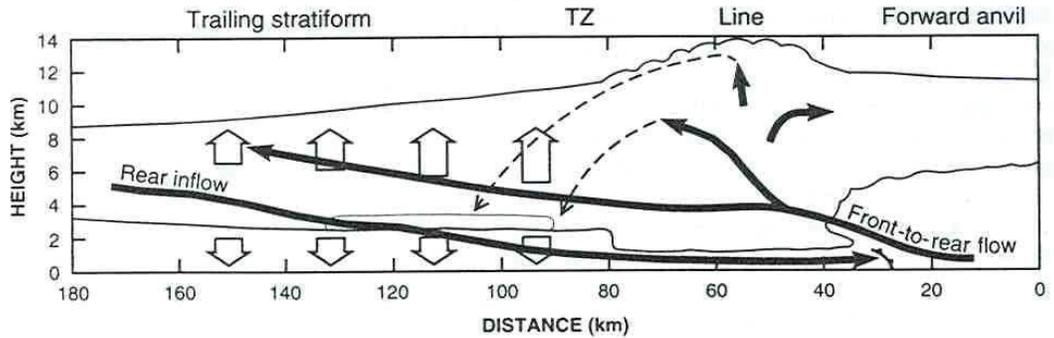


FIGURA 2.8: Sistema Convectivo de Mesoescala [5].

con mayor frecuencia tormentas cálidas, en las cuales la parte más alta de la nube no supera la isoterma de 0°C . Igualmente, tanto tormentas monocelulares como MCS se presentan en zona tropical, sin embargo, algunos autores consideran la actividad de rayos en el trópico como un “enigma” debido a la poca información y a las diferencias encontradas con respecto a zonas templadas (McGorman y Rust, 1998) [5].

La zona tropical es la principal aportante en la actividad de rayos del planeta. Mediante observaciones satelitales se evidenció la dependencia con la latitud de la rata de ocurrencia de descargas (Orville y Spencer, 1979)[77], en donde se encontró una rata cercana a 100 rayos/s en el ecuador reduciéndose a menos de 10 rayos/s para latitudes norte y sur mayores a 20° . Observaciones realizadas con los sistemas OTD (Optical Transient Detector) y LIS (Lightning Imaging Sensor) de la NASA, muestran la actividad global de rayos de la Figura 2.9; como puede apreciarse la actividad de rayos tiende a concentrarse en las zonas continentales con valores máximos de DDT (Densidad de Descargas a Tierra - *Rayos/km²año*) en las regiones tropicales [5][6][46].

Las observaciones de TLE’s hechas desde el espacio también muestran una tendencia a detectar mayor número de eventos en la región tropical alcanzando en algunas regiones de Colombia hasta $0,1 \text{ descargas/km}^2/\text{año}$ [23]. Sin embargo, la poca información disponible sobre los tipos de tormentas, los tipos de descargas y las magnitudes de carga eléctrica en las nubes, entre otras, dificultan el planteamiento de hipótesis que expliquen la procedencia de estos fenómenos y su relación con la actividad eléctrica en ésta región.

2.4. Generalidades sobre aspectos de predicción de rayos

El método más básico de alerta de tormentas eléctricas se basa en la regla 30/30 [15, 78] para la protección de personas. La regla establece que si la diferencia de tiempo entre el relámpago (efecto luminoso) y el trueno (efecto sonoro) es menor a 30 s (equivalentes a un rayo ocurrido a una distancia de 9,6 km del observador) las personas en espacios abiertos deben buscar un refugio seguro y deben permanecer allí hasta 30 minutos después del último trueno.

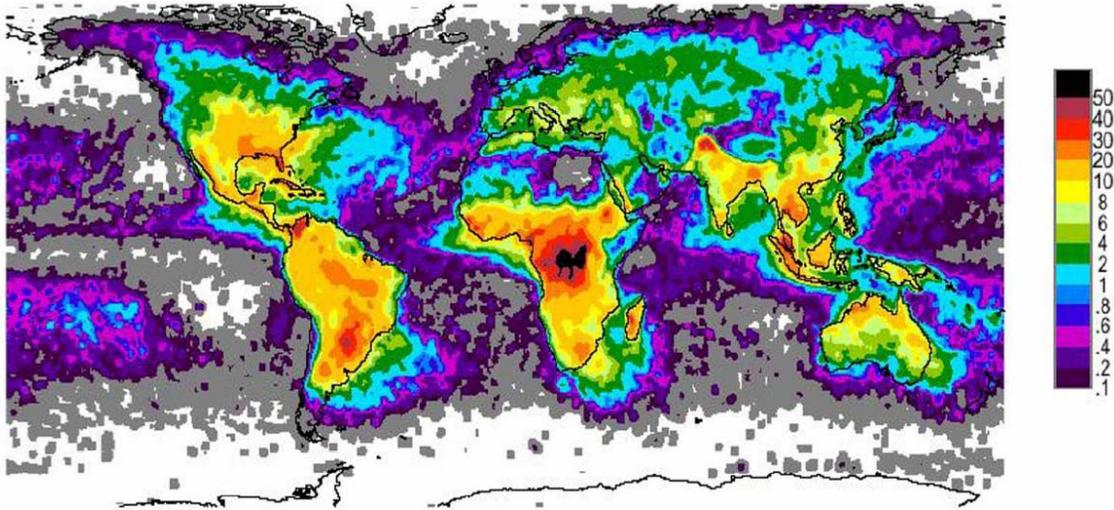


FIGURA 2.9: Densidad de Descargas a Tierra - DDT global (Flashes/ km^2 año) [6].

Hoy en día los métodos de predicción se extienden a una gran variedad de actividades que incluyen, además de la protección de personas en espacios abiertos (parques, escenarios deportivos, lugares de trabajo y otros), la protección de aeropuertos, sistemas de distribución y transporte de energía eléctrica, parques eólicos, sistemas ferroviarios, entre muchos otros. Igualmente los métodos de medida han evolucionado hasta la detección total de rayos (nube-tierra e intranube CG+IC), radares meteorológicos y la medida de campo electrostático.

Un primer método de alarma basado en sistemas de detección de rayos pero derivado de la misma base conceptual de la regla 30/30 se desarrolló con base en la detección de rayos nube-tierra (CG). Para su aplicación se estimó que una alarma de riesgo por rayos para un lugar a proteger específico se puede dar si se detecta la ocurrencia de rayos a tierra en un área de alarma definida alrededor del sitio de interés [79, 80]. Sin embargo, los resultados obtenidos con una técnica basada únicamente en información CG muestran una alta tasa de falsas alarmas FAR (*False Alarm Rate*: Porcentaje de eventos pronosticados que no observados posteriormente).

Más recientemente el desarrollo de sistemas más sofisticados de detección de rayos han permitido incluir la información de descargas intranube (IC) facilitando desarrollar algoritmos de predicción basados en la “actividad total de rayos” [81, 82, 83, 84, 85, 86] lo que ha llevado a obtener una probabilidad de detección POD (*Probability Of Detection*: porcentaje de eventos observados que son correctamente pronosticados) mayor a 90 % y tasas de falsas alarmas FAR menor a 30 %.

Finalmente, cómo sistema más confiable de predicción se tiene el registro de campo electrostático; debido a que mide directamente el gradiente de potencial eléctrico producido por

la nube de tormenta, se considera que es la forma más directa de predecir la ocurrencia del primer rayo nube-tierra [14].

En resumen los sistemas de predicción de tormentas usados hoy en día son una integración de todas las anteriores en donde las tecnologías de de detección (CG) e (CG+IC) aportan en amplios rangos de medida y largos tiempos de predicción, mientras que la medida de campo electrostático aporta en eficiencia de detección y reducción de falsas alarmas.

2.4.1. Fases de formación de la tormenta y tecnologías de detección

En el capítulo 2 se describen los conceptos básicos relacionados con la electrificación y tipología de las tormentas eléctricas; no obstante para propósitos de clasificar las diferentes tecnologías de detección usadas en metodologías de predicción en función de sus características es importante establecer las fases de formación de la tormenta.

La figura 2.10 muestra la evolución temporal típica de los centros de carga positivo y negativo dentro de una nube de tormenta y la rata de ocurrencia de rayos (*lightning flash rates*) obtenidas del modelamiento numérico de *Solomon y Baker* [7, 87]. El modelo numérico fue iniciado con un sondeo realizado durante el experimento “CAPE” en Florida el 29 de julio de 1991. *Solomon et al* [87] describe los diferentes periodos observados en el modelo de la siguiente forma:

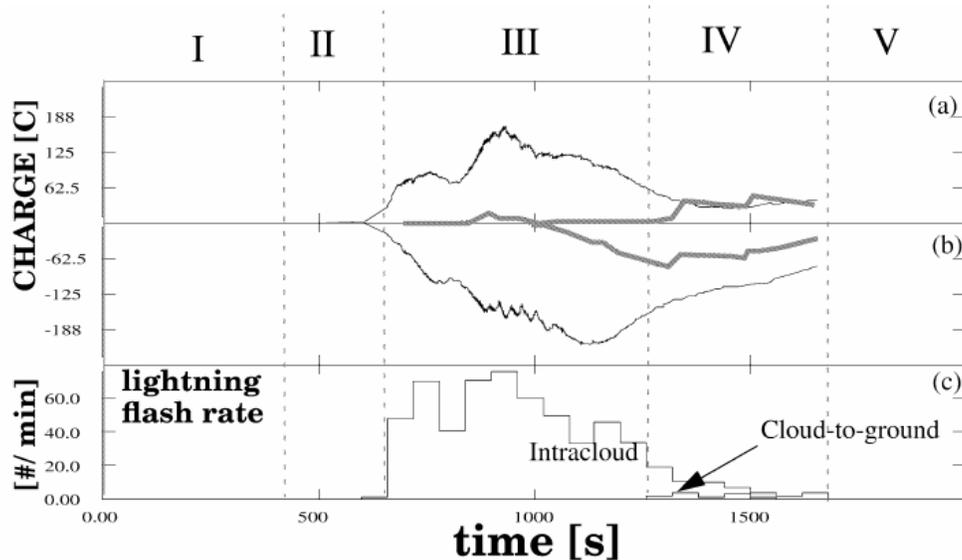


FIGURA 2.10: Evolución de los centros de carga en el interior de una nube de tormenta típica y número de rayos por minuto ocurridos. Florida 29 de Julio de 1991[7]

- En los primeros instantes de la formación de la nube (etapa de cúmulo), en el periodo I, las condiciones de generación de carga no han sido establecidas dentro de la nube.
- Aproximadamente 400 segundos después dentro del modelo, en el periodo II, comienza el proceso de electrificación. Ésta etapa finaliza cuando la magnitud del campo eléctrico entre los centros de carga es suficiente para iniciar una descarga (250 kV/m en todas las alturas). La estructura de carga al inicio de la fase II es típicamente un dipolo.
- El periodo III se caracteriza por una generación y separación de carga continua y el inicio de descargas intranube entre 6 y 7 km de altura. Las descargas intranube generalmente reducen el campo eléctrico entre un 10 y 15 %. En ésta fase la nube alcanza su máxima altura, la máxima reflectividad y la mayor cantidad de carga, superando los 150 C de acuerdo con el modelo. Las descargas intranube pueden alcanzar frecuencias hasta de $75 \text{ flash}/\text{min}$ según el modelo. Con el tiempo y la ocurrencia consecutiva de descargas intranube, los centros de carga cada vez se muestran más estructurados.
- El periodo IV es caracterizado por el inicio de las descargas nube-tierra, las cuales son iniciadas cuando se deposita la suficiente carga positiva en la base de la nube como para superar el valor umbral de campo eléctrico. En esta etapa las descargas pueden alcanzar frecuencias hasta de $5 \text{ flash}/\text{min}$.
- Posteriormente en el periodo V, continua la ocurrencia de descargas tanto intranube como nube-tierra y poco a poco disminuye la carga que mantiene los valores altos de campo eléctrico desapareciendo así mismo las descargas (etapa de disipación).

La norma europea EN50536 [13] hace una definición diferente de las fases de ocurrencia de una tormenta eléctrica y, en relación con éstas, las las tecnologías de detección:

Fases de formación de la tormenta eléctrica:

- Fase I: Etapa de inicio.
- Fase II: Etapa de crecimiento.
- Fase III: Etapa de maduración.
- Fase IV: Etapa de disipación.

Las tecnologías de detección:

- Clase I: Sistemas que detectan una tormenta en todo su ciclo de vida; Fases I a IV. (Ej. Molinos de campo eléctrico)
- Clase II: Sistemas que detectan actividad de rayos IC y CG (Actividad total de rayos), Fases II a IV. (Ej. Sistemas VHF, VLF/LF, interferometría)
- Clase III: Sistemas que detectan únicamente actividad de rayos CG. Fases III

- Clase IV: Instrumentos que detectan actividad de rayos CG y otras fuentes electromagnéticas con una eficiencia muy limitada.

Modelos

La carga generada durante los procesos de electrificación se distribuye en el volumen de la nube de tormenta en forma de regiones caracterizadas por tener una carga predominante, ya sea de polaridad positiva o negativa, a lo que se le ha dado el nombre de centros de carga. La presencia de estos centros de carga durante el desarrollo de una nube de tormenta modifica las condiciones eléctricas normales de la atmósfera conduciendo a una variación en el *Campo Eléctrico Ambiental* [5][46][6][88][50].

En condiciones normales, la distribución de cargas en la atmósfera es predominantemente de polaridad positiva, lo que genera (por convención) un campo eléctrico ambiental positivo en la superficie terrestre. Al aparecer la nube de tormenta, se generan en la atmósfera densidades volumétricas de carga mucho mayores a las de condiciones normales que conducen a un aumento en la amplitud del campo eléctrico, y centros de carga negativos cercanos a la superficie terrestre que conducen a cambios de polaridad.

Sin embargo, debido a la complejidad para crear un modelo electrostático para la nube de tormenta que pueda ser verificable mediante medidas de campo eléctrico, el modelamiento se ha concentrado en estudiar la carga ΔQ transferida por las descargas eléctricas y las variaciones de campo eléctrico ΔE asociadas. Los centros de carga eléctrica de la nube han sido derivados en parte por la localización y magnitud de los ΔQ .

Los primeros planteamientos teóricos acerca de la carga eléctrica involucrada en rayos nube-tierra, intranube e incluso nube-ionósfera, fueron dados por *Wilson* en 1916 [1]. Wilson

inicialmente consideró una carga q en un punto p en la atmósfera y la carga imagen, considerando la tierra como un conductor esférico. Debido a que la altura posible de la carga q es muy pequeña en relación con el radio de la tierra, la curvatura de la tierra puede ser despreciada. Con base en lo anterior, la fuerza eléctrica F producida en un punto O a nivel del suelo está dada por:

$$F_q = -\frac{2qh}{r^3} \quad (3.1)$$

Donde h es la altura de q y r es la distancia Op . Considerando que q es la carga de un elemento de volumen que rodea el punto p , el cambio en la componente vertical de la fuerza eléctrica en el punto O producido por la descarga de la carga neta Q , en todos los elementos de volumen, es dada por:

$$F = -\sum \frac{2qh}{r^3} \quad (3.2)$$

Si Q se distribuye simétricamente en esferas concéntricas o si el volumen de carga tiene dimensiones lineales pequeñas comparadas con la distancia R entre el centro de la región y O , la fuerza eléctrica vertical (normal a la superficie del suelo) puede expresarse como:

$$F = -\frac{2QH}{R^3} \quad (3.3)$$

Donde H es la altura de Q y $M = QH$ se define como el momento de carga de la descarga.

Extrapolando las anteriores definiciones para el caso en que la descarga no sea a tierra sino entre dos puntos 1 y 2 en la atmósfera, se encuentra que el cambio en la fuerza eléctrica en el punto O , debido al cambio de carga Q , es igual a:

$$F = \frac{2M_1}{R_1^3} - \frac{2M_2}{R_2^3} \quad (3.4)$$

Si la descarga es aproximadamente vertical y para una distancia grande puede considerarse $R_1 = R_2 = D$, el cambio en la fuerza eléctrica puede expresarse como:

$$F = \frac{2Q(H_1 - H_2)}{D^3} = \frac{2M}{D^3} \quad (3.5)$$

Donde M es el momento eléctrico o momento de carga de la descarga.

Los anteriores conceptos son la base del modelamiento usado en las investigaciones actuales. A continuación se describen los modelos usados en los estudios con estaciones aisladas (ej. *Montanyà* [41]) y redes de molinos de campo (ej. *Jacobson y Krider* [36], *Maier y Krider* [37], *Murphy* [10] y otros).

3.1. Modelamiento de los cambios de campo eléctrico asociados al rayo

Una descarga eléctrica atmosférica consiste en la transferencia de carga bien sea de nube a tierra o intranube, por lo tanto, su ocurrencia se ve reflejada en un cambio en la magnitud de un centro de carga y su distribución espacial. Este cambio de estado en la nube de tormenta ha sido usualmente modelado como un ΔQ , considerando la descarga como una variación puntual de carga (Fig. 3.1) [8]. La variación implica un cambio brusco en el campo eléctrico vertical ΔE_z medido en la superficie de la tierra, que se observa como una perturbación en el campo electrostático producido por la totalidad de la nube.

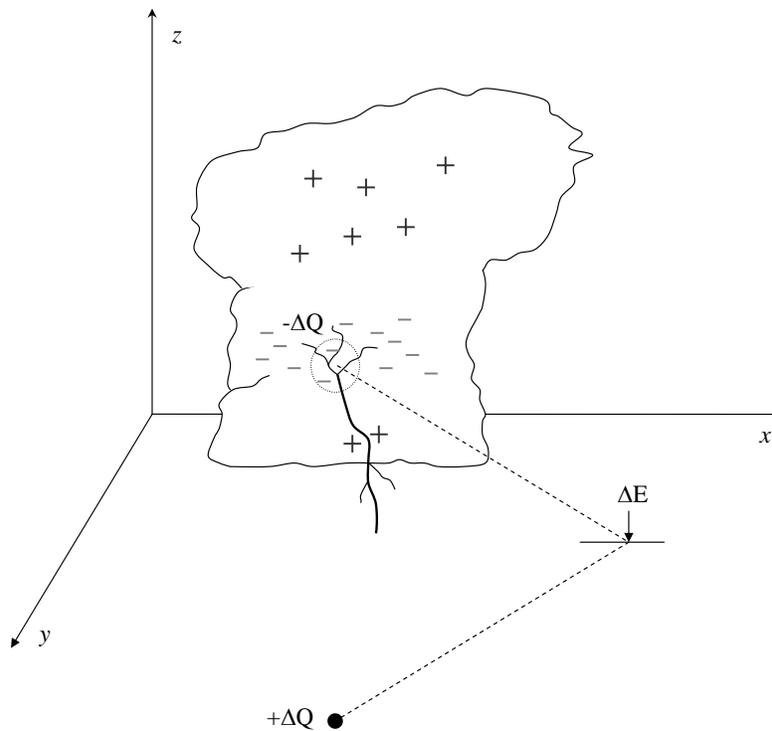


FIGURA 3.1: Modelo de carga puntual

Murphy [40] encontró que un alto porcentaje de las descargas nube-tierra en Florida se ajustan mejor a un modelo de carga bipolar, que el autor definió como 2QA (Figura 3.2); dicha conclusión se obtuvo luego de comparar las soluciones obtenidas mediante los modelos Q y 2QA, con las detecciones de VHF realizadas por el sistema LDAR. Según la comparación realizada por *Murphy*, el modelo Q tiende a mostrar valores de altura mayores a los presentados por las detecciones de VHF, principalmente en los casos en que se evidencia la presencia del centro de carga inferior de la nube LPCC - *Lower Positive Charge Center*.

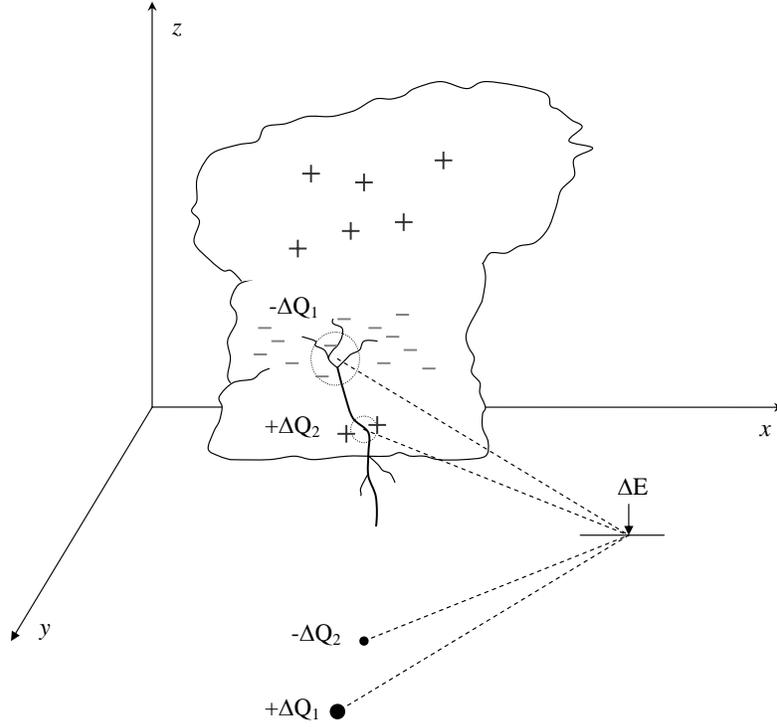


FIGURA 3.2: Modelo de doble carga bipolar

El análisis de campo eléctrico en la superficie terrestre puede hacerse utilizando el método de las imágenes, considerando la tierra como una superficie perfectamente conductora tal como ilustra la figura 3.1 [46]. Los cambios bruscos de campo eléctrico experimentados cuando ocurre una descarga, con base en los modelos de carga puntual (Q) y dipolo (P), son expresados en las ecuaciones 3.6 y 3.7 [8].

Cambio brusco de campo eléctrico para el modelo Q (x_i y y_i corresponden con la diferencia entre las coordenadas del lugar de medida y la carga ΔQ):

$$\Delta E_z = \frac{2\Delta Q H}{4\pi\epsilon_0(H^2 + x_i^2 + y_i^2)^{3/2}} \quad (3.6)$$

Cambio brusco de campo eléctrico para el modelo P (Δp es un dipolo dado en unidades de $C \cdot km$, Δp_z es la componente vertical del dipolo):

$$\Delta E_z = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0 R_i^3} \cdot \left[\frac{3H(\overline{\Delta p} \cdot \overline{R_i})}{R_i^2} - \Delta p_z \right] \quad (3.7)$$

Por simplicidad, las descargas a tierra han sido modeladas a través del modelo Q en el cual el cambio de campo ΔE_z es función de cuatro variables; la carga transferida ΔQ y las coordenadas x, y, H del punto de encendido del rayo. Las descargas intranube pueden ser modeladas, de igual forma, a través del modelo Q, en el que aparecen dos cargas ΔQ de igual magnitud y polaridad opuesta, a altura HP y HN , sin embargo, el número de variables se eleva a ocho debido a que deben encontrarse los parámetros de los puntos inicial y final de la descarga. En este caso resulta práctico usar el modelo de momento dipolar P el cual es función de seis variables; x, y, H y de las componentes x, y, z del vector Δp .

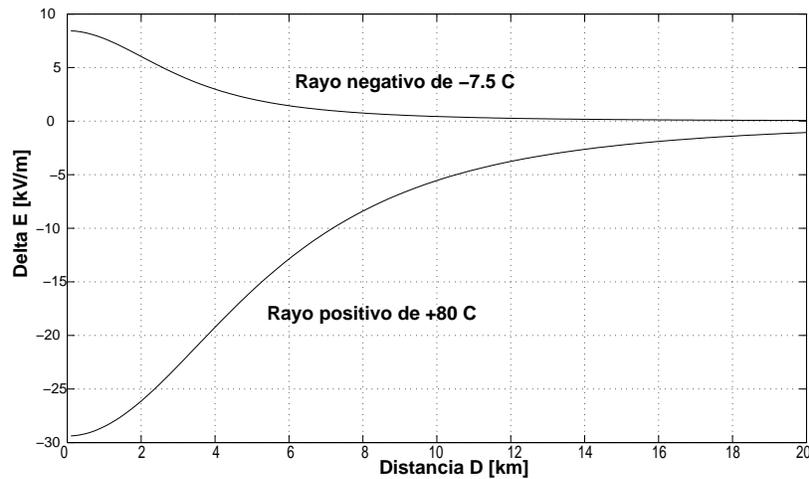


FIGURA 3.3: Cambio de campo eléctrico ΔE_z debido a la ocurrencia de rayos nube-tierra ($HP=7\text{km}$, $HN=4\text{km}$)

De igual forma que para el campo electrostático producido por los centros de carga de la nube de tormenta, puede hallarse un perfil para los ΔE_z producidos por descargas, para la región cercana a la nube de tormenta. La Figura 3.3 muestra la variación del campo eléctrico vertical, ΔE_z debido a descargas negativas y positivas, para una región de 20 km a la redonda del sitio de ocurrencia de la descarga. Para ello se simuló, por medio del modelo Q, una descarga con una carga transferida de -7.5 C en el caso de la descarga negativa y 80 C para el caso de la descarga positiva, suponiendo alturas de encendido de 4 km y 7 km respectivamente. Los anteriores valores corresponden con parámetros de descargas a tierra medidas por Berger [89].

Para el caso de descargas nube-tierra, los ΔE_z producidos por descargas negativas tienen, en todo el espacio, polaridad positiva, debido a la pérdida de carga que experimenta el centro de carga negativo durante el rayo. De forma similar, un rayo a tierra positivo produce un ΔE_z negativo en todo el espacio debido a la reducción del centro de carga positivo durante la descarga (Figura 3.3).

Para el caso de descargas intranube, los ΔE_z son de polaridad positiva en cercanías a la nube de tormenta y presentan un cambio de polaridad alrededor de los 8 km, lo que es

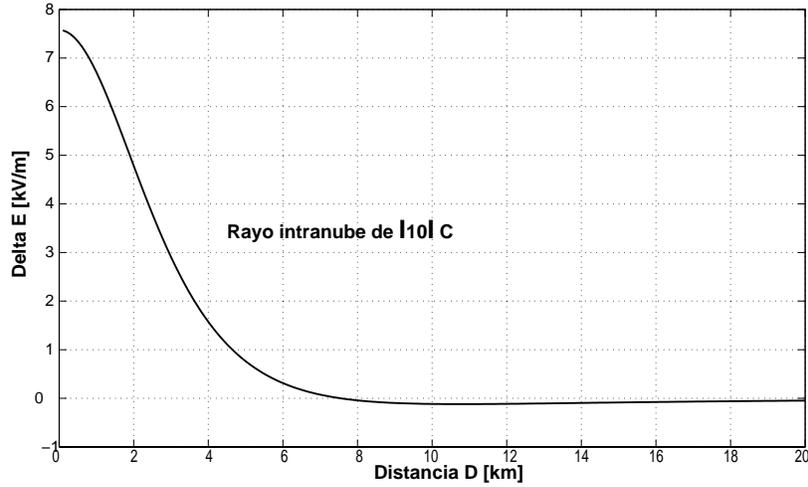


FIGURA 3.4: Cambio de campo eléctrico debido a la ocurrencia de rayos intranube (HP=7km, HN=4km)

ocasionado por la neutralización de carga en los centros de carga positivo y negativo. La figura 3.4 muestra el ΔE_z producido por un rayo intranube con una carga transferida de 10 C.

3.2. Algoritmos de localización de descargas a partir de medidas de campo eléctrico

Como se ilustra en la Figura 3.5, las variaciones de campo eléctrico que son producidas por la descarga en la región cercana a la nube, están asociadas con la carga transferida ΔQ , la altura de inicio de la descarga z y la distancia al punto de medición D [46][8]. Desde 1916, *Wilson* [1] propone el uso de medidas simultáneas de campo electrostático para “detectar y medir” la descarga. Con base en medidas hechas con una única estación, *Wilson* logró por primera vez estimar la altura y la magnitud promedio de una carga puntual equivalente para representar rayos nube-tierra; a partir de allí *Wilson* propone que mediante el uso de múltiples estaciones es posible encontrar además de la altura y la carga, la localización; no obstante *Wilson* no llegó a plantear el método analítico para hallar dichas soluciones.

El primer experimento con múltiples estaciones de medida fue realizado por *Workman et al.* [31] en 1942; en su planteamiento matemático se usó el modelo bipolar con siete incógnitas (la carga y las coordenadas de los dos centros involucrados). Debido a la dificultad para resolver analíticamente siete ecuaciones simultáneas no-lineales, *Workman et al.* usaron un análogo mecánico [4].

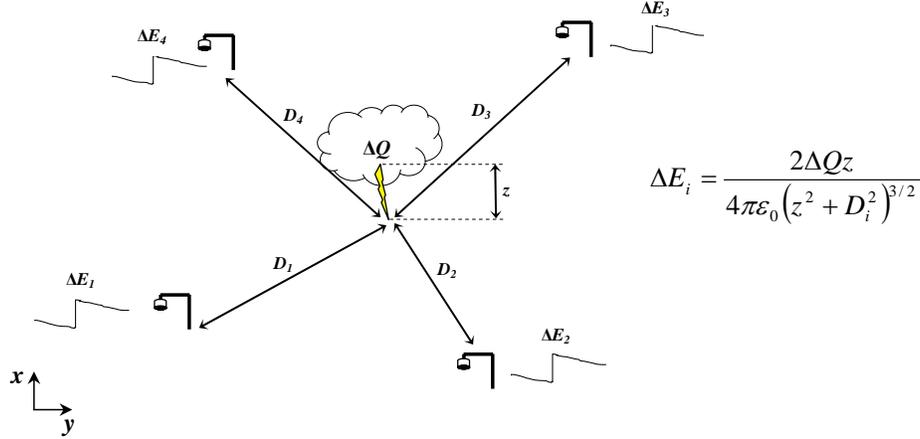


FIGURA 3.5: Localización de descargas eléctricas atmosféricas por medio de redes de molinos de campo.

3.2.1. El método de Reynolds y Neill

En 1952 *Reynolds y Neill* [4] mejoraron tanto el experimento con múltiples estaciones de *Workman et al.*, como la base analítica para la obtención de soluciones de carga; para ello usaron una técnica de ensayo y error basada en cálculos tabulados. La técnica de Reynolds parte de definir inicialmente que la variación de campo eléctrico producida en cualquier punto en un plano infinitamente conductor, cuando un centro de carga es descargado, puede ser expresada como:

$$\Delta E = \frac{2QH}{4\pi\epsilon_0(H^2 + R^2)^{3/2}} \quad (3.8)$$

Donde Q es la magnitud del centro de carga, H su altura y R es la distancia horizontal entre el centro de carga y el punto de evaluación de la variación de campo eléctrico. Con el propósito de simplificar el problema, el factor Q puede ser eliminado estableciendo la relación $\Delta E_1/\Delta E_i$, donde ΔE_1 corresponde con la variación de campo eléctrico más grande medida y ΔE_i corresponde con la variación medida en la estación i . Las tablas de Reynolds proporcionan el valor de la relación:

$$\frac{H}{(H^2 + R^2)^{3/2}} \quad (3.9)$$

El procedimiento para obtener una solución inicia con la definición de una posición de prueba para el centro de carga en algún lugar de la red; posteriormente se toma de las tablas la relación 3.9 para cada uno de los centros de carga (considerando soluciones bipolares); para cada una de las estaciones se encuentra la diferencia entre los valores tabulados para los dos

centros de carga; la diferencia para cada estación debe ser proporcional al cambio de campo eléctrico medido en cada estación con respecto a la posición asumida para los centros de carga. La posición de los centros de carga es ajustada hasta que las relaciones de las diferencias tabuladas sean aproximadamente iguales a las relaciones $\Delta E_1/\Delta E_i$ de los cambios de campo eléctrico medidos.

Una vez se obtiene una solución aceptable, la magnitud de la variación de carga Q es obtenida a partir del cambio de campo eléctrico medido en cualquier estación. De acuerdo con *Reynolds y Neill* [4], en general una solución puede considerarse como aceptable si el error con respecto a la medida real es menor a 0,5 V/cm o es menor al 5%.

3.2.2. El método de Jacobson y Krider

Jacobson y Krider [36] en 1976 y posteriormente *Koshak y Krider* [8] en 1989 propusieron y perfeccionaron un método de localización basado en un procedimiento de mínimos cuadrados no-lineal, el cual proporcionaba los parámetros x, y, z y ΔQ de la descarga a partir de mediciones simultáneas de ΔE .

El método de optimización de mínimos cuadrados no-lineal se basa en minimizar el estadístico chi-cuadrado, el cual mide la desviación entre los valores de campo eléctrico medidos y los valores derivados del modelo. El estadístico chi-cuadrado está dado por la función (eq. 3.10):

$$\chi^2 = \sum \frac{(\Delta E_i - \Delta E_{mi})^2}{\sigma_{Ei}^2} \quad (3.10)$$

Donde ΔE_{mi} es el cambio de campo eléctrico medido en la i -ésima estación, ΔE_i es valor calculado con base al modelo escogido y σ_{Ei}^2 es la varianza en la medición.

La Figura 3.6 muestra los parámetros de descargas eléctricas atmosféricas de tormentas ocurridas en julio de 1978 en la Florida (USA). Los parámetros mostrados fueron obtenidos con base en el algoritmo de localización de mínimos cuadrados no-lineal desarrollado por Jacobson y Krider. Las descargas nube-tierra fueron analizadas por medio del modelo de carga puntual mientras que las descargas intranube fueron analizadas por medio del modelo de dipolo.

La Figura 3.7 muestra la red de molinos de campo instalada en La Florida-USA. El campo electrostático es medido con molinos de campo eléctrico ubicados a lo largo del KSC (Kennedy Space Center) y el CCAFS (Cape Canaveral Air Force Station) con un total de 31 sensores los cuales cubren un área cercana a 1200 km².

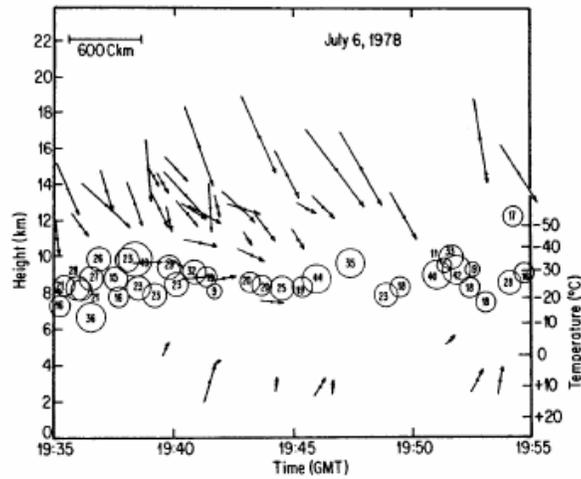
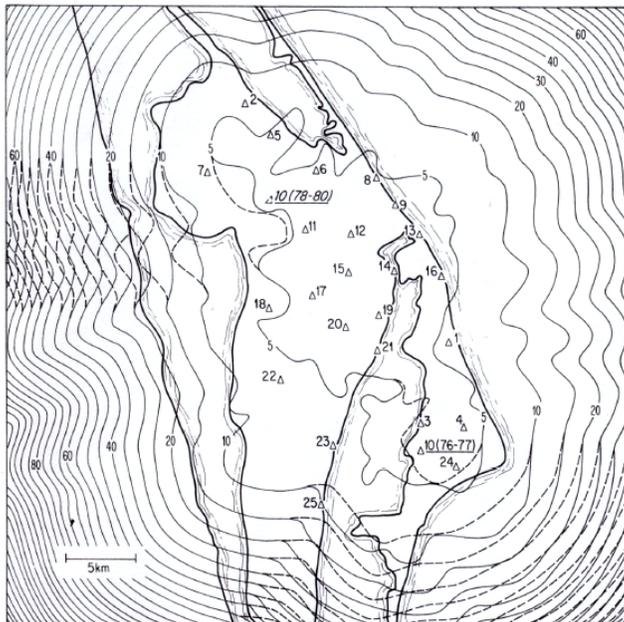


FIGURA 3.6: Parámetros de descargas nube-tierra e intranube ocurridas en la Florida usando los modelos de Carga Puntual y Dipolo Eléctrico. Los valores dentro de los círculos corresponden al valor de ΔQ encontrado. Tomado de [8].



Molino de campo eléctrico

Red de molinos de campo de la Florida

FIGURA 3.7: Red de molinos de campo de La Florida - USA y mínima variación carga eléctrica ΔQ detectable asumiendo el modelo de carga puntual.

Los cambios bruscos de campo eléctrico producidos por las descargas nube-tierra e intranube son detectados por los molinos de campo y son usados para realizar la localización. Con base en el procedimiento propuesto por Koshak y Krider (1989) se encuentran las coordenas

nadas de ocurrencia del rayo, su altura y la carga transferida usando un modelo de carga puntual. Para el caso de las descargas intra-nube se usa el modelo de momento dipolar en el cual se obtiene un punto x, y, z y un momento dado en unidades de $C \cdot km$. La Figura 3.7 muestra la capacidad que tiene la red para la detección descargas nube-tierra ajustadas a modelos de carga puntual.

3.2.3. Método de optimización de mínimos cuadrados no-lineal

Como se describió en los numerales anteriores, el principal método usado para la determinación de parámetros de descargas eléctricas atmosféricas, con base en registros simultáneos de campo eléctrico, es el procedimiento propuesto inicialmente por Jacobson y Krider en 1976 [36]. Este método se fundamenta en la implementación de un procedimiento de optimización de mínimos cuadrados no lineal para minimizar la función (eq. 3.11):

$$\chi^2 = \sum \frac{(\Delta E_{ci} - \Delta E_{mi})^2}{\sigma_{Ei}^2} \quad (3.11)$$

Donde ΔE_{mi} es el cambio de campo eléctrico medido en la i -ésima estación, ΔE_{ci} es valor calculado con base al modelo escogido y σ_{Ei}^2 es la varianza en la medición.

Para minimizar esta función ha sido utilizado un procedimiento iterativo basado en el algoritmo de Marquardt el cual es descrito por Bevington [8]. Esta solución se fundamenta en el tratamiento matricial del Gradiente y Hessiano del modelo escogido para el cálculo de ΔE_i , donde el cálculo de estas matrices se dificulta a medida que el modelo de carga escogido aumenta en complejidad, reduciendo la efectividad del algoritmo de localización.

El algoritmo de solución inicia con el cálculo de los ΔE_{ci} a partir de valores iniciales arbitrarios para los parámetros del modelo seleccionado (carga puntual, bipolar o dipolar). Posteriormente, conociendo las variaciones de campo eléctrico medidos en cada estación, se calcula el valor de la función de error χ^2 . Por medio del uso de la rutina de optimización de mínimos cuadrados no-lineal, los valores de los parámetros del modelo se van ajustando hasta que la función de error χ^2 se reduzca a un valor aceptable. De esta forma se logra que el modelo, evaluado en los parámetros encontrados, reproduzca lo mejor posible las variaciones de campo eléctrico medidas por todas las estaciones.

Los parámetros desconocidos de la descarga conforman el vector a que para el caso del modelo carga puntual se define como muestra la expresión 3.12 con una dimensión $n=4$ para este caso.

$$a = (x, y, H, \Delta Q) \quad (3.12)$$

Donde x, y, H son las coordenadas de la carga puntual y ΔQ es la magnitud de la carga transferida. De esta forma la función χ^2 puede expresarse por medio de la siguiente ecuación

en función del vector a .

$$\chi^2(a) = \sum_{i=1}^{n_{mes}} \frac{(\Delta E_{ci}(a) - \Delta E_{mi})^2}{\sigma_{Ei}^2} \quad (3.13)$$

Donde n_{mes} es el número de sensores. Para el desarrollo del método se hace necesario el cálculo de una serie de factores los cuales se describen brevemente en los siguientes párrafos. Con base en el cálculo del Gradiente y el Hessiano de la función que representa el modelo electrostático usado, se definen los siguientes dos factores que corresponden a los elementos de un vector β de dimensiones $(n \times 1)$ y una matriz α de dimensiones $(n \times n)$.

$$\beta_k = -\frac{1}{2} \frac{\partial \chi^2}{\partial a_k} \quad \alpha_{kl} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \chi^2}{\partial a_k \partial a_l} \quad (3.14)$$

Para $k = 1, 2, \dots, n$ y $l = 1, 2, \dots, n$. La solución de Marquardt se basa en la definición de una matriz α' que es una modificación, por medio de un factor adimensional λ , de la matriz α derivada del Hessiano de la función, la cual está compuesta por los términos que se describen a continuación. Una descripción más profunda del método de Marquardt se encuentra en la referencia [90].

$$\alpha'_{jj} \equiv \alpha_{jj}(1 + \lambda) \quad (3.15)$$

$$\alpha'_{jk} \equiv \alpha_{jk} \quad (j \neq k) \quad (3.16)$$

Finalmente, puede plantearse el siguiente sistema lineal de ecuaciones el cual dará como resultado los incrementos δa que deben ser adicionados a los parámetros del modelo para acercarse de forma iterativa a una solución, reduciendo el valor de la función de error χ^2 .

$$\sum_{l=1}^n \alpha'_{kl} \delta a_l = \beta_k \quad (3.17)$$

A partir de unos valores iniciales para los parámetros del modelo, es decir, a partir de la definición de valores iniciales para el vector a , el procedimiento recomendado para encontrar la solución es el siguiente:

1. Calcular $\chi^2(a)$ (ecuación 3.13)
2. Seleccionar un valor para λ (recomendado $\lambda = 0,001$)
3. Calcular los diferentes factores (ecuaciones 3.14, 3.15 y 3.16).
4. Resolver el sistema lineal dado por la expresión 3.17 para δa y evaluar $\chi^2(a + \delta a)$

5. Si $\chi^2(a + \delta a) \geq \chi^2(a)$, incrementar λ por un factor de 10 y volver al paso 4.
6. Si $\chi^2(a + \delta a) < \chi^2(a)$, reducir λ por un factor de 10, sustituir el valor de a por $a + \delta a$ y volver al paso 4.

El criterio de convergencia para el anterior procedimiento consiste en el establecimiento de un valor de χ^2 aceptable dado por el usuario.

En el capítulo 5, en el que se desarrolla una distribución patrón para la calibración de sensores de campo electrostático, en el apartado 5.4 se presenta la implementación del método anteriormente descrito con el propósito de identificar los eventos (rayos nube-tierra) que mejor se ajustan al modelo de carga puntual o bipolar. Dicha identificación permite realizar un filtrado para eliminar casos con distribuciones de carga complejas.

Sistemas de medida

En la presente tesis se realizan análisis a partir de la información obtenida de los sistemas de medida que se listan a continuación; varios de ellos eran sistemas ya existentes, no obstante en el caso de las redes de molinos de campo en Colombia y España las redes fueron instaladas durante el desarrollo de este trabajo; en el caso particular de los molinos de campo en Colombia, el trabajo experimental empezó desde el mismo desarrollo de los instrumentos de medida.

- 31 molinos de campo en el área que comprenden el *Kennedy Space Center* y el *Cape Canaveral Air Force Station* - KSC/CCAFS, en Florida, EE.UU.
- El *Cloud to Ground Lightning Surveillance System* - CGLSS en KSC/CCAFS.
- El sistema de VHF *Lightning Detection And Ranging* - LDAR en KSC/CCAFS.
- 11 molinos de campo en la comunidad autónoma de Navarra en España.
- La red europea de localización de rayos *Lightning NETwork* - LINET.
- 1 molino de campo en Bogotá, Colombia.
- El Sistema de Información de Descargas - SID, que opera en territorio colombiano.

Los molinos de campo instalados en Colombia son el resultado de un trabajo continuo realizado desde el año 2004 en el cual se diseñaron y perfeccionaron los componentes eléctricos y mecánicos así como los elementos electrónicos relacionados con la adecuación de señales, la

adquisición y transmisión de datos, la sincronización en tiempo y la visualización.

4.1. Molinos de campo eléctrico

4.1.1. Generalidades

Entre 1905 y 1908 *Wilson* [91] desarrolló y perfeccionó los primeros prototipos de instrumentos de medida del campo electrostático del ambiente. El método en general consistía en “mantener un conductor aislado a potencial cero por medio de un *compensador* cuyas lecturas miden la carga que debe ser dada al conductor para mantener su potencial en cero”, en tres estados: a. cuando el conductor es expuesto por primera vez al campo eléctrico de la tierra removiendo una cubierta puesta a tierra, b. mientras se mantiene expuesto y c. cuando es cubierto nuevamente.

La Figura 2.1a. muestra los componentes básicos del instrumento usado por *Wilson*. Este instrumento era diseñado para medir dos magnitudes diferentes: el gradiente de potencial en el ambiente y la corriente fluyendo de la tierra al aire. El instrumento de medida indicado en la Figura 2.1a. como M era un electrómetro capilar: tubo de vidrio con dos secciones de mercurio separadas por una película de ácido sulfúrico, en el cual el desplazamiento de la frontera entre las dos secciones de mercurio es una medida de la cantidad de carga que atraviesa el electrómetro [91, 1].

Mientras la placa de medida se mantiene descubierta, la tasa de cambio de la lectura del electrómetro es una medida de la corriente fluyendo de la placa hacia la atmósfera por conducción, convección o corriente de desplazamiento producida por variaciones en el campo eléctrico del ambiente. Si la cubierta es removida, la carga en la superficie de la placa de medida retorna a tierra a través del electrómetro y el cambio en la lectura del electrómetro es una medida del gradiente de potencial presente.

Como fue descrito en el Capítulo 2, las primeras medidas del campo electrostático producido por tormentas eléctricas fueron realizadas por *Wilson* entre 1914 y 1917 (publicadas en 1916 y 1920 [1, 2]) usando diferentes electrodos de medida como el *test-plate* y la esfera elevada. Sin embargo los equipos de medida usados en estos trabajos y en las investigaciones subsecuentes de *Schonland* [28, 29, 30] (1927-1928), *Wormell* [3] (1939) y otros, difieren en la operación de los molinos de campo actuales en el sentido de que no usaban un ciclo continuo de apantallamiento de la superficie de medida y basaban su operación en instrumentos muy sensibles como el electrómetro capilar.

Uno de los primeros diseños conocidos de molinos de campo como tal es presentado por *Malan y Schonland* [9] en 1950. El dispositivo fue denominado fluxómetro electrostático y su descripción fue: “El fluxómetro consiste en un sistema conductor de baja capacidad el cual es alternadamente expuesto y apantallado del campo eléctrico por el movimiento rápido de una pantalla rotativa metálica”. El principio de medida del fluxómetro se basó en los desarrollos

previos de *Gunn* en 1932 [92]. Como principales ventajas del fluxómetro con respecto a los instrumentos previos se encuentran:

- Mayor sensibilidad y un tiempo de respuesta más corto.
- Más apropiado para medir campos eléctricos intensos de larga duración.
- Capacidad para medir características del los cambios de campo eléctrico que no eran detectables por el electrómetro capilar de *Wilson*.

La Figura 4.1a muestra esquemáticamente los componentes del fluxómetro electrostático, en donde A es la superficie de apantallamiento y B son los electrodos de medida. Usando 18 electrodos de medida y un motor eléctrico para girar el conductor de apantallamiento a alta velocidad se logro alcanzar una frecuencia de exposición de hasta 1200 ciclos por segundo lo que le dio al instrumento su alta velocidad de respuesta.

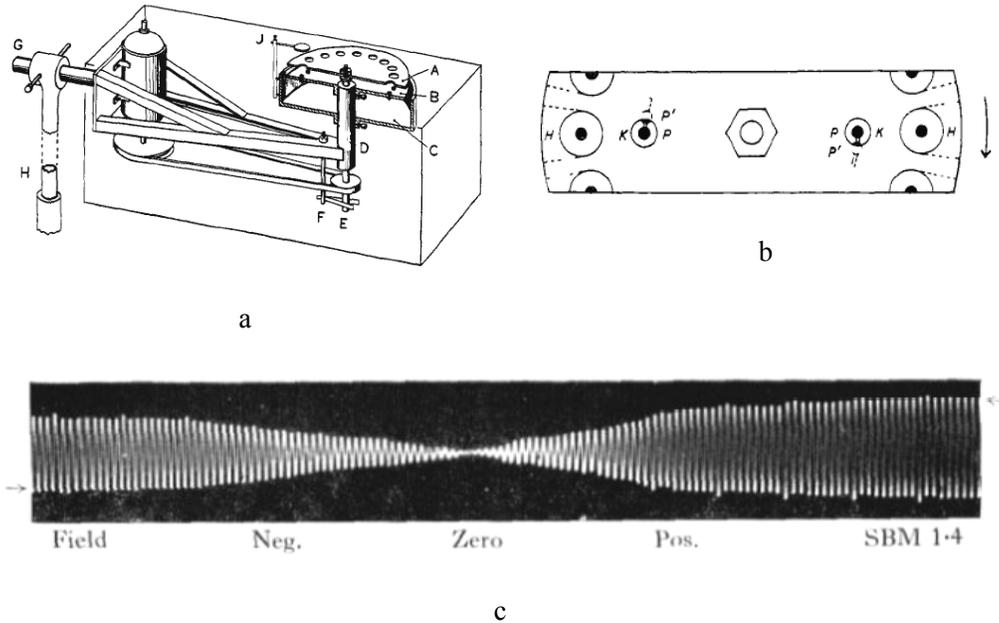


FIGURA 4.1: Fluxómetro electrostático desarrollado por *Malan y Schonland* (1950)[9]. a) Componentes del equipo. b) Arreglo para la detección de la polaridad del campo eléctrico incidente. c) Señal generada.

El problema de la medida de la polaridad del campo eléctrico incidente fue resuelto mediante el uso de un arreglo que automáticamente incrementaba la altura del valor pico del semiciclo positivo cada nueve ciclos si el campo era positivo o del semiciclo negativo cada nueve ciclos si el campo era negativo [9]; dicho dispositivo es ilustrado en la Figura 4.1b. y se basa en el uso de un electrodo de medida adicional y un agujero de inducción adicional en el conductor de apantallamiento. La Figura 4.1c. muestra las señales producidas por el

instrumento cuando incide un campo eléctrico de polaridad negativa (parte izquierda de la gráfica) y polaridad positiva (parte derecha de la gráfica).

La siguiente sección describe las características generales de los molinos de campo actuales. Algunas de las principales referencias relacionadas con el diseño de molinos de campo son: [93, 94, 95, 96].

4.1.2. Principios de funcionamiento de los molinos de campo

Para la medida del campo eléctrico constante del ambiente comúnmente se han usado elementos móviles, tanto al nivel del suelo para medir de la componente vertical E_z como en altura para la medida de todas las componentes de $E_{x,y,z}$; la Figura 4.2 describe uno de los montajes típicamente usados para medir E_z . Mediante el giro de una pantalla móvil conectada a tierra, sobre los electrodos de medida se induce una carga eléctrica proporcional al campo eléctrico incidente. A través del uso de un amplificador operacional en configuración de *amplificador sensible a la carga*, que es una configuración sencilla dada por un circuito RC en el lazo de realimentación, se obtiene una señal de tensión que es proporcional al campo eléctrico incidente. Suelen encontrarse diseños con un único electrodo de medida en los cuales se mide la señal de tensión del electrodo con respecto a tierra o diseños con varios electrodos en los que la medida se hace en forma diferencial entre los electrodos cubiertos y descubiertos por la pantalla móvil. Con la configuración del circuito de medida ilustrada en la Figura 4.2b se obtiene la relación de la ecuación 4.1 para el amplificador.

$$\vec{E} \propto Q = -\frac{V_0}{C} \quad (4.1)$$

En la anterior expresión \vec{E} es el campo eléctrico incidente, Q es la carga inducida, V_0 es la señal de salida del amplificador y C es la capacitancia en el lazo de realimentación.

El molino de campo eléctrico es un condensador con área y capacidad variable. En ese condensador se cumple la ley de Gauss dada por la expresión 4.2, donde ρ_s es la densidad superficial de carga, Q la carga total, A el área, ϵ_0 la permitividad del medio y \vec{E} el campo eléctrico.

$$\rho_s = \frac{Q}{A} = \vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (4.2)$$

Organizando la ecuación 4.2 se obtiene una expresión para la carga total del condensador dada en función del área y del campo eléctrico. Al contarse con un área variable periódica se obtiene igualmente una carga eléctrica variable en el tiempo (ecuación 4.3).

$$Q(t) = \epsilon_0 \vec{E} A(t) \quad (4.3)$$

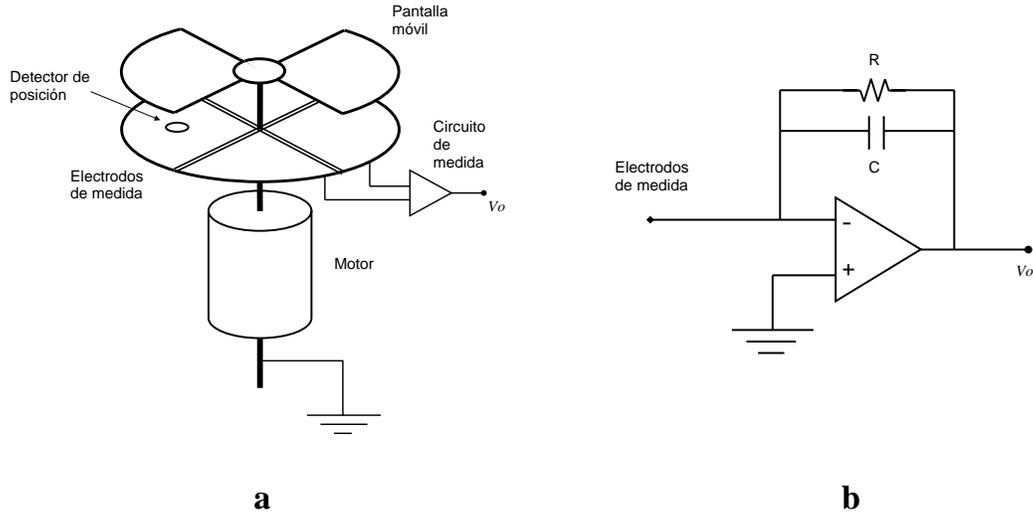


FIGURA 4.2: Esquema general del molino de campo eléctrico típico. a) Ilustración de los componentes mecánicos. b) Amplificador sensible a la carga. El amplificador puede encontrarse con la entrada no inversora conectada a tierra cuando se trata de un único electrodo de medida o midiendo en forma diferencial cuando se trata de dos electrodos de medida.

De la expresión anterior puede derivarse una relación para la corriente que circularía por el condensador (ecuación 4.4). Reemplazando 4.3 en 4.4 se obtiene que el valor de la corriente es proporcional a la magnitud del campo eléctrico \vec{E} y la variación en el tiempo del área $dA(t)/dt$.

$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \quad (4.4)$$

$$i(t) = \frac{d}{dt}(\epsilon_0 \vec{E} A(t)) = \epsilon_0 \vec{E} \frac{dA(t)}{dt} \quad (4.5)$$

La anterior expresión indica que la relación entre el campo eléctrico que incide en el sensor y la amplitud de la señal medida es controlada principalmente por el patrón de variación del área expuesta al campo eléctrico.

El dispositivo ilustrado en la Figura 4.2 genera una señal de tensión sinusoidal donde la amplitud es proporcional a la magnitud del campo eléctrico. La frecuencia f de la señal generada está dada por la expresión 4.6 donde ω es la velocidad de giro de la pantalla móvil dada en *radianes/s* y n es la cantidad de aspas de la pantalla móvil o el número de secciones del electrodo de medida.

$$f = \frac{\omega}{2\pi}n \quad (4.6)$$

Debido a que el campo eléctrico incidente solo afecta la amplitud de la señal generada que es periódica, no es posible conocer cuando el campo eléctrico que incide es de polaridad negativa o positiva. En la mayoría de los diseños para la detección de polaridad se han incluido detectores de posición o *detectores de fase* los cuales indican mediante una señal cuadrada cuando las aspas de la pantalla móvil cruzan sobre el electrodo de medida o sobre las diferentes secciones en el caso de que no se trate de un único electrodo. La Figura 4.3 muestra las diferencias entre las formas de onda obtenidas cuando incide un campo eléctrico de polaridad negativa o positiva para uno de los montajes típicos.

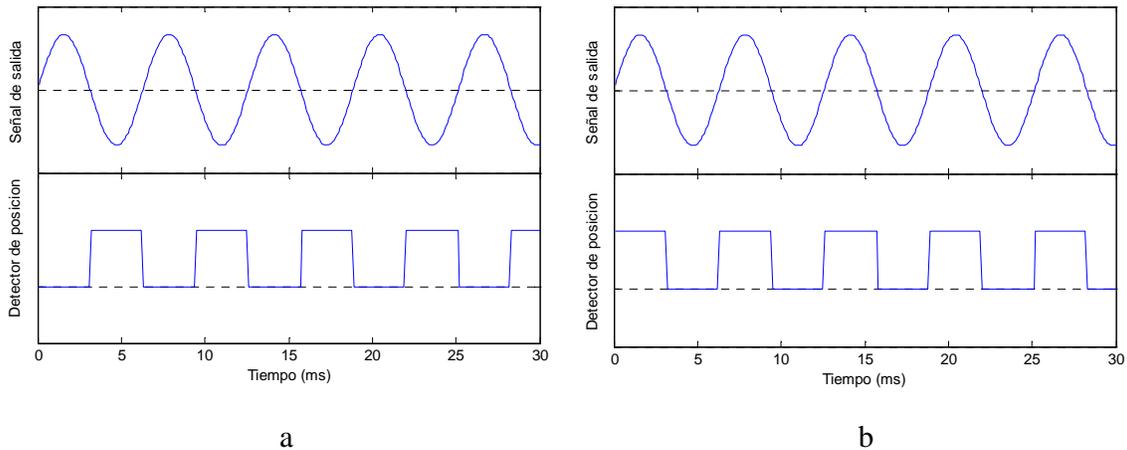


FIGURA 4.3: Formas de onda de la señal de salida y señal producida por el detector de posición. a) Señales para campo eléctrico de polaridad positiva. b) Señales para campo eléctrico de polaridad negativa.

Nótese que para el caso de campo eléctrico de polaridad positiva las dos señales se encuentran en contrafase, mientras que para la polaridad negativa se encuentran en fase. La anterior característica depende del tipo y la ubicación del detector de posición; en este caso la señal generada por el detector es cero cuando el electrodo de detección se encuentra expuesto y toma el valor alto cuando se encuentra cubierto.

Mediante el uso de un circuito deconmutador la señal de referencia dada por el detector de posición permite rectificar las señal de salida del amplificador en el semiciclo coincidente con la polaridad de \vec{E} . Finalmente en la mayoría de los diseños se obtiene una señal de salida d.c. con la polaridad de \vec{E} y con una amplitud proporcional a \vec{E} .

4.1.3. Sensor diseñado

Como se describió anteriormente, el molino de campo usa el principio de inducción de carga superficial. La carga eléctrica es inducida sobre un electrodo que periódicamente es cubierto y expuesto al campo eléctrico por medio de diferentes mecanismos. En el caso del molino de campo desarrollado, el mecanismo usado es una hélice de apantallamiento que mediante su giro cubre y descubre la superficie captadora; algunos diseños tomados como referencia son los mostrados en [97, 98, 99].

El mecanismo del sensor, mostrado en la Figura 4.4, se conforma de tres partes: una superficie captadora, una superficie apantalladora fija y una superficie apantalladora móvil. El diseño realizado tiene un único electrodo de medida. Los espacios en la pantalla fija son denominados *ventanas de inducción*. La Figura 4.4 muestra en tres pasos el movimiento de la pantalla móvil. La inducción de carga en la superficie captadora está dada por la expresión 4.7 donde ρ_s es la densidad de carga superficial inducida en la superficie conductora, Q es la carga total inducida, A es el área de la superficie expuesta, ϵ_0 es la permitividad dieléctrica del aire y E es el campo eléctrico incidente normal a la placa de captación.

$$\rho_s = \frac{Q(t)}{A(t)} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (4.7)$$

La variación de área teórica producida por el mecanismo ilustrado en la Figura 4.4 es de forma triangular. El área expuesta varía en forma lineal con la variación del ángulo durante el giro de la hélice. Sin embargo, debido a los efectos del apantallamiento indirecto producido por los bordes de los elementos mecánicos, la variación del área se ajusta más a una forma senoidal. La Figura 4.5 muestra la variación de área producida por el giro de una hélice de 5.5 cm de radio con un esquema de 8 ventanas de inducción.

La capacitancia del sensor está definida por una componente constante de 18 pF dada entre el electrodo de medida y los componentes fijos conectados a tierra y una componente variable producida por el movimiento de la hélice de apantallamiento. El valor máximo de capacitancia es 25 pF que se obtiene cuando el área expuesta es cero.

$$C_{sensor} = C_{fija} + C_{variable} \quad (4.8)$$

En el sensor se cumple la relación 4.9 propia de los condensadores. A partir de los cambios simultáneos de área de exposición y capacitancia debidos al funcionamiento de las partes móviles se obtiene una señal periódica. Reemplazando 4.3 en 4.9 se obtiene la expresión 4.10 para la señal generada. La resultante es una señal asimétrica como la mostrada en la Figura 4.6. Los semiciclos con mayor amplitud coinciden con el momento de apertura máxima de las ventanas de inducción.

$$V_o(t) = \frac{Q(t)}{C(t)} \quad (4.9)$$

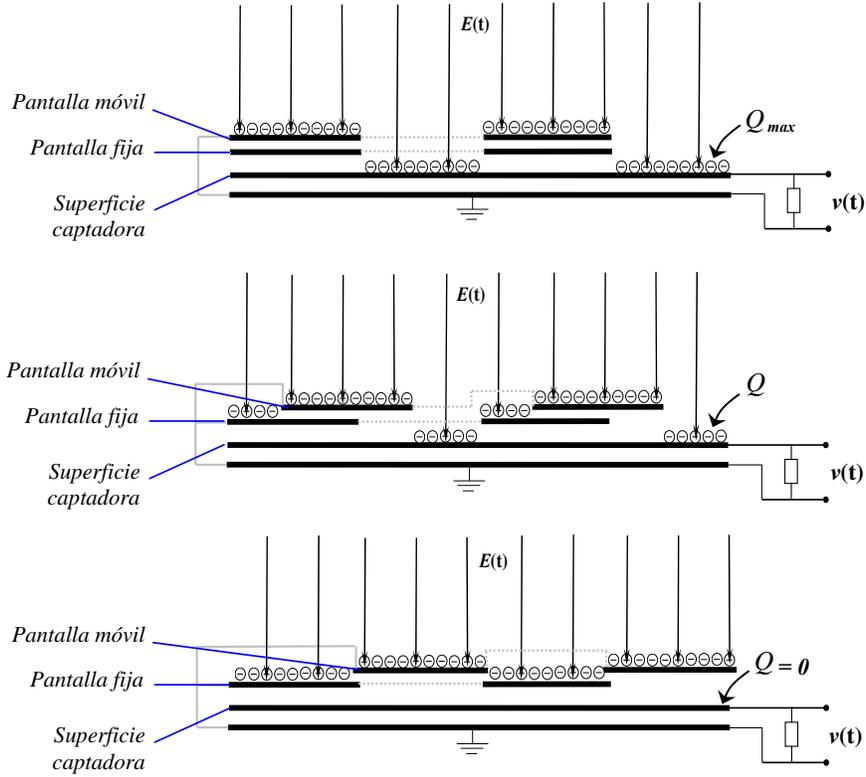


FIGURA 4.4: Funcionamiento de los componentes fijos y móviles del molino de campo

$$V_o(t) = \frac{\epsilon_0 \vec{E} A(t)}{C(t)} \quad (4.10)$$

El sensor diseñado tiene una superficie de captación circular de 5.5 cm de radio aislada de una superficie de referencia conectada a tierra por un material dieléctrico con una permitividad relativa ϵ_r de 4. La separación entre el electrodo y la superficie de referencia es de 3 mm. La pantalla móvil es conformada por una hélice de ocho aspas separada 3 mm del electrodo de captación. La pantalla fija tiene ocho ventanas de inducción y se encuentra separada 6 mm del electrodo de medida. Con la configuración descrita se obtienen las señales de salida mostradas en la Figura 4.6; las señales corresponden a un campo eléctrico de +100 y -100 V/m respectivamente.

A diferencia del molino de campo típico, el sensor desarrollado entrega una señal asimétrica que además de indicar la amplitud del campo eléctrico incidente, también indica su polaridad. La anterior característica permite suprimir el detector de posición que comúnmente es requerido en la mayoría de los diseños. La Figura 4.7 muestra la construcción final del sensor con ocho ventanas de inducción, también se muestra la señal generada. Nótese la similitud en cuanto a forma de onda entre la señal teórica (Figura 4.6) y la señal obtenida experimen-

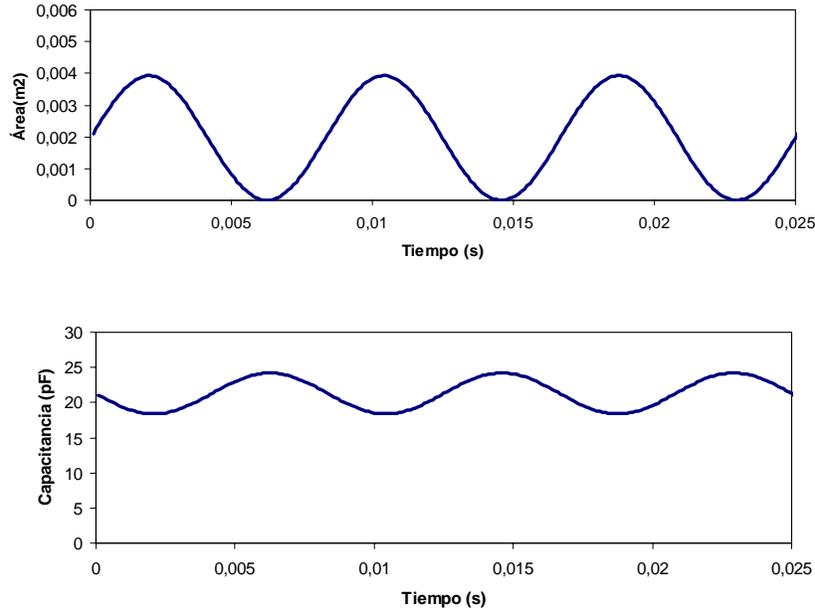


FIGURA 4.5: Variaciones periódicas de área y capacitancia producidas por los componentes mecánicos del molino de campo

talmente (Figura 4.7).

Con base en las características particulares de la señal asimétrica entregada por el sensor se pueden obtener tanto la amplitud como la polaridad del campo eléctrico mediante las siguientes expresiones. La amplitud pico a pico de la señal de salida V_{p-p} esta dada por:

$$V_{p-p} = \epsilon_0 \frac{A_{max}}{C_{min}} \cdot E \quad (4.11)$$

En la anterior expresión pueden reemplazarse los valores de $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} F/m$, $A_{max} = 3,93 \times 10^{-3} m^2$ y $C_{min} = 18,39 \times 10^{-12} F$, para obtener la relación de medida teórica del diseño realizado (ecuación 4.12).

$$V_{p-p}[V] = 0,00189 \cdot E [Vm^{-1}] \quad (4.12)$$

La detección de polaridad se puede realizar usando la siguiente relación, mediante la comparación entre las amplitudes de los semiciclos positivo y negativo de la señal.

$$polaridad(E) = polaridad(Max[|V_{max}|, |V_{min}|]) \quad (4.13)$$

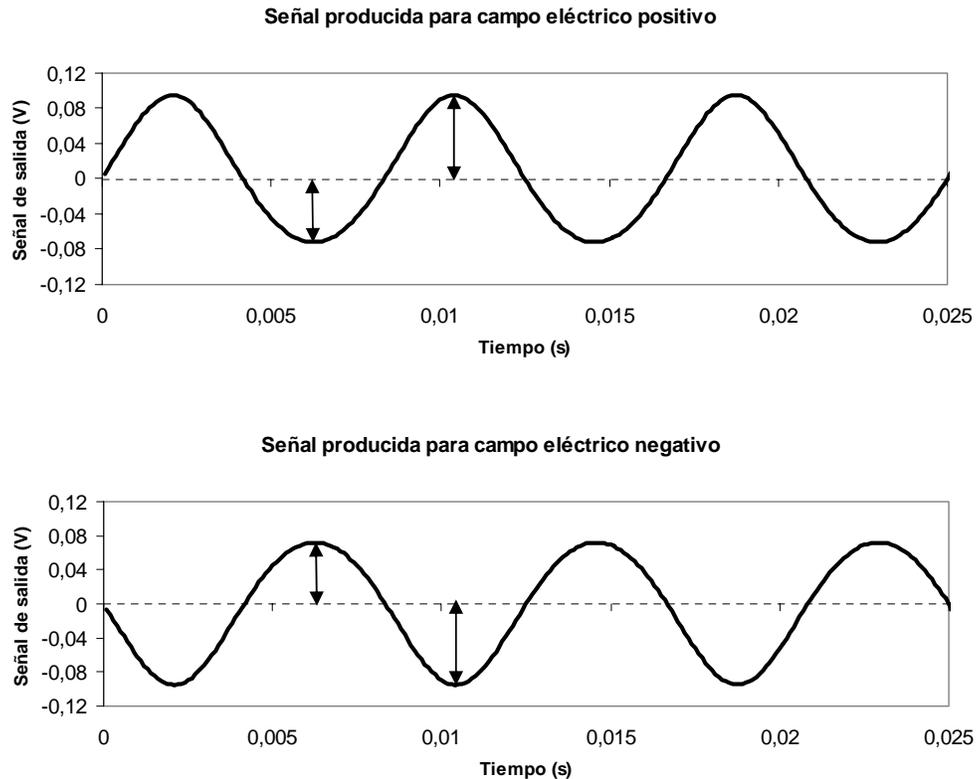


FIGURA 4.6: Señal de salida del molino de campo para campo eléctrico de polaridad positiva y negativa. La asimetría de la señal es definida por la polaridad del campo eléctrico incidente.

En general el sensor desarrollado presenta las siguientes mejoras en comparación con el molino de campo típico:

- No se requiere el uso del detector de polaridad, ni sus componentes electrónicos asociados, los cuales generalmente introducen complejidad al tener que ser instalados entre las partes móviles del equipo.
- No es necesaria la fase de electrónica análoga para la deconmutación de la señal que comúnmente es usada en la detección de la polaridad.
- No se utiliza la fase electrónica de rectificación de la señal ya que el tratamiento de la señal asimétrica se hace a través de software.
- Los componentes electrónicos del equipo se conforman por un amplificador operacional de alta impedancia de entrada y una configuración de amplificación. En el molino de

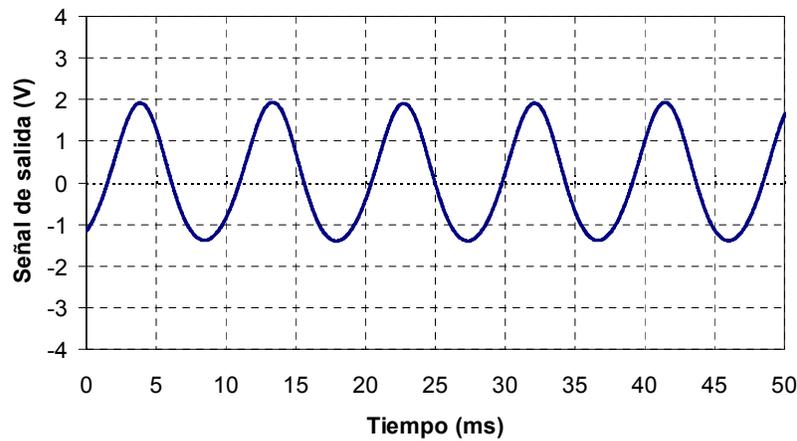


FIGURA 4.7: Molino de campo diseñado y señal de salida producida por la incidencia de un campo eléctrico de polaridad positiva.

campo típico se requiere amplificador de carga, deconmutador, detector de polaridad, rectificador y filtro análogo, entre otros. Al eliminarse varios de los componentes electrónicos se reduce la cantidad de fuentes de interferencia electromagnética.

Las desventajas del equipo son principalmente:

- Para obtener la señal asimétrica se requieren distancias pequeñas entre las partes estáticas y móviles lo que aumenta el riesgo de contacto.
- Para el tratamiento digital de la señal asimétrica se requiere un mecanismo de adquisición de datos con una tasa de muestreo mayor a la que se requiere para la digitalización de la señal d.c. comúnmente producida por el molino de campo eléctrico típico.

4.1.3.1. Filtrado

La señal asimétrica producida por el molino de campo puede ser alterada por distorsiones de 60 ciclos provenientes de las fuentes de alimentación o sistemas de alta tensión cercanos

al lugar de instalación; también suelen presentarse ruidos de alta frecuencia provenientes del ambiente. Adicionalmente las imperfecciones mecánicas o el deterioro producido por la operación de los componentes móviles introducen perturbaciones. La Figura 4.8 muestra la señal de salida producida por un molino de campo que presentó distorsiones después de un tiempo prolongado de operación.

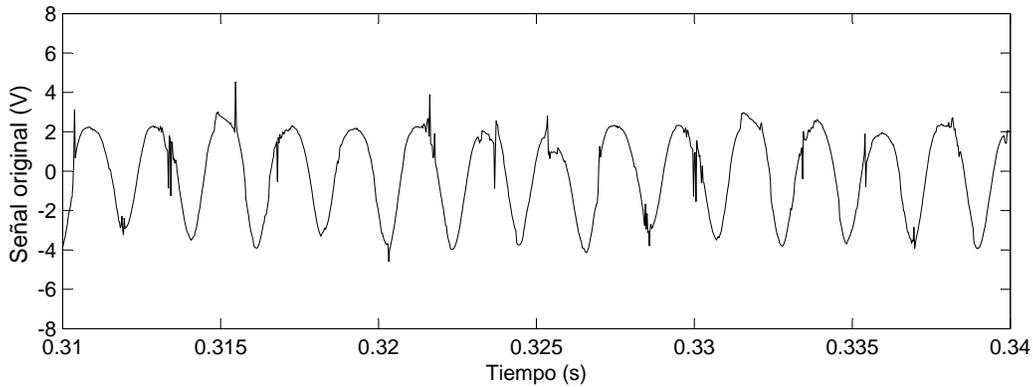


FIGURA 4.8: Señal asimétrica afectada por ruidos de frecuencia industrial y defectos mecánicos

Debido a la poca distancia de separación entre los componentes fijos y móviles, la hélice puede rozar con facilidad la pantalla estática o en el peor de los casos el electrodo de medida; lo anterior se ocasiona generalmente por desajustes que pueden aparecer durante la operación del sensor o por una manipulación no adecuada. Los defectos mecánicos pueden distinguirse fácilmente por su aparición periódica en forma coincidente con el ciclo de giro de la pantalla móvil. Debido a que el sensor tiene ocho ventanas de inducción, los defectos mecánicos se detectan en la señal asimétrica cada ocho ciclos o en múltiplos de éste valor. En la señal de la Figura 4.8 puede verse una de estas perturbaciones en el segundo y décimo ciclo.

Las distorsiones de 60 ciclos se ven reflejadas en la señal asimétrica produciendo variaciones periódicas en la amplitud de la señal cuando ésta debería ser constante. Dichas perturbaciones aparecen como una modulación en amplitud de la señal. En este caso la modulación en amplitud no es tan notoria debido a que la frecuencia de la señal y la perturbación son muy cercanas, sin embargo sí se evidencian variaciones grandes de amplitud de un ciclo a otro.

La aparición de las distorsiones mostradas en la Figura 4.8 afecta en gran medida el cálculo de la amplitud y polaridad del campo eléctrico por lo que se hace necesario incluir un método de filtrado para eliminar las distorsiones que puedan aparecer a causa de fuentes de interferencia en el sitio de instalación del sensor o por sus defectos mecánicos.

El desarrollo de la etapa de filtrado parte de establecer el comportamiento en frecuencia que presenta la señal entregada por el molino de campo. La señal asimétrica tiene el espectro

en frecuencia mostrado en la Figura 4.9; la señal está representada principalmente por la componente fundamental y un segundo armónico que es el responsable de generar la diferencia de amplitudes entre los dos semiciclos. El espectro mostrado corresponde a un molino de campo con una frecuencia fundamental de 133 Hz.

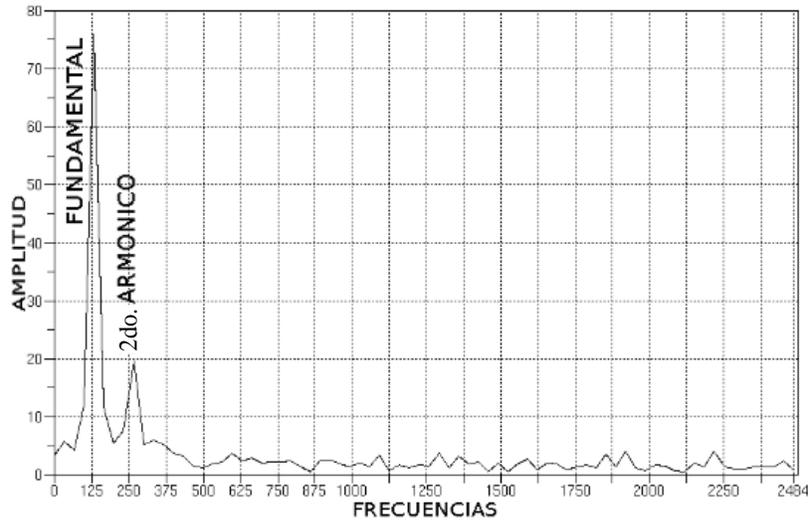


FIGURA 4.9: Comportamiento en frecuencia de la señal asimétrica sin distorsión.

Dado lo anterior es posible representar la señal asimétrica generada por el sensor mediante la expresión 4.14, donde ft es la frecuencia fundamental.

$$V(t) = k_1 \cdot \text{sen}(2\pi ft) + k_2 \cdot \text{cos}(4\pi ft) \quad (4.14)$$

Puede concluirse por tanto, que conociendo la frecuencia fundamental a la cual se encuentra operando el molino de campo y midiendo su amplitud, es posible reconstruir la señal original antes de ser afectada por distorsiones.

El problema de filtrado puede resolverse mediante el uso de un filtro digital basado en una función de ventana la cual permite dar valores cercanos a cero a las componentes de frecuencia que se encuentran por fuera de un intervalo definido. Los tipos de ventanas más comunes para aplicaciones en las que se desea considerar anchos de banda angostos son Hamming y Hann [100].

Para ésta aplicación se implementó un filtro digital por ventana tipo Hamming, debido a que presenta una atenuación de las componentes cercanas 15 veces mayor a la del filtro tipo Hann. La anterior característica permite eliminar la componente industrial (50 o 60 ciclos),

la cual es cercana a la frecuencia fundamental del sensor.

La Figura 4.10 muestra la señal medida por el sensor con perturbaciones y la señal obtenida después de utilizar el filtro digital con la ventana tipo Hamming. Como puede apreciarse, tanto la componentes de alta frecuencia relacionadas con problemas mecánicos y fuentes de ruidos cercanas, como las componentes de 60 ciclos desaparecen de la señal.

El filtro tipo Hamming fue programado e implementado en el dispositivo de digitalización, de modo tal que el cálculo de la amplitud y polaridad del campo eléctrico incidente se realiza sobre la señal filtrada.

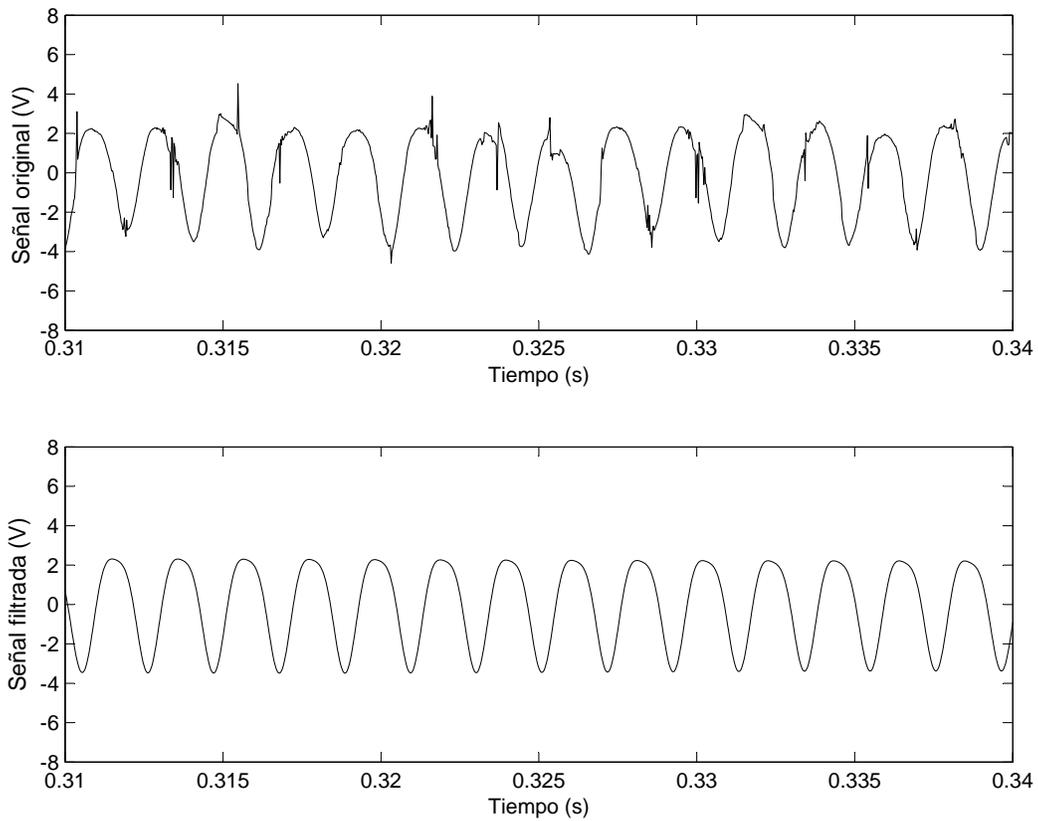


FIGURA 4.10: Señal original y señal filtrada. En la señal original se incluyen ruidos producidos por fallas mecánicas y ruido de 60 ciclos.

4.1.3.2. Calibración

Durante el desarrollo del instrumento de medida se realizaron diferentes ensayos de calibración con el propósito de establecer la relación de medida y la linealidad. Un primer montaje de prueba se realizó en el Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales - LABE de la Universidad Nacional de Colombia. A continuación se describe el ensayo realizado.

Para la realización de la calibración se usó un arreglo de dos placas paralelas metálicas de $2 \times 2 \text{ m}^2$, las cuales fueron dispuestas como muestra la Figura 4.11 con una separación de 0.575 m . Con el propósito de generar un campo eléctrico con polaridad y amplitud conocidas, las placas fueron energizadas mediante un módulo generador de alta tensión DC marca Hae-fely el cual puede producir tensiones hasta de 100 kV en las dos polaridades; adicionalmente, el valor de tensión entre las dos placas fue medido mediante un divisor resistivo el cual tiene una relación de $9903/1$. La tensión mínima que puede producir el generador es del orden de 3.5 kV , lo que representa que para la distancia de separación en la que se instalaron las placas el valor mínimo de campo eléctrico que se puede producir es del orden de 6 kV/m .

El molino de campo fue ubicado a través de un orificio circular localizado en el centro de la placa inferior con las ventanas de inducción orientadas hacia la placa superior y ubicadas a la misma altura de la placa inferior para evitar que la presencia del molino de campo distorsionara el campo eléctrico dentro de las placas (Figura 4.11). La tierra del molino de campo se conectó directamente a la placa inferior la cual se encontraba conectada fijamente a la tierra del generador.

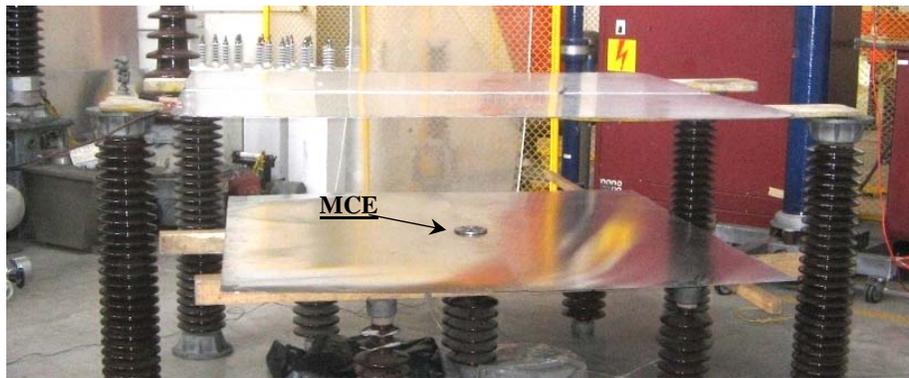


FIGURA 4.11: Montaje de calibración del molino de campo

La tensión entregada por el generador fue variada entre 0 y 11.5 kV en las dos polaridades, para obtener un campo eléctrico homogéneo entre las placas de 0 a 20 kV/m también en las dos polaridades. A medida que se variaba el valor de campo eléctrico generado dentro de las placas se tomaban medidas de la amplitud de la señal generada por el molino de campo. La Figura 4.12 muestra la relación entre el campo eléctrico incidente y la señal de tensión de salida para el molino de campo. Como se puede observar en la Figura 4.12, el molino de

campo presenta un comportamiento lineal.

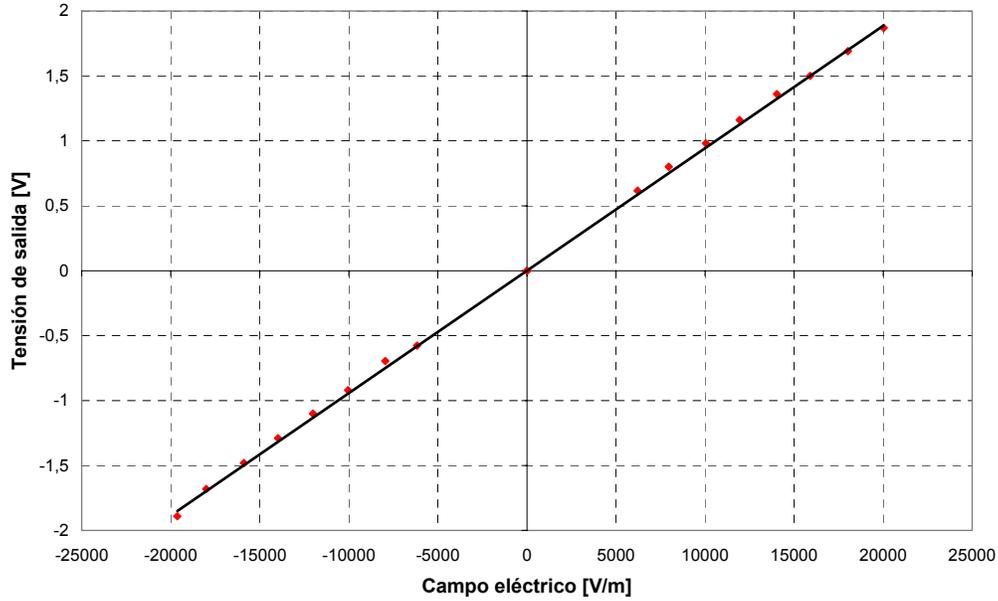


FIGURA 4.12: Relación campo eléctrico aplicado vs tensión de salida para el molino de campo prototipo

Para la realización de pruebas de calibración en sitio se diseñó un montaje a escala de la experiencia obtenida en el laboratorio; para ello se construyó un arreglo a escala de placas paralelas con una distancia de separación variable entre 1 y 3 cm. Las placas paralelas fueron adecuadas para ser instaladas sobre las ventanas de inducción del molino de campo según como se muestra en la Figura 4.13.

Para generar un campo eléctrico de valor conocido, las placas fueron energizadas mediante un generador portátil de alta tensión DC con un rango variable entre 0 y 2000 V. Para éste caso, tanto la distancia de separación entre las placas, como el valor mínimo de tensión proporcionada por el generador fueron ajustados para obtener un valor mínimo de campo eléctrico de 1000 V/m. La polaridad del campo eléctrico podía cambiarse simplemente intercambiando las salidas del generador gracias a que éste funciona con baterías y puede usarse sin referencias de tierra.

Dado que el sensor se encuentra ubicado sobre un edificio de 5 pisos, el campo eléctrico es amplificado; Aranguren [101] en 2006 estimó, mediante simulaciones de elementos finitos, el efecto de amplificación debido a la estructura y a la instalación; el resultado obtenido fue una amplificación de 9,47 veces.

Para contrarrestar el efecto de amplificación, en la electrónica de adecuación de señal del sensor se implementó un circuito con una constante de atenuación de 10. La Figura 4.13 per-

mite observar el resultado de la calibración en sitio, en la que además de verificar la linealidad en la respuesta del sensor, se puede verificar la constante de medida. Para éste caso se obtiene que la señal media es 0,096 la señal aplicada.

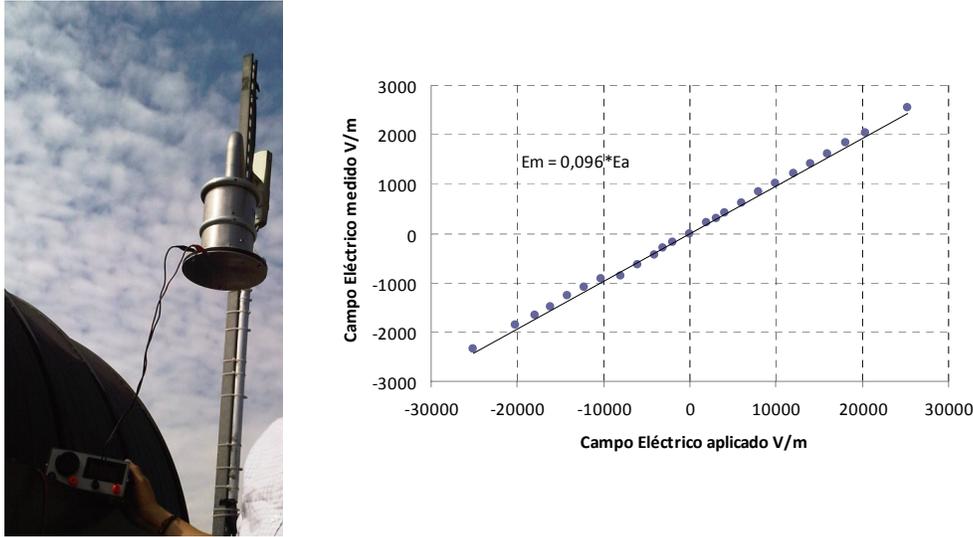


FIGURA 4.13: Prueba de calibración realizada en sitio.

4.1.3.3. Componentes del sistema de medida

La Figura 4.14 muestra los principales elementos que conforman el sistema de medida. La señal asimétrica generada por el molino de campo pasa inicialmente por una etapa de acondicionamiento de señal en la que se controla la ganancia; en ésta etapa se configuran los factores asociados con el error de sitio. Posteriormente la señal es digitalizada por una tarjeta National Instruments de 14 bits y 140 MS/s; la tasa de muestreo usada es de 100 kS/s. La señal digital es transmitida hacia la unidad de procesamiento en donde se ejecuta inicialmente el filtro por ventana tipo Hamming y posteriormente se calcula la amplitud y polaridad del campo eléctrico medido a partir de la señal asimétrica; el anterior calculo arroja la medida del campo eléctrico a una tasa de 5 S/s. Los datos son almacenados en una base de datos local. La estampa de tiempo es proporcionada por una antena GPS Garmin 18x serial.

La Tabla 4.1 resume las principales características técnicas del sistema completo de medida.

La Figura 4.15 muestra a modo de ejemplo algunos de los registros de campo eléctrico obtenidos durante tormentas eléctricas en Bogotá.

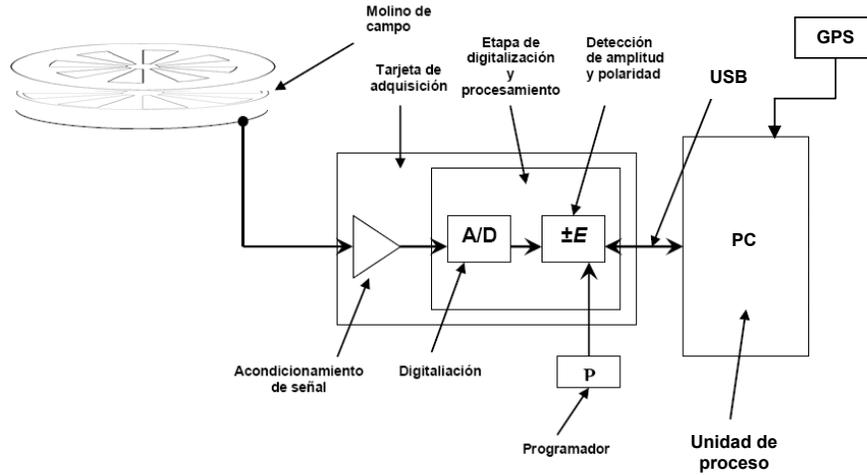


FIGURA 4.14: Componentes del sistema de medida de campo eléctrico ambiental

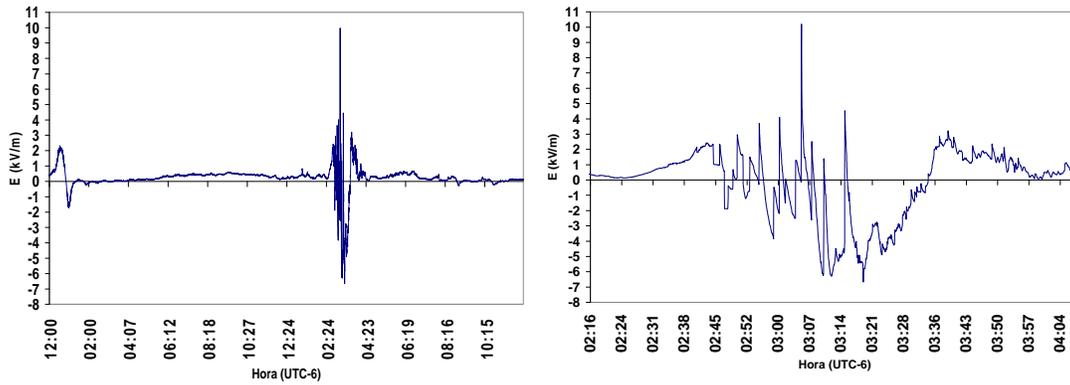
CUADRO 4.1: Especificaciones del molino de campo

Parámetro	
Sensibilidad	500 $\mu\text{V}/\text{V}/\text{m}$
Resolución	2,44 V/m
Resolución de digitalización	14 bits con signo
Tasa de muestreo	140 MS/s
Rango	+/- 20 kV/m
Señal de salida	+/- 10 V.
Motor	Brushless
Referencia de tiempo	GPS Garmin 18x serial

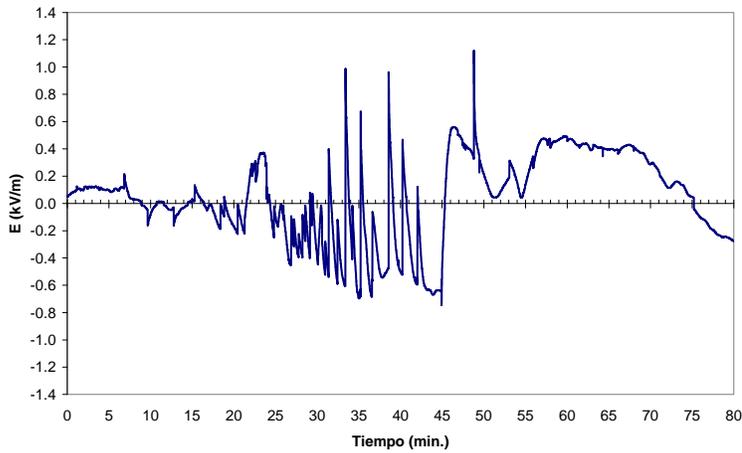
4.1.4. Molinos de campo eléctrico en el KSC/CCAFS Florida, USA

La red se compone de 31 molinos de campo midiendo la componente vertical del gradiente de potencial a nivel del suelo en forma continua con una tasa de 50 muestras por segundo. Por convención, un gradiente de potencial positivo es producido cuando hay una carga eléctrica de polaridad positiva predominante. La Figura 4.16 muestra la ubicación de cada una de las estaciones de medida; 23 sensores de la red se encuentran ubicados en el *Kennedy Space Center* - KSC y 8 en el *Cape Canaveral Air Force Station* - CCAFS en Florida, EE.UU. La red de 31 sensores y los sistemas de computo y visualización asociados conforman el *Launch Pad Lightning Warning System* [11].

La red de molinos de campo del KSC/CCAFS es usada en ésta tesis para desarrollar un patrón de calibración para molinos de campo empleados en aplicaciones de predicción de tormentas. Las principales características de la red que la hacen única para el desarrollo de un modelo patrón son: i. que sus sensores se encuentran instalados sobre terreno plano a nivel del mar, ii. que es la red más grande del mundo con 31 estaciones, iii. que el lugar de instalación de cada sensor se encuentra libre de elementos cercanos y iv. que se cuenta con



18 de noviembre de 2004



4 de mayo de 2006

FIGURA 4.15: Ejemplo de tormentas eléctricas medidas en Bogotá.

un plan continuo de mantenimiento y con un sistema confiable de control de operación y fallos.

La Figura 4.17 muestra el lugar de instalación típico usado en cada una de las estaciones de medida de la red. La Tabla 4.2 describe las principales características técnicas de los sensores.

CUADRO 4.2: Especificaciones de los molinos de campo

Parámetro	
Sensibilidad	144 $\mu\text{V}/\text{V}/\text{m}$
Resolución	4 V/m
Resolución de digitalización	14 bits con signo
Rango	+/- 30 kV/m
Señal de salida	+/- 10 V.
Referencia de tiempo	(desde la estación base)

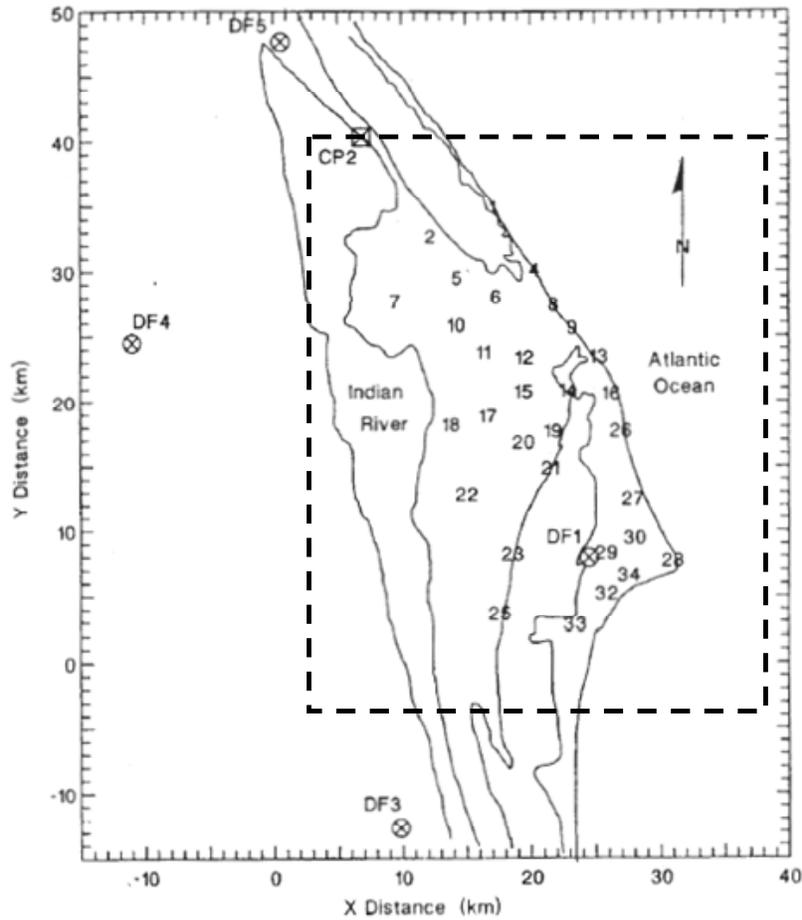


FIGURA 4.16: Localización de los molinos de campo eléctrico y la red de detección de rayos en el KSC y CCAFS. Los números del 1 al 34 ilustran la posición de cada molino de campo; las posiciones 3, 23 y 33 no se encuentran en funcionamiento. Los sensores de la red de detección de rayos son marcados con DF (Direction Finder). Adaptado de [10].

4.1.5. Molinos de campo eléctrico en Navarra, España

Con el propósito de realizar aplicaciones de predicción de tormentas eléctricas que permitieran tomar medidas preventivas para la protección en parques eólicos, en Navarra a comienzos de 2010 se conformó una red de 11 molinos de campo eléctrico distribuidos por diferentes parques de la comunidad.

Los sensores fueron ubicados en los techos de las subestaciones de los parques; la mayoría de ellos en la cima de montañas con la presencia de elementos que pueden distorsionar el campo electrostático como antenas o los mismos aerogeneradores; por tanto, al no estar instalados de la forma “ideal”, como sí lo estaban los molinos de campo del KSC, cada una de las estaciones de medida de Navarra tiene un error de sitio y efecto topográfico.



a



b

FIGURA 4.17: Molino de campo eléctrico en el Centro Espacial Kennedy, Florida, USA. a. Sensor de campo eléctrico invertido instalado a 1 m de altura sobre plataforma de concreto. b. Adecuación de las cercanías para eliminar elementos cercanos.

Al sur de Navarra se encuentra una zona relativamente plana a aproximadamente 420 msnm; las estaciones 8 y 9 se encuentran ubicadas en ésta región. En el resto de la comunidad se encuentran instalados los otros 9 sensores en la parte alta de montañas que van desde los 749 hasta 1107 msnm. Con las anteriores características, ésta red de molinos de campo se comporta como un montaje de patronamiento a gran escala para sensores en montaña contando con una referencia de terreno plano.

Los 11 sensores utilizados provienen de tres tipos diferentes de fabricantes a los que se les ha identificado con los tipos A, B y C. La Tabla 4.4 describe la altura sobre el nivel del mar

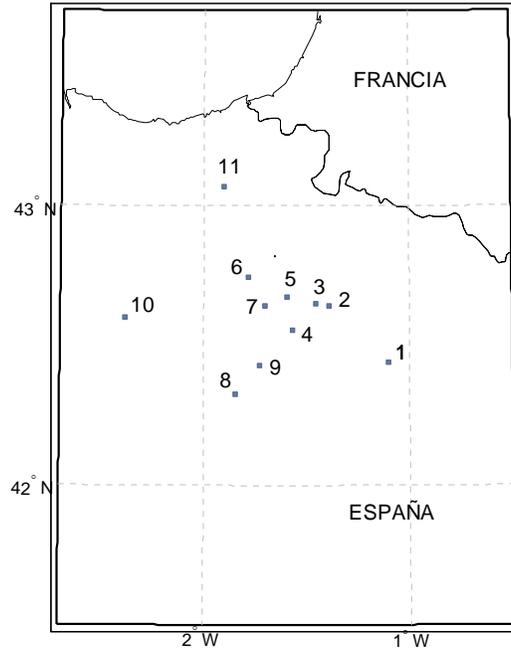


FIGURA 4.18: Localización de los once molinos de campo en Navarra.

de cada una de las estaciones de medida y el tipo de sensor usado en cada una de ellas.

CUADRO 4.3: Altura de cada estación de medida y tipo de molino de campo utilizado

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Altura (m.s.n.m.)	1107	898	934	811	933	749	667	426	429	867	902
Tipo de sensor	A	A	B	C	A	A	A	A	A	A	A

La Figura 4.19 muestra un ejemplo del modo de instalación y las características del entorno de los puntos de medida.

A pesar de que la red se encuentra conformada por tres tipos diferentes de molinos de campo, sus especificaciones generales son similares. En todas las estaciones se utilizó un mismo sistema de digitalización con una resolución de 16 bits; con una velocidad de muestreo de 1 muestra/s y con una señal de salida de ± 5 V. Para todos las estaciones fue necesario usar rangos de medida mayores a 100 kV/m, dados los altos factores de amplificación que se detectaron, dichos factores son debidos principalmente a que los sensores se encuentran en la parte alta de montañas y sobre edificaciones.

La calibración de los sensores fue realizada inicialmente en laboratorio y posteriormente se verifico en sitio con el propósito de identificar los cambios en la respuesta de los sensores debidos al uso de un cable de señal de una longitud diferente. La calibración en sitio se real-

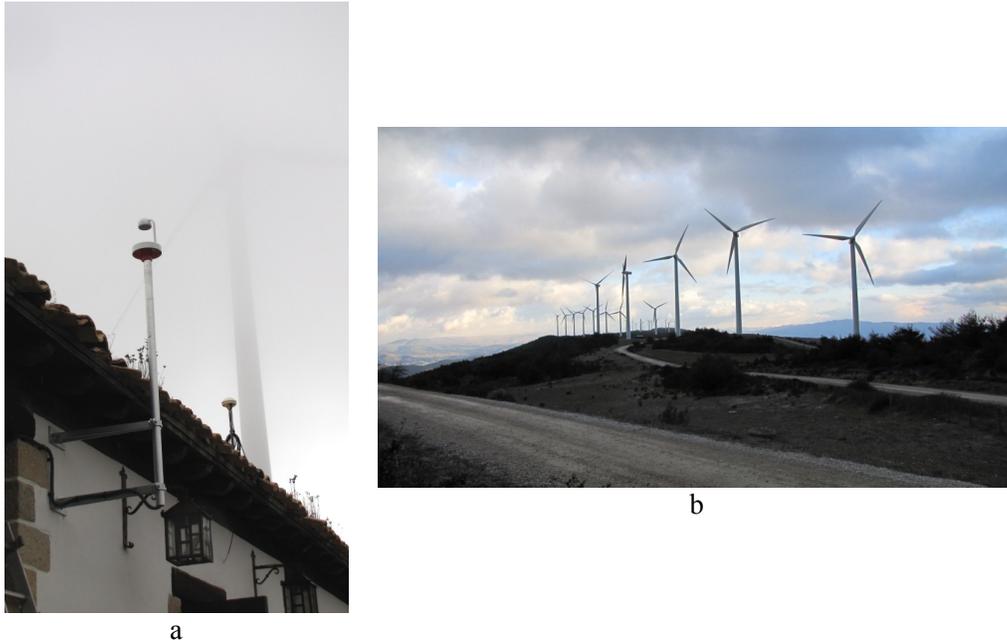


FIGURA 4.19: Características del lugar de instalación de los sensores. a. Montaje del molino de campo en la estación no. 10. b. Característica de montaña de la estación no. 2.

CUADRO 4.4: Especificaciones para los tres tipos de molino de campo

Parámetro	A	B	C
Sensibilidad ($\mu\text{V}/\text{V}/\text{m}$)	34	100	49
Resolución (V/m)	18.3	30	12.5
Resolución de digitalización	16 bits con signo	16 bits con signo	16 bits con signo
Rango (kV/m)	+/- 150	+/- 212	+/- 102
Señal de salida (V)	+/- 5	+/- 5	+/- 5
Velocidad (rpm)	3200	300 (obturación alternada)	1650
Muestreo (Muestra/s)	1	1	1

izó mediante un generador de alta tensión DC portátil. La Figura 4.20 muestra la curva de calibración obtenida in situ para uno de los sensores.

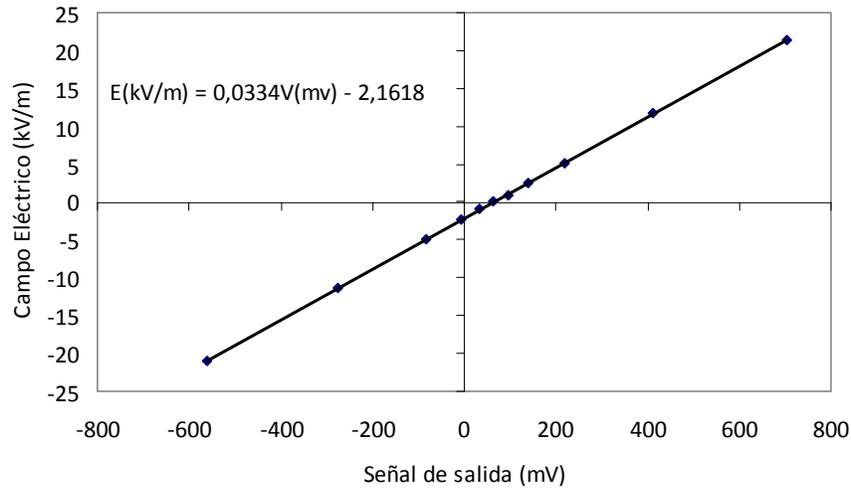


FIGURA 4.20: Curva de calibración en sitio de uno de los sensores de la red de molinos de campo de Navarra.

4.2. Sistemas de localización de rayos

4.2.1. CGLSS - *Cloud-to-Ground Lightning Surveillance System*

El CGLSS está compuesto por cinco antenas de tecnología MDF (Magnetic Direction Finding) y proporciona datos de rayos nube tierra en una área que incluye la red de molinos de campo del KSC/CCAFS; los datos suministrados para cada stroke son el tiempo de ocurrencia, latitud, longitud, amplitud de la corriente de retorno y los sensores que detectaron el evento. El error de localización es 0,5 km dentro del KSC y la eficiencia de detección es aproximadamente del 90 %. La ubicación de los sensores se ilustra en la Figura 4.16.

4.2.2. LDAR - *Lightning Detection and Ranging*

El sistema LDAR es una red de detección de rayos con siete sensores de VHF (66 MHz) ubicados en el KSC y CCAFS. Mediante la técnica del *Time Of Arrival* se obtiene la localización en tres dimensiones de la fuente de la radiación en una ventana de tiempo de 82 μs con una resolución temporal de 10 ns. Los sensores permiten hacer la detección de radiaciones en VHF generalmente asociadas con la fase de inicio de descargas CG e IC, el líder escalonado o con la propagación de líderes en el interior de la nube.

Como se describe en [10], las radiaciones de VHF generalmente se asocian con procesos con valores altos de campo eléctrico y concentración de carga, que son los mismos procesos detectables por los molinos de campo eléctrico. En [10] se presenta un amplio estudio de la carga eléctrica asociada a rayos en la Florida mediante el uso del LDAR y los molinos de campo.

En ésta tesis el sistema LDAR es utilizado para discriminar eventos de rayo que por su geometría no pueden representarse mediante un modelo simplificado de carga. Para efectos de construir una curva patrón de calibración para los molinos de campo, solamente se incluyen aquellos eventos que se pueden representar mediante un modelo de carga puntual.

4.2.3. LINET - *Lightning NETWORK*

Para el caso de los molinos de campo de Navarra, España, los datos de localización de rayos fueron proporcionados por la red LINET, la cual tiene cobertura con alta eficiencia en la mayor parte de España; Navarra se encuentra ubicada en las zonas de alta eficiencia de detección. LINET realiza la detección total de rayos mediante técnicas LF/VLF con más de 120 sensores en Europa. Los datos proporcionados por la red son: tiempo de ocurrencia de cada stroke, latitud, longitud, amplitud de la corriente de retorno, tipo (GC o IC), entre otros. El error de localización se estima <100m para la zona de estudio.

La Figura 4.21 muestra la ubicación de los sensores que componen la red y la localización de la región de estudio en la cual se encuentra instalada la red de molinos de campo de Navarra.

CUADRO 4.5: Características técnicas de LINET

Parámetro	
Eficiencia de detección	>95 % para rayos CG, >95 % para rayos IC
Error medio de localización	<100m
Rango de frecuencia	VLF/LF
Error de tiempo medio	0.2 μ s

4.2.4. SID - *Sistema de Información de Descargas*

Los datos de localización de rayos para el estudio de la operación de los molinos de campo instalados en Colombia fueron proporcionados por el Sistema de Información de Descargas - SID, operado en Colombia por la empresa Interconexión Eléctrica SA ISA.

La red se compone de seis sensores de LF de la referencia IMPACT LS7000 que combinan las técnicas de la detección de la dirección magnética (Magnetic Direction Finding) y el tiempo de arribo (Time Of Arrival). Ésta nueva red es el resultado de una actualización reciente de un antiguo sistema conformado por sensores LPATS III. Las principales características de la red son descritas en el Cuadro 4.6.

La Figura 4.22 describe el área de mayor eficiencia de detección de la red de localización de rayos. Como se puede apreciar los molinos de campo ubicados en Bogotá y Medellín se encuentran dentro de la zona de mayor eficiencia de detección. Los errores de localización presentados por la red (500 m de error medio) no producen errores importantes a la hora de reconstruir las curvas de comportamiento de los molinos de campo, principalmente debido a

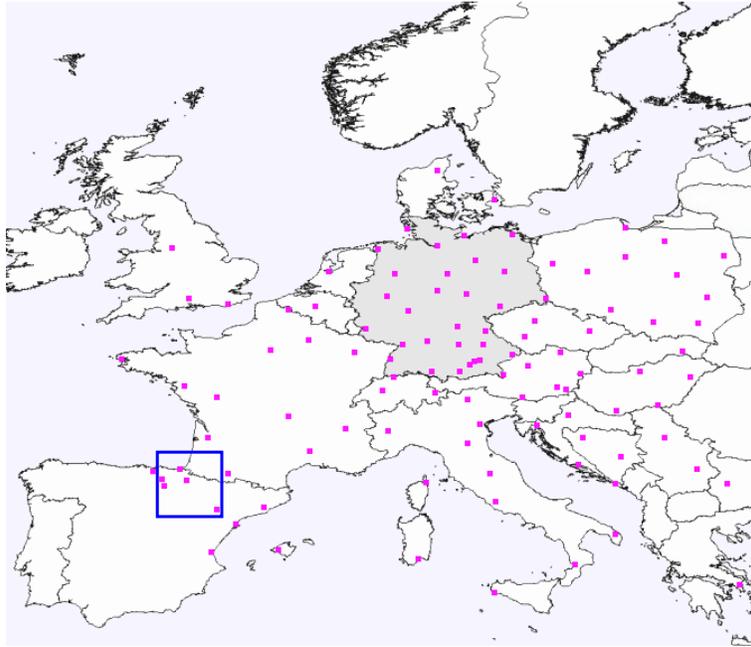


FIGURA 4.21: Red LINET en Europa y ubicación de la zona de estudio en Navarra, España.

CUADRO 4.6: Características técnicas del SID

Parámetro	
Eficiencia de detección	>90 % para rayos CG, 5 a 30 % para rayos IC
Error medio de localización	500 m
Rango de frecuencia	LF

que el rango de distancias a usar (0 a 30 km) es mucho mayor a el error de localización.

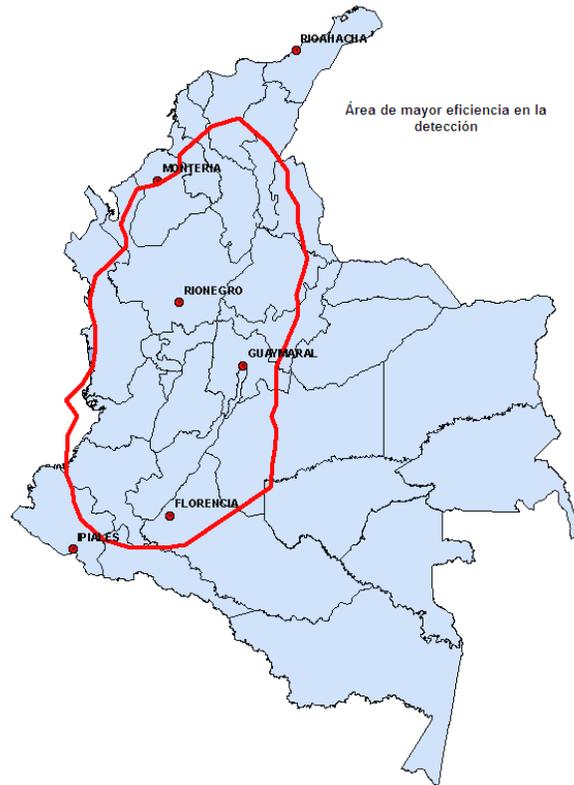


FIGURA 4.22: Sistema de Información de Descargas SID.

Desarrollo de un sistema Patrón

En la actualidad los molinos de campo eléctrico son usados como detectores de nubes de tormenta para aplicación en metodologías de predicción de rayos. Los parámetros de alarma más usados, basados en la medida del campo electrostático, son el umbral de campo eléctrico, el primer cambio de polaridad de positivo a negativo, los cambios de campo eléctrico y la derivada del campo eléctrico; algunos de los criterios de alarma son discutidos en [102][79][103]. El desarrollo de las últimas décadas en sistemas de monitoreo de rayos en tiempo real ha impulsado y perfeccionado las aplicaciones de predicción de rayos; recientemente se desarrolló la normativa europea CENELEC EN50536 [13] “*Protecton against lightning. Thunderstorm warning systems*” la cual recoge los conceptos básicos sobre metodologías de predicción y proporciona los lineamientos para el uso de diferentes tecnologías de detección incluyendo los molinos de campo eléctrico.

Los sistemas de predicción de tormentas se basan en la combinación de diferentes tecnologías de detección tales como sensores de campo electrostático, sistemas de localización de rayos, radar y otros; sin embargo, los lugares en los que más se requieren sistemas de alerta por tormentas, como por ejemplo en los países tropicales, no tienen disponible todo éste tipo de sistemas y una de las alternativas viables es la instalación de molinos de campo aislados; por lo tanto, es de gran importancia el desarrollo de criterios de predicción confiables basados únicamente en medidas de campo electrostático.

Los molinos de campo eléctrico y en general todos los tipos de medidores de campo electrostático son afectados por diferentes factores cuando son usados en condiciones reales para

medir el campo eléctrico producido por nubes de tormenta. Comúnmente los sensores de campo electrostático son calibrados en laboratorio mediante la generación de un campo eléctrico homogéneo de valor conocido, donde el factor de medida se obtiene mediante la comparación entre la amplitud del campo eléctrico aplicado y la señal de salida del sensor. Sin embargo, en la mayoría de los casos con montajes reales, el campo eléctrico del ambiente no es homogéneo debido a distorsiones producidas por la edificación o la estructura en la que el sensor es instalado, objetos cercanos e incluso los mismos elementos de soporte del sensor. En muchos casos también se introduce una distorsión de tipo topográfico generada por montañas. Otro factor que conduce a medidas erróneas es la carga espacial generada por superficies irregulares o elementos del entorno como la hierba cuando están inmersos en el campo eléctrico asociado a la tormenta [56, 57, 54, 55].

Para aplicaciones de predicción de rayos, la amplitud del campo electrostático medido durante una tormenta juega un papel muy importante; excepto en el parámetro de cambio de polaridad, todos los criterios de alarma requieren de una adecuada calibración. Para la aplicación real de los sensores de campo electrostático, es necesario incluir factores de corrección k que resuman todas las distorsiones relacionadas con los elementos cercanos, los efectos topográficos y la instalación del equipo. En la ecuación 5.1 k_0 es la constante de calibración de laboratorio, k es la corrección por el “error de sitio”, E es el campo eléctrico y V es la amplitud de la señal de salida del sensor. Como se explica en el capítulo 6, el efecto topográfico no puede corregirse mediante una constante y requiere un análisis un poco más complejo.

$$E = k \cdot k_0 \cdot V \tag{5.1}$$

Para estimar el factor k es posible considerar simulaciones de campo electrostático basadas en elementos finitos o comparaciones entre medidas hechas por el sensor instalado en condiciones reales y hechas por un sensor de referencia que no presente error de sitio, lo suficientemente cerca como para considerar que los dos sensores están midiendo el mismo campo eléctrico. Ambos métodos presentan muchas incertidumbres y solo son aplicables en casos muy limitados de montajes sencillos. Un tercer método de calibración, propuesto y desarrollado en ésta tesis, se basa en el estudio estadístico de las variaciones de campo electrostático producidas por rayos.

A pesar de todas las dificultades de calibración, la medida de campo eléctrico es la manera más directa y confiable de detectar la formación de una nube de tormenta antes de la ocurrencia de rayos y es de gran importancia para el desarrollo de metodologías de predicción y prevención.

5.1. Definición de un sistema patrón

El sistema de molinos de campo del Centro Espacial Kennedy KSC y La Estación Cabo Cañaveral CCAFS en La Florida - EE.UU. es estudiado en esta tesis como sistema patrón. La anterior definición se realiza con base en los siguientes argumentos.

- Los molinos de campo eléctrico en La Florida están ubicados sobre una extensa región costera y totalmente plana por lo que no hay ningún tipo de efecto topográfico.
- Los molinos de campo en cada sitio están ubicados sobre una plataforma de concreto dentro de un área circular cubierta de gravilla con un radio de 7.6 m. El área de gravilla se ubica dentro de una área mayor de 15,2 m de radio que debe ser limpiada de todos los árboles, arbustos y cualquier objeto. Cada lugar está restringido en no tener elementos que se eleven más de 18° en el horizonte visto desde el lugar de instalación del sensor; el montaje de cada estación se ilustra en la Figura 5.1 [11]. El montaje descrito minimiza el efecto de los objetos cercanos; adicionalmente el área circular de gravilla que rodea cada sensor reduce la generación de carga espacial.
- 31 molinos de campo eléctrico prácticamente sin “error de sitio” pueden proporcionar una gran cantidad de información para realizar análisis estadísticos usando relativamente pocos episodios de tormenta. La Figura 4.16 muestra la ubicación de los 31 molinos de campo eléctrico.

Adicionalmente, la misma zona está cubierta por otros sistemas de medida como la red CGLSS, el NLDN y el sistema de VHF LDAR, entre otros.

Otras redes de molinos de campo se encuentran actualmente instaladas en otros lugares del mundo; en la zona metropolitana de Beijing en China se encuentran instalados 10 molinos de campo desde 2005; tal como lo describe [104], los sensores de campo eléctrico fueron calibrados mediante la comparación con un sensor patrón, sin embargo los sitios de medida muestran un entorno complejo que incluye edificaciones y contaminación. Problemas similares experimentan las redes de molinos de campo instalados en Colombia y en muchos otros lugares.

La red de molinos de campo de la Florida ha sido usada para el estudio de las tormentas eléctricas desde la década de los 70s. Algunos de los trabajos más importantes son [36, 37, 8, 38, 105, 106, 10, 102].

5.2. Base teórica

El estudio de la variación de campo eléctrico en función de la distancia ha sido usado en muchos trabajos para estimar los valores de carga eléctrica y la altura de la carga transferida por descargas nube-tierra; desde los primeros trabajos ha sido usado para tratar de conocer la estructura eléctrica de la nube de tormenta (*Wilson* [1][2], *Schonland* (1928) [29], *Wormell*

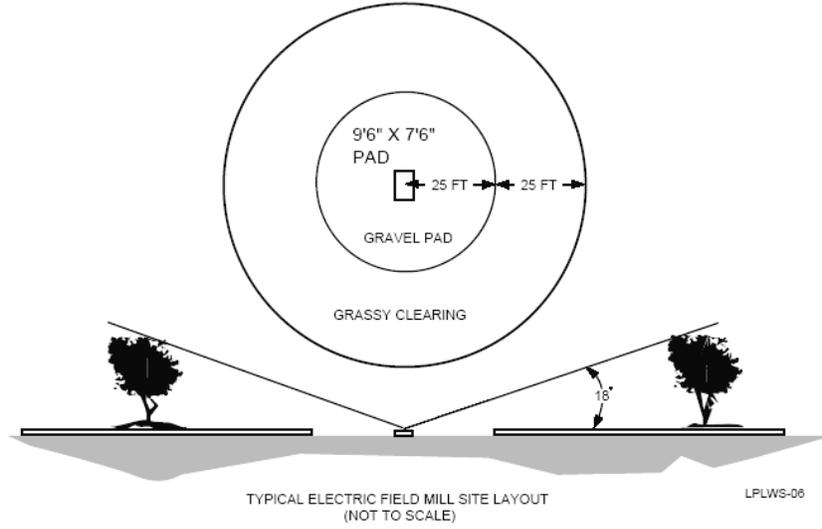


FIGURA 5.1: Montaje de un molino de campo eléctrico en el KSC. Tomado de [11].

(1939) [3], *Malan* (1951) [107], *Hatekeyama* (1958) [45]). Para el caso de redes de molinos de campo eléctrico, la relación ΔE vs D ha permitido hacer la reconstrucción espacial de la ubicación de las cargas transferidas durante episodios de tormenta en Nuevo Méjico (*Workman* (1942) [31], *Reynolds y Craib* (1955) [4], *Krehbiel* (1974, 1979) [34, 35]) y en Florida (*Krider et al* [36, 37, 38, 105, 106, 10, 102]). Para este trabajo, la relación ΔE vs D será usada para identificar los patrones de comportamiento de los molinos de campo que pueden permitir, mediante intercomparación, la calibración de sensores en condiciones no ideales.

Un primer análisis consiste en el estudio de la curva de variación de campo eléctrico en función de la distancia de ocurrencia del flash para cada uno de los puntos de medida de campo eléctrico en el KSC/CCAFS. *Jacobson y Krider* [36] y *Maier y Krider* [37], concluyeron que generalmente los rayos nube-tierra pueden ser representados mediante un modelo de carga puntual (Figura 5.2a). Adicionalmente *Murphy* [10] mostró que muchas descargas nube-tierra son mejor representadas mediante un modelo de carga bipolar (Figura 5.2b). Para el caso del modelo de carga puntual la amplitud del ΔE es proporcional al valor de ΔQ y se reduce en función de la distancia al cubo entre ΔQ y el punto de medida, como muestra la ecuación 5.2.

$$\Delta E = \frac{2\Delta QH}{4\pi\epsilon_0(H^2 + D^2)^{3/2}} \quad (5.2)$$

Donde, H es la altura de la carga puntual y D es la distancia horizontal entre la carga puntual y el sitio de medida.

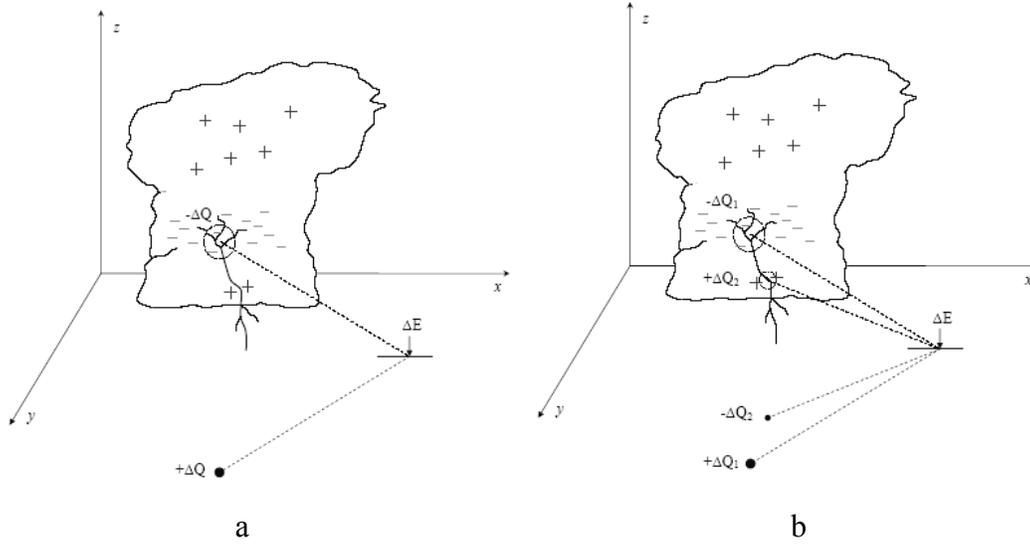


FIGURA 5.2: Modelos de carga puntual y bipolar

Como se describe en [41], la variable ΔQ puede ser representada mediante una distribución de probabilidad log-normal, de la forma:

$$\ln(\Delta Q) \approx N(\mu_Q, \sigma_{\ln(Q)}) \quad (5.3)$$

En donde μ_Q corresponde a la mediana de ΔQ y $\sigma_{\ln(Q)}$ corresponde a la desviación estándar de $\log(\Delta Q)$. La función de densidad de probabilidad de la variable ΔQ está dada por:

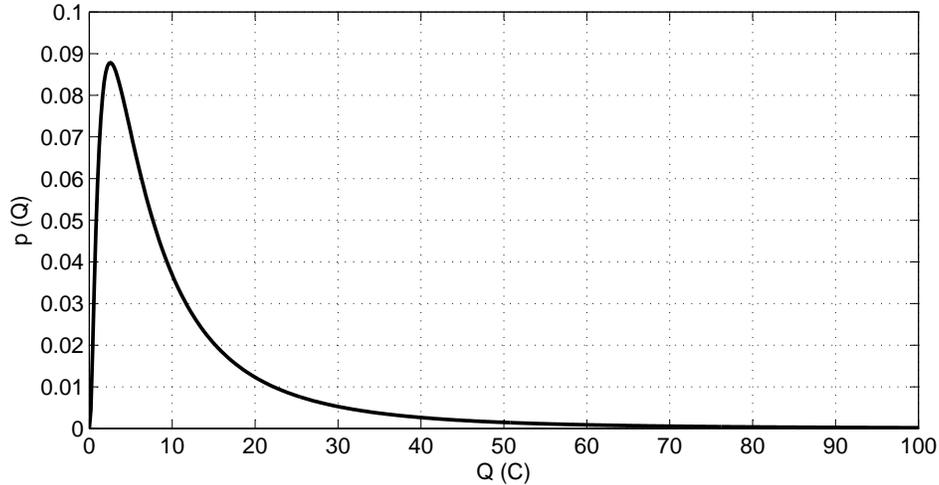
$$p(\Delta Q_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta Q_i\sigma_{\ln(Q)}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(\Delta Q_i) - \ln(\mu_Q)}{\sigma_{\ln(Q)}} \right)^2 \right] \quad (5.4)$$

El Cuadro 5.1 muestra los valores de carga del rayo reportados por diversos autores obtenidos de medidas de campo electrostático e impactos directos de rayo en torres instrumentadas. Para el caso de rayos negativos los parámetros de la distribución log-normal corresponden con $\mu_Q = 7,5C$ y $\sigma_{\log(Q)} = 1,02$. La Figura 5.3 muestra la distribución de probabilidad para el valor de ΔQ en rayos negativos nube-tierra.

Al usar la anterior distribución de probabilidad para reemplazar ΔQ en la expresión 5.2, se obtiene la distribución de cambios de campo eléctrico ΔE en función de la distancia mostrados en la Figura 5.4. En la Figura 5.4a la separación entre los puntos, para una misma

CUADRO 5.1: Valores de carga eléctrica

Autor	N	Q [C]	H [km]
Jacobson y Krider (1976)	70	10-40	6-9.5
Maier y Krider (1986)	214	24.3(14.9)	7.6(1.2)
Koshak y Krider (1989)	36	24.4(9.5)	8.6(1.0)
Koshak y Krider (1989)	29	24.8(15.9)	7.6(1.7)
Berger (1986)	94	7.5(10.5)	–

FIGURA 5.3: Distribución de probabilidad de la carga total transferida ΔQ para rayos negativos

distancia D , indica la probabilidad de que se presente el valor de ΔE indicado; entre mayor es la separación menor es la probabilidad de ocurrencia, Ésta curva permite observar el comportamiento de los valores máximos de ΔE . Al usar una escala logarítmica para el eje de ΔE (Figura 5.4b) se obtiene un gráfico que permite observar con más claridad los límites máximo y mínimo que puede tomar el ΔE para cada distancia D .

Mediante la obtención experimental de la curva de comportamiento ΔE vs D de un molino de campo específico es posible estudiar los factores de amplificación o reducción en el campo electrostático que se están presentando debido a la instalación del sensor. A continuación se hace un estudio de la curva experimental de los sensores del KSC de modo tal que puedan ser considerados como sistemas de referencia.

5.3. Procesamiento de datos

Para el análisis fueron considerados 9 episodios de tormenta ocurridos en el KSC y CCAFS durante el verano de 2009. Para la construcción de la curva ΔE vs D de cada molino de campo se requiere de eventos en los que celdas de tormenta se aproximen a los sensores; comúnmente

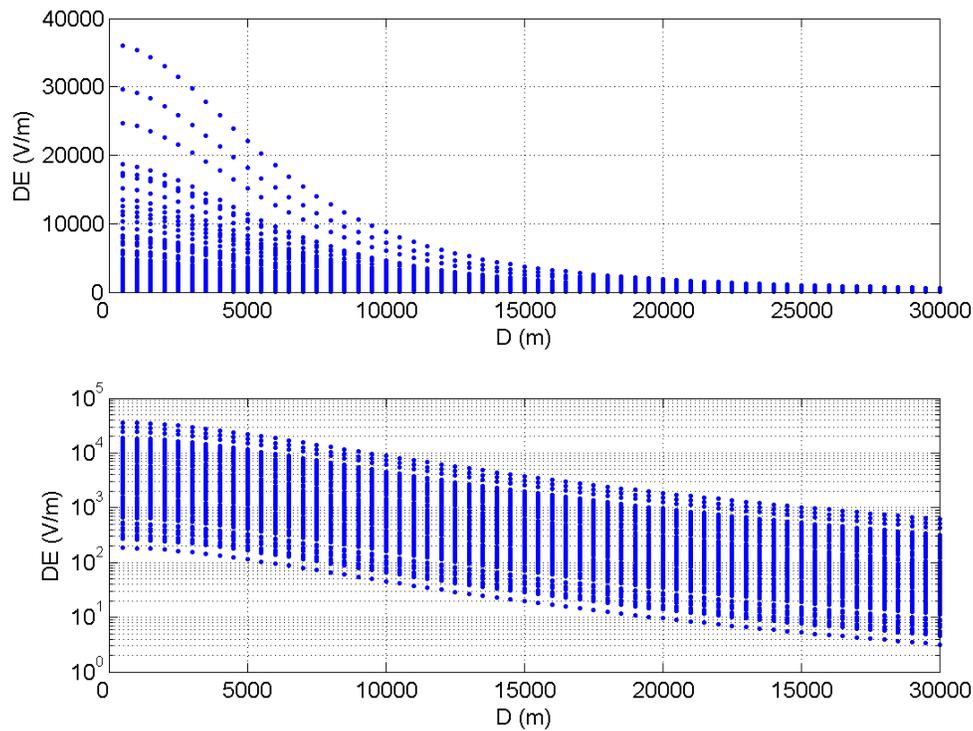


FIGURA 5.4: Comportamiento del ΔE en función de la distancia, teniendo en cuenta la distribución de probabilidad de ΔQ .

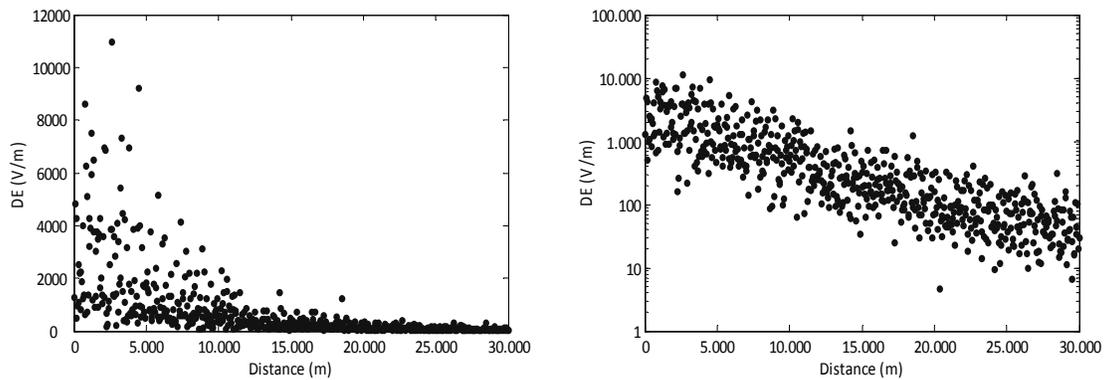


FIGURA 5.5: Distribución de cambios de campo eléctrico para 600 rayos simulados usando valores de carga y altura aleatorios a partir de sus distribuciones log-normal y normal respectivamente.

durante cada episodio suelen observarse más un evento de aproximación. La Figura 5.6 muestra a modo de ejemplo las detecciones realizadas por el CGLSS el día 23 de junio de 2009.

Un evento de aproximación puede estudiarse mediante una gráfica que relacione la distancia de ocurrencia de los strokes y el campo eléctrico medido en función del tiempo. La Figura

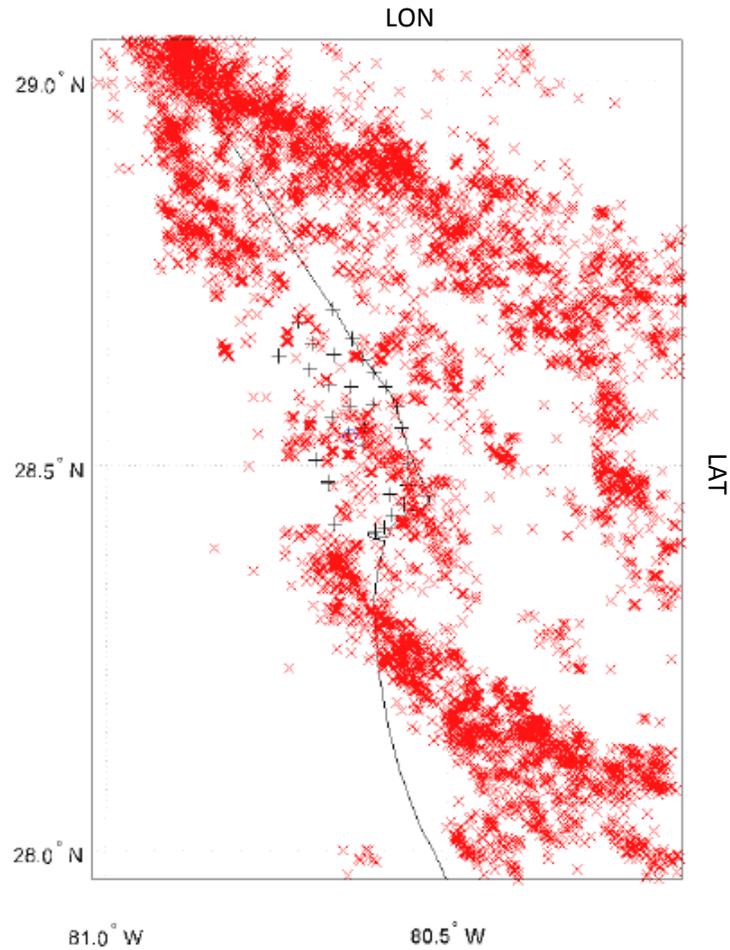


FIGURA 5.6: Datos de localización del CGLSS correspondientes a la tormenta ocurrida el 23 de junio de 2009 sobre el KSC. las x rojas indican la localización de cada stroke y las + negras indican la ubicación de cada molino campo.

5.7 muestra el comportamiento del campo eléctrico E en el molino de campo número 31 ubicado al sur del KSC y la distancia de ocurrencia de strokes durante el evento de tormenta del 23 de junio de 2009. En la gráfica puede observarse como el valor instantáneo de E aumenta con la aproximación de la tormenta y como se experimentan los ΔE en cada descarga; en la gráfica pueden distinguirse al menos dos episodios de aproximación.

En el Cuadro 5.2 se citan los episodios de tormenta estudiados. Cada evento tuvo una duración entre dos y tres horas. En cada episodio de tormenta se identificaron y separaron los eventos con actividad de strokes a una distancia menor a 30 km de cada uno de los 31 molinos de campo del KSC. Durante algunos casos de tormenta se presentaron sensores fuera de operación.

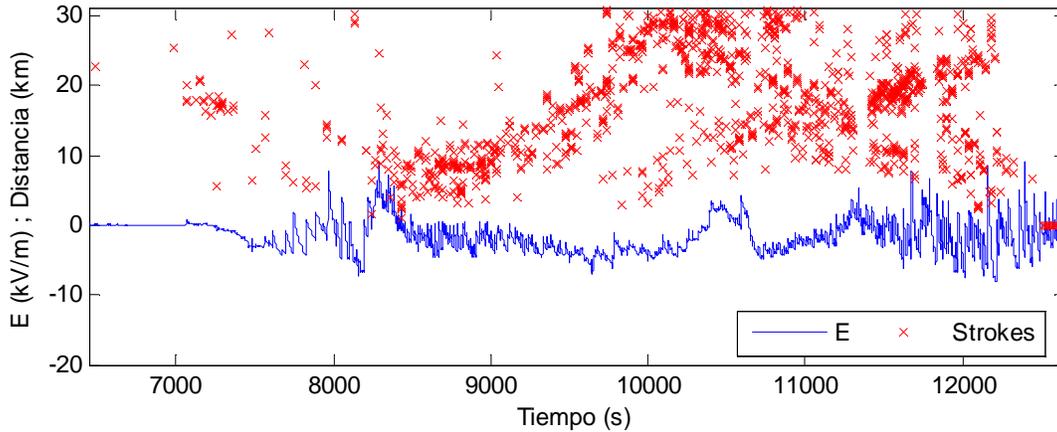


FIGURA 5.7: Señal de campo electrostático medida por el molino de campo número 31 el 23 de junio de 2009 y ubicación de los strokes detectados por el CGLSS con respecto al mismo sensor.

CUADRO 5.2: Episodios de tormenta estudiados

Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora local	Número de sensores	Sensores fuera de operación
23/06/2009	01:30	31	–
03/07/2009	21:00	31	–
05/07/2009	20:00	30	No. 26
07/07/2009	17:00	31	–
08/07/2009	18:00	30	No. 31
09/07/2009	20:00	31	–
10/07/2009	18:00	30	No. 10
17/07/2009	19:00	31	–
18/07/2009	17:30	31	–

Antes de iniciar el análisis de comparación fue necesario hacer una primera etapa de procesamiento reduciendo el muestreo de las señales de campo electrostático de 50 muestras/s a 10 muestras/s. Adicionalmente fue necesario programar la detección automática de lapsos de tiempo en los cuales los molinos de campo reportaban fallos de funcionamiento ya que incluían datos erróneos.

Mediante la comparación de los registros del CGLSS y de los molinos de campo, para cada punto de medida se obtuvo la información de la variación del cambio de campo eléctrico ΔE en función de la distancia de ocurrencia de cada descarga. La Figura 5.8 muestra, para una ventana de tiempo, la distancia de ocurrencia de la descarga (x rojas) con respecto a un molino de campo específico a partir de la detección realizada por el CGLSS. En azul se muestra el valor instantáneo de campo eléctrico medido por el molino de campo. Para la comparación de los dos tipos de información se construyó un programa para identificar la variación de campo eléctrico asociado con cada flash y stroke. En la Figura 5.8 se ilustran las muestras que representan el punto inicial pi y el punto final pf de cada cambio brusco en el campo electrostático. La detección de los puntos pi y pf fue realizada mediante el análisis

del dE/dt buscando el mayor valor de derivada en rangos de dos segundos.

Después de la comparación puede apreciarse como alrededor de un cambio brusco de campo electrostático se ubican diferentes detecciones que representan los strokes de cada flash. En todos los casos en que se encontraron más de un stroke asociado con un mismo cambio de campo electrostático, se tomo como distancia entre el flash y el molino de campo la distancia con respecto al stroke más cercano.

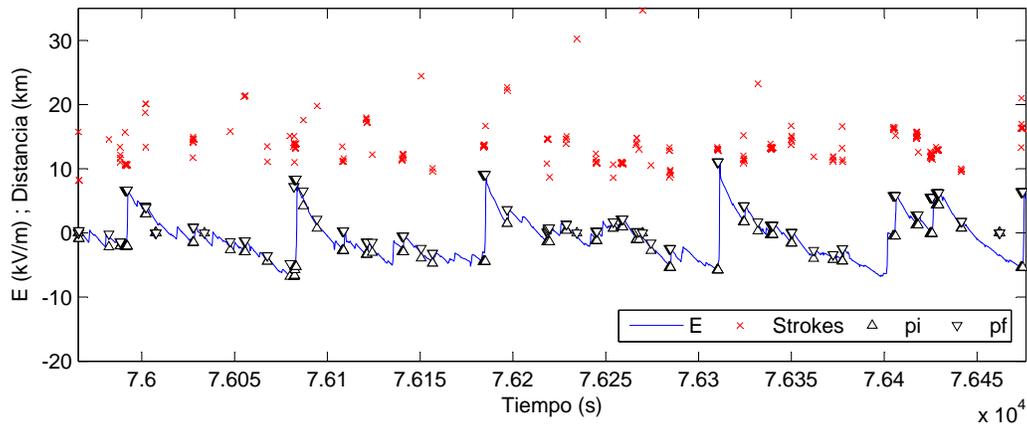


FIGURA 5.8: Comparación de variaciones de campo eléctrico vs. detecciones del CGLSS (3 de Julio de 2009, sensor no. 8). Las x rojas muestran la distancia de ocurrencia de cada stroke con respecto al molino de campo mientras la línea continua muestra el valor instantáneo del campo eléctrico.

En la Figura 5.9 pueden observarse los ΔE obtenidos en función de la distancia para un evento de tormenta (5 de julio de 2009, molino de campo no. 8). Las distancias fueron calculadas usando las coordenadas dadas por el CGLSS. Las líneas discontinuas denotan los límites superior e inferior considerando una carga puntual con una probabilidad de 0,0001 (virtualmente cero), dichos límites demarcan las áreas para los casos físicamente improbables. Para el anterior cálculo se consideró una altura de 8000 m para la carga puntual. En la gráfica puede observarse una tendencia lógica en los ΔE de ir aumentando a medida que disminuye la distancia con respecto al molino de campo, sin embargo también se observan muchos ΔE que exceden el límite superior. Todos los molinos de campo presentaron un comportamiento similar con la ocurrencia de ΔE grandes a grandes distancias.

El procedimiento descrito fue ejecutado para cada episodio de tormenta, con respecto a cada uno de los 31 molinos de campo del KSC y para cada uno de estos casos se obtuvo la curva de variación de campo electrostático ΔE en función de la distancia D . Las curvas obtenidas son similares a la ilustrada en la Figura 5.9.

Después de analizar varios episodios de tormenta, uniendo todos los datos puede encontrarse la curva característica de medición para cada molino de campo. La Figura 5.10 muestra

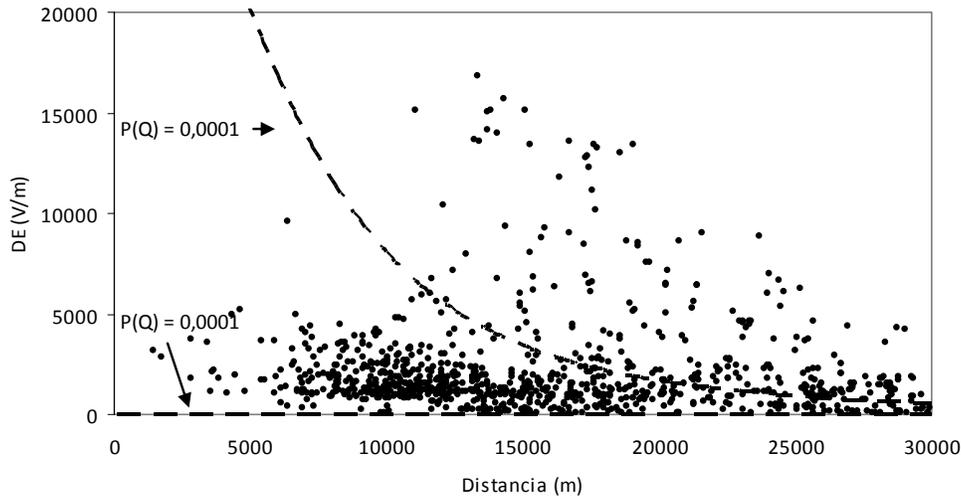


FIGURA 5.9: Variaciones de campo eléctrico ΔE en función de la distancia medidos por un molino de campo durante un episodio de tormenta (5 de Julio de 2009, sensor no. 8).

la curva obtenida para el molino de campo número 7 durante los episodios de tormenta entre junio y julio de 2009. A diferencia que en el caso de un solo episodio de tormenta ilustrado en la Figura 5.9, en este caso que junta varias tormentas se ve con mayor claridad la tendencia en los ΔE de ir aumentando cuando disminuye la distancia; no obstante también se obtienen muchos datos con valores poco probables de acuerdo con lo ilustrado en la Figura 5.9. La Figura 5.10 muestra con más claridad como a distancias mayores a 10 km se presenta una gran cantidad de datos atípicos.

En todos los molinos de campo se obtuvieron comportamientos similares, las Figuras 5.10 a 5.12 muestran varios ejemplos.

En la Figura 5.10a se muestra el comportamiento presentado por el molino de campo no. 5 durante 9 episodios de tormenta. Los valores obtenidos para distancias menores a 10 km son coherentes con los valores esperados probabilísticamente, es decir, valores que tienden a estar entre 1 y 15 kV/m ; no obstante para distancias mayores se obtienen muchos datos que no son lógicos.

En la Figura 5.10b se muestra la misma distribución pero usando una escala logarítmica. En ésta gráfica puede observarse con más claridad como los ΔE mínimos muestran una reducción con la distancia, en cambio los máximos tienden a mantenerse en valores del orden de 10 kV/m para distancias de 20 km o mayores.

Resultados similares pueden verse en las Figuras 5.11 y 5.12 para los molinos de campo no. 10 y no. 24. En general los 31 sensores presentaron el mismo tipo de datos no coherentes.

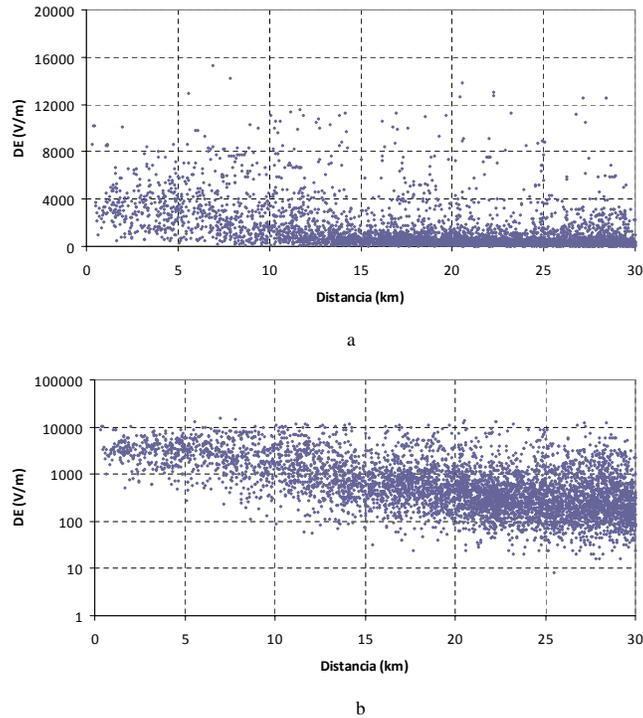


FIGURA 5.10: Curva DE vs D para el molino de campo 05 del KSC usando datos de tormentas ocurridas entre junio y julio de 2009. a y b son las curvas líneal y logarítmica respectivamente.

Las distribuciones de probabilidad consideradas parten de suponer un modelo de carga puntual o un modelo bipolar para los eventos de rayos nube-tierra (capítulo 2). La ocurrencia de valores inesperados en el ΔE puede ser debida a eventos en los cuales no resulta adecuado usar un modelo simple de carga puntual por la complejidad geométrica. Adicionalmente deben considerarse los posibles errores de medida y de cálculo. Algunas de las principales causas para los datos no coherentes son:

Una de las posibles razones para los datos improbables es que la distribución de probabilidad considerada para ΔE puede subestimar los valores de carga, sin embargo, para explicar valores grandes de ΔE a las distancias que se obtienen habría que usar valores de carga demasiado altos. El efecto de la precisión del CGLSS y la incertidumbre en el cálculo de los cambios de campo eléctrico pueden introducir algunos errores, sin embargo, éstos errores son muy pequeños comparados con las distancias y los valores de DE involucrados en los casos incoherentes. Una explicación más probable se basa en la ocurrencia de rayos nube-tierra que no se ajustan a ninguno de los modelos simplificados de carga.

Las detecciones de LDAR fueron usadas para estudiar la distribución espacial de las fuentes VHF durante rayos nube-tierra y establecer en que casos no es posible ajustar el evento a un modelo simplificado de carga. Como un ejemplo, el evento 75585,51s (el nombre

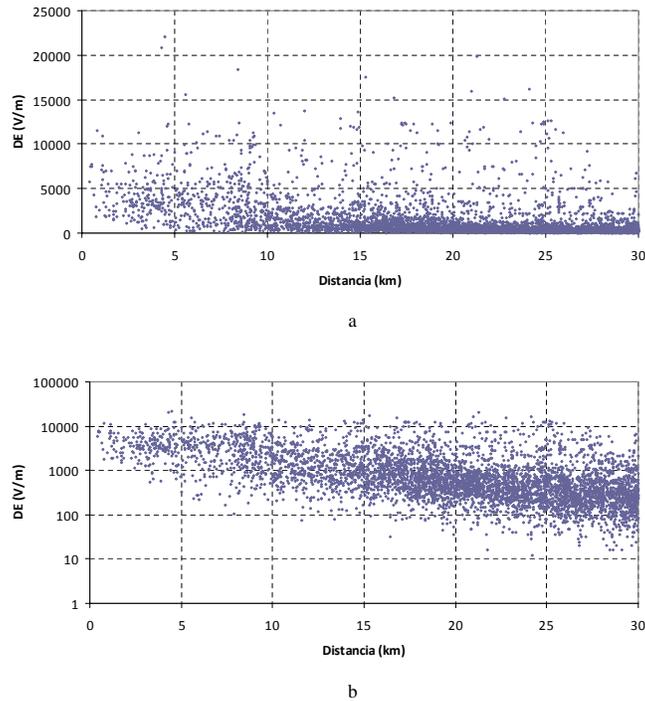


FIGURA 5.11: Curva DE vs D para el molino de campo 10 del KSC usando datos de tormentas ocurridas entre junio y julio de 2009. a y b son las curvas lineal y logarítmica respectivamente.

dado a cada evento corresponde con el tiempo de ocurrencia en segundos del día en hora local) el 17 de Julio de 2009 es un *flash* compuesto por cuatro *strokes* que ocurrieron en el mar a aproximadamente 15,2 km del molino de campo más cercano (sensor no. 4). El ΔE medido por el sensor no. 4 fue de 19,06 kV/m y todos los sensores entre el no. 1 y no. 20 midieron un ΔE mayor a 8 kV/m. La Figura 5.13 muestra la reconstrucción en tres dimensiones de las fuentes de VHF detectadas por LDAR para el evento 75585,51s; las detecciones muestran un gran desplazamiento horizontal en el cual el punto de impacto en tierra de la descarga se encuentra a más de 10 km del lugar de mayor concentración de fuentes VHF. A pesar de la gran distancia entre la detección realizada por el CGLSS y los molinos de campo, las detecciones VHF sugieren que la región de la nube en la cual se removió la carga eléctrica se encontraba mucho más cerca de los sensores.

La mayoría de los casos similares al que se describe en la Figura 5.13 fueron detectados durante la parte final de las tormentas. Durante el episodio del 17 de Julio la tormenta empezó aproximadamente 60 km al occidente, se movió de occidente a oriente pasando sobre la parte norte de la red de molinos de campo. La Figura 5.14 muestra un gráfico de tiempo contra distancia para la tormenta del 17 de Julio; el gráfico presenta la distancia de cada rayo nube-tierra con respecto al molino de campo no. 10. Los rayos que presentaron un buen ajuste con el modelo de carga puntual o bipolar son resaltados en el gráfico; el proceso utilizado

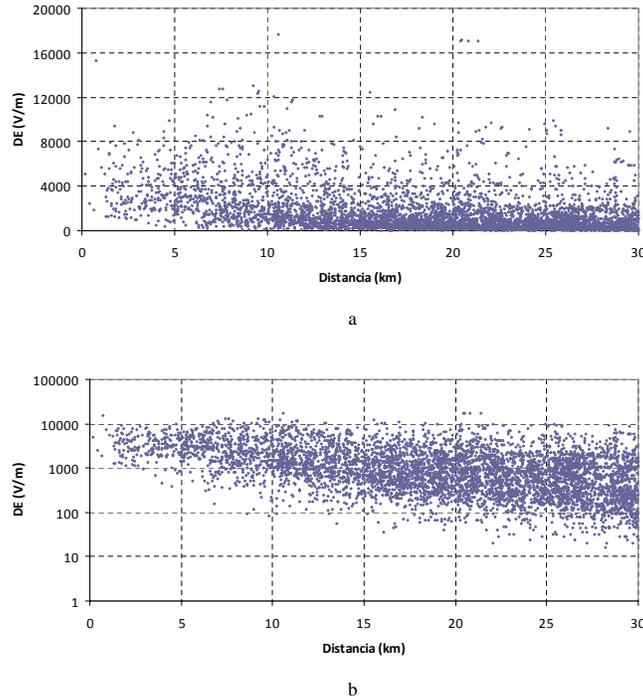


FIGURA 5.12: Curva DE vs D para el molino de campo 24 del KSC usando datos de tormentas ocurridas entre junio y julio de 2009. a y b son las curvas lineal y logarítmica respectivamente.

para encontrar los casos de buen ajuste es descrito en la siguiente sección. La Figura 5.14 también muestra el campo eléctrico medido por el sensor no. 10. La mayoría de los casos de buen ajuste se encontraron durante la etapa de aproximación de la tormenta al sensor (entre los tiempos 72000 y 75000); como es de esperarse, entre menor es la distancia a la tormenta mayores son los cambios de campo eléctrico medidos; sin embargo, después del tiempo 75000 la tormenta se empieza a alejar nuevamente pero los cambios de campo eléctrico no se reducen sino que al contrario durante está etapa se presentan los cambios de campo eléctrico más grades de toda la tormenta. Nótese que el evento 75585,51s descrito en la Figura 5.13 corresponde con uno de cambios de campo eléctrico más grandes durante la parte final de la tormenta en la Figura 5.14; en éste caso la distancia entre el rayo y el sensor no. 10 fue de 22,7 km y el ΔE medido fue de 15,1 kV/m.

La Figura 5.15 presenta otro caso el cual muestra claramente que los casos de buen ajuste prácticamente solo se presentan durante la etapa de aproximación de la tormenta. El gráfico de distancia contra tiempo corresponde con el episodio de tormenta del 8 de Julio de 2009; el molino de campo de referencia en éste caso es el sensor no. 29. Durante la etapa de aproximación (entre los tiempos 66000 y 69000) los cambios de campos eléctrico fueron aumentando y las descargas nube-tierra presentaron un buen ajuste con el modelo de carga puntual; no obstante después que las descargas alcanzaron el sitio del sensor no. 29 y empezaron a alejarse

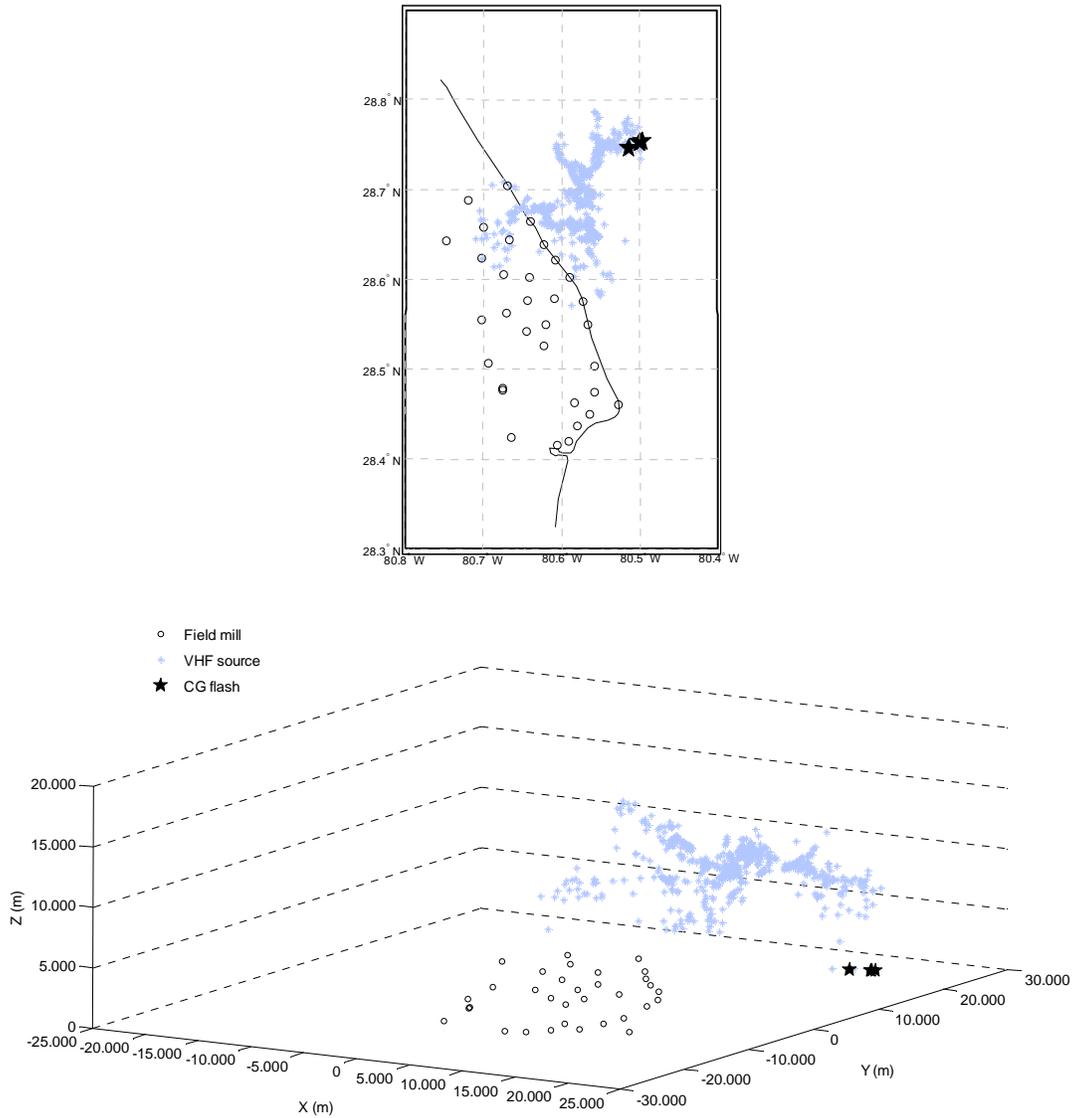


FIGURA 5.13: Ubicación de las radiaciones de VHF detectadas por LDAR en el evento 2009-07-17 (75585s) y de la detección realizada por CGLSS.

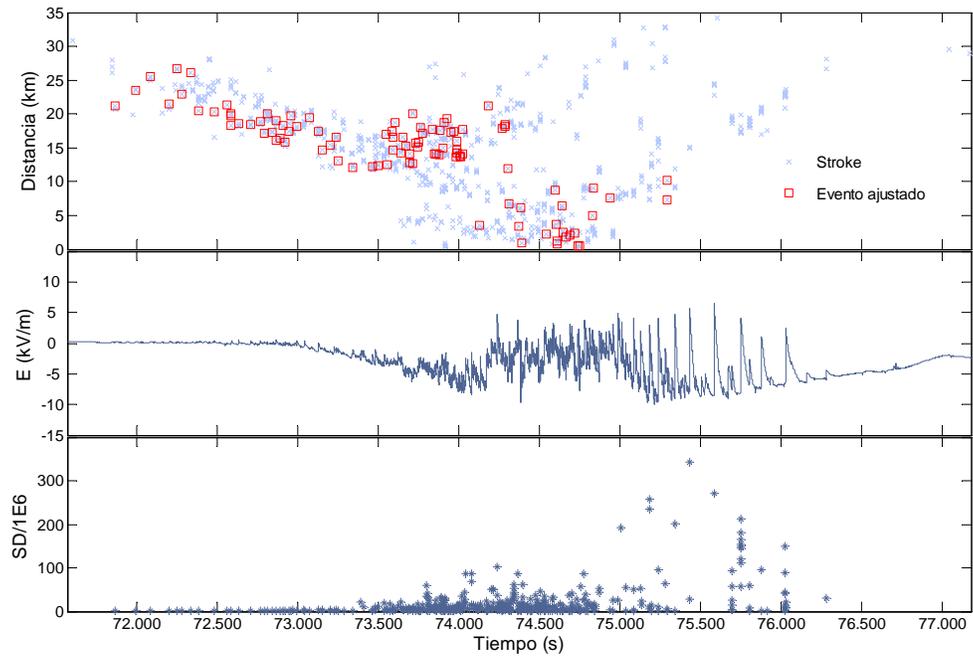


FIGURA 5.14: Diagrama de tiempo contra distancia, campo eléctrico medido por el sensor no. 10 y el parámetro SD para el episodio del 17 de julio de 2009.

se midieron ΔE muy grandes.

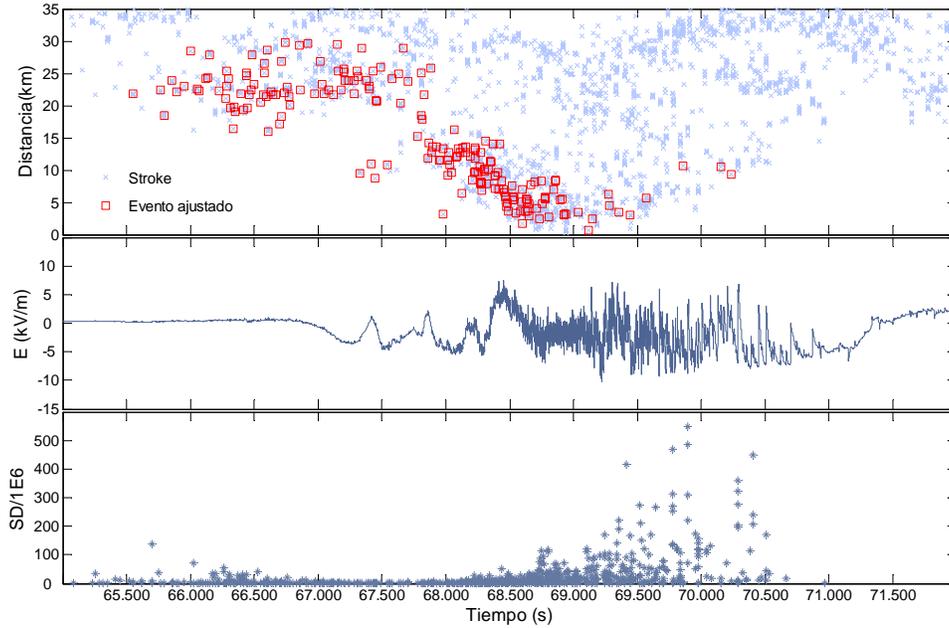


FIGURA 5.15: Diagrama de tiempo contra distancia, campo eléctrico medido por el sensor no. 29 y el parámetro SD para el episodio del 08 de julio de 2009.

5.4. Criterios para la depuración de datos

Con el propósito de identificar los rayos nube-tierra que mejor se ajustan a los modelos simplificados de carga, ya sea el modelo de carga puntual o bipolar, se programó y ejecutó el proceso de optimización comúnmente usado para encontrar soluciones de carga a partir de medidas simultáneas de cambios de campo eléctrico en Florida y Nuevo Méjico; *Jacobson y Krider* [36], *Krehbiel et al* [34, 35], *Maier y Krider* [37], *Koshak and Krider* [8], *Krider* [38], *Nisbet et al* [39], *Murphy et al* [40] y *Murphy* [10] usaron un método similar de mínimos cuadrados no lineal. En éste trabajo se usó el algoritmo de Marquardt para minimizar la función de error χ^2 (5.5), en donde ΔE_{mi} es el cambio de campo eléctrico medido en la i -ésima estación, ΔE_i es el valor calculado en base al modelo, σ_{E_i} es el error en la medición y v son los grados de libertad (número de medidas menos el número de parámetros desconocidos del modelo). En [36, 37, 8, 38, 39, 40, 10] se ha considerado una solución como aceptable si $\chi^2 \leq 10$ para el modelo de carga puntual; *Murphy* [10] encontró que usando un $\chi^2 \leq 33$ se obtenían soluciones aceptables para el modelo de carga bipolar.

El método de optimización proporciona la localización, altura y el valor de la carga eléctrica, pero también, proporciona el valor del parámetro χ^2 (5.5) que es una medida del error entre los datos medidos y los datos ajustados al modelo.

$$\chi^2 = \frac{1}{v} \sum \frac{(\Delta E_i(\Delta Q, H, x, y) - \Delta E_{mi})^2}{\sigma_{Ei}^2} \quad (5.5)$$

Para identificar los casos que se ajustan a los modelos de carga puntual o bipolar, se implementó el algoritmo descrito en el numeral 3.2.3 para todas las descargas registradas en los eventos de tormenta entre el 23 de junio y 18 de julio de 2009. Para reducir el tiempo de cálculo se eliminaron los eventos que no cumplían con los siguientes requerimientos mínimos:

- El valor del cambio de campo eléctrico es mayor a 1 kV/m en por lo menos tres molinos de campo. Este criterio es tomado de [36], en donde se discute acerca los posibles errores del método de optimización; eventos que no satisfacen éste requerimiento son considerados como no detectables por la red.
- Que se trate de eventos detectados simultáneamente por la red de molinos de campo y el CGLSS.

El propósito del presente trabajo no es estudiar los cambio de carga producidos por la descarga sino establecer un patrón de medida característico de aplicación en la calibración de sensores de campo electrostático; por tal razón, no es necesario aplicar un criterio muy selectivo para analizar únicamente los mejores casos sino definir un criterio para eliminar los casos de muy poco ajuste como el mostrado en la Figura 5.13.

En total 12837 rayos nube-tierra, durante los 9 episodios de tormenta descritos en la Tabla 5.2, fueron estudiados mediante el procedimiento de mínimos cuadrados no lineal. En general las soluciones de carga obtenidas después de hacer una selección con $\chi^2 \leq 10$ fueron consistentes en magnitud y elevación con los valores reportados por *Jacobson y Krider* [36]; *Maier y Krider* [37]; *Koshak y Krider* [8]; *Krider* [38]; *Nisbet* [39] y *Murphy* [10, 40]. La Figura 5.16 muestra los histogramas de la distribución presentada por los parámetros ΔQ y H para las soluciones de carga.

La Tabla 5.3 muestra las alturas y los valores de carga obtenidos para cada uno de los episodios de tormenta estudiados. Los valores corresponden con la media y la desviación estándar (entre paréntesis).

Los casos de mejor ajuste presentaron $\chi^2 \leq 10$, sin embargo es apropiado para propósitos de calibración incluir no solamente los mejores casos sino también todos aquellos que permitan crear una población apropiada de datos, la cual represente la tendencia general y la dispersión de las medidas realizadas por un molino de campo. La Figura 5.17 muestra un ejemplo de un caso de ajuste aceptable; el *flash* de la figura mostró su mejor ajuste con un modelo de carga puntual con un $\chi^2 = 23$; la distancia entre la posición (x, y) de la solución de carga y la detección del CGLSS fue 264 m. Eventos con buen ajuste, es decir, aquellos en los que la distancia horizontal d (desde el punto (x, y) hasta la detección CGLSS) es menor

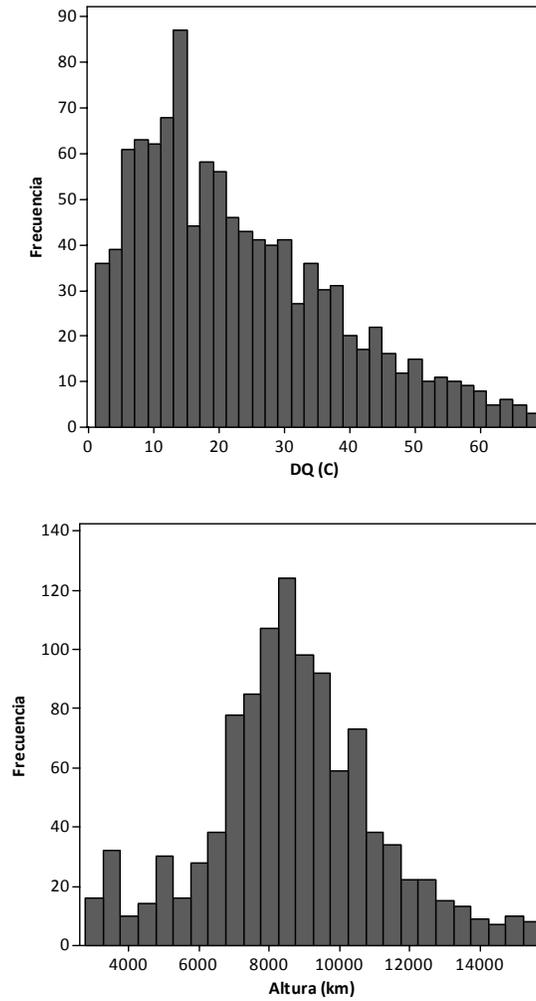


FIGURA 5.16: Comportamiento de los parámetros ΔQ y H obtenidos del métodos de optimiación.

CUADRO 5.3: Valores de carga y altura obtenidos durante los episodios de tormenta estudiados

Fecha (dd/mm/aaaa)	N	Q (C)	H (km)
23/06/2009	167	18.18 (13.51)	7.8 (1.82)
03/07/2009	117	22.64 (15.47)	9.55 (2.9)
05/07/2009	127	22.42 (16.69)	9.03 (3.3)
08/07/2009	136	26.21 (15.87)	8.16 (2.12)
09/07/2009	130	26.71 (14.74)	8.56 (2.14)
10/07/2009	126	25.95 (16.64)	9.01 (2.73)
17/07/2009	91	19.63 (11.46)	9.4 (2.28)
18/07/2009	184	23.16 (14.12)	8.47 (1.71)
TOTAL	1078	23.09 (15.15)	8.66 (2.45)

a 10 km, presentaron χ^2 que podían ser mayores a 100.

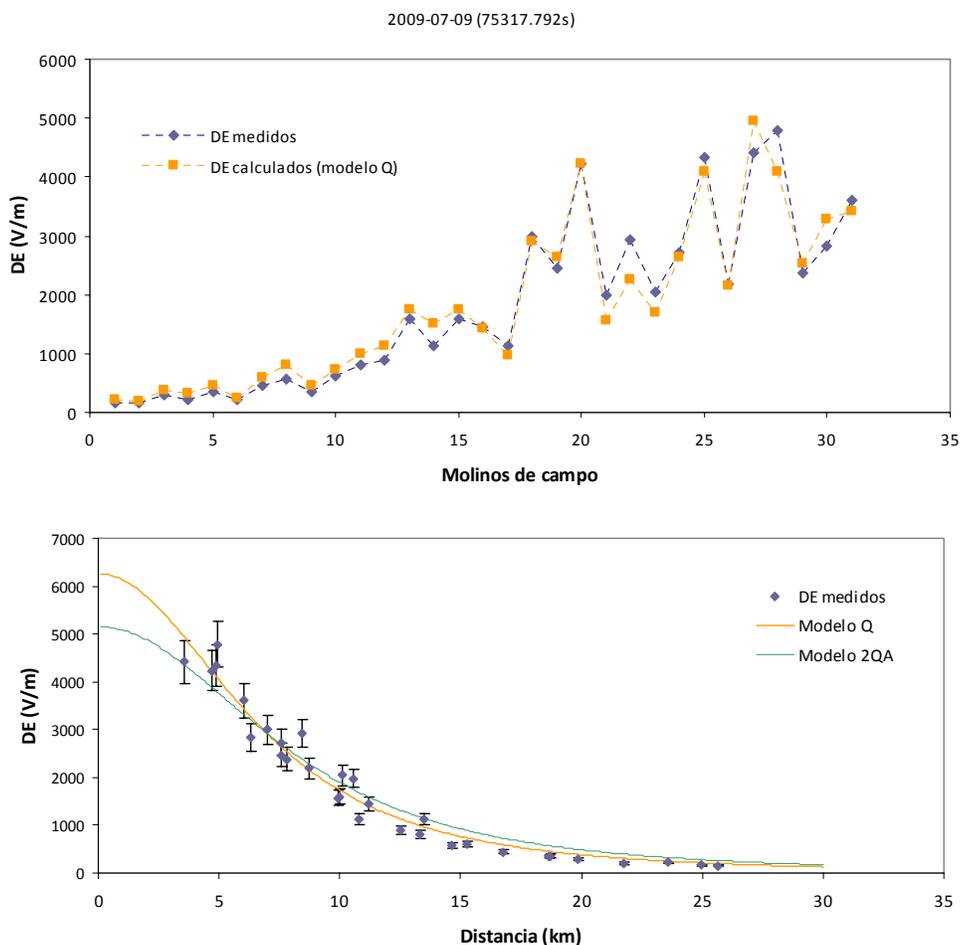


FIGURA 5.17: ΔE medidos por todos los molinos de campo durante un evento CG. En el título de la gráfica se especifica la fecha y el segundo de ocurrencia entre paréntesis. La figura ilustra el ajuste de los datos medidos a los modelos Q y 2QA.

Los parámetros encontrados para éste caso son:

- Modelo Q:
 $Q = 25,72 C$; $H = 8578 \text{ m}$
 $\chi^2 = 23$
 Error con respecto al CGLSS: 264 m
- La corriente de retorno reportada por el CGLSS fue -25,2 kA.

Por otra parte, algunos casos de mal ajuste similares a los ocurridos durante la parte final de las tormentas de las Figuras 5.14 y 5.15, presentaron un χ^2 bajo (menor a 50) indicando aparentemente un ajuste aceptable. Estos casos son principalmente producidos cuando varios de los sensores han medido cambios de campo eléctrico muy pequeños o cuando ocurren errores de calculo del ΔE debidos a los criterios de agrupación de *strokes* usados para la definición de cada *flash*; tales medidas ayudan a reducir el valor de χ^2 debido a que σ_i es comparable con los ΔE medidos.

Mediante la modificación de la función de error se puede encontrar un indicador alternativo útil para realizar el filtrado; dicho parámetro se basa en las diferencias al cuadrado - SD (5.6). SD es un parámetro que muestra mayor sensibilidad con las diferencias grandes entre los cambios de campo eléctrico medidos y calculados. En (5.6) ΔE_i es la variación de campo eléctrico calculada a partir de la solución encontrada para la estación i , mientras ΔE_{mi} es la variación de campo eléctrico medida en la estación i .

$$SD = \sum (\Delta E_i(\Delta Q, H, x, y) - \Delta E_{mi})^2 \quad (5.6)$$

En la parte inferior de las Figuras 5.14 y 5.15 se grafican los valores de SD obtenidos durante los dos episodios de tormenta. Como es de esperarse, el ajuste es mejor cuando las descargas ocurren en el interior de la red de molinos de campo; sin embargo, los diagramas no son simétricos, es decir, los valores de SD no tienen un comportamiento similar cuando la tormenta se aproxima o se aleja. Las descargas que no muestran buen ajuste comúnmente presentan un SD mayor a 10^7 .

Los siguientes parámetros fueron definidos para seleccionar los casos aceptables para ser considerados dentro del estudio de calibración:

- El valor de la distancia d debe ser menor a 10 km.
- χ^2 debe ser menor a 300.
- SD debe ser menor a 10^7 .

5.4.1. Eventos que se ajustan al modelo de carga

La Figura 5.18 muestra los ΔE medidos por todos los molinos de campo durante una descarga CG ocurrida el 5 de julio de 2009; el eje de las abscisas corresponde con la distancia entre el sensor y el lugar de ocurrencia del rayo; dicha distancia es tomada con respecto a la detección realizada por el CGLSS.

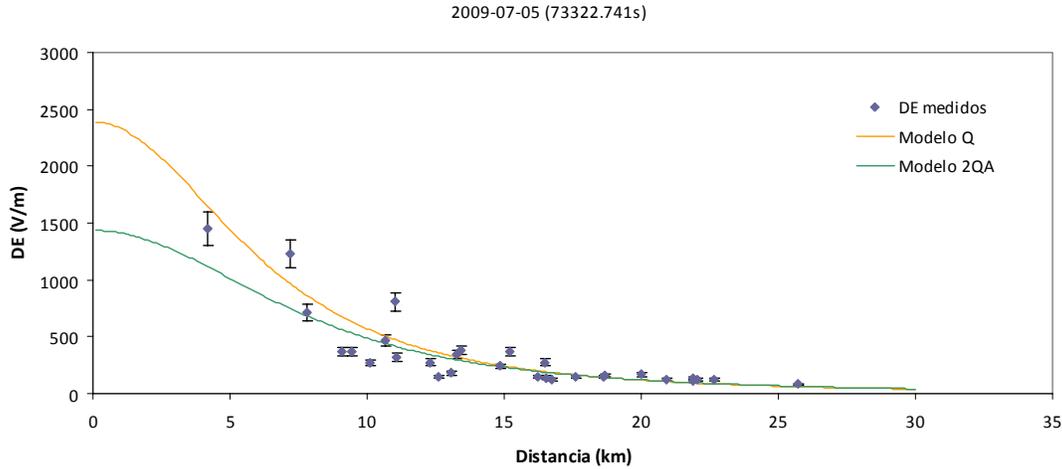


FIGURA 5.18: ΔE medidos por todos los molinos de campo durante un evento CG. En el título de la gráfica se especifica la fecha y el segundo de ocurrencia entre paréntesis. La figura ilustra el ajuste de los datos medidos a los modelos Q y 2QA.

Al realizar un ajuste a los modelos Q y 2QA con base en los ΔE medidos en forma simultánea, para éste evento se obtienen los parámetros reportados a continuación:

- Modelo Q:
 $Q = 8,35 C$; $H = 7911 \text{ m}$
 $\chi^2 = 4,82$
 Error con respecto al CGLSS: 2065 m
- Modelo 2QA:
 $Q_1 = 19,66 C$; $H_1 = 9223 \text{ m}$; $Q_2 = -12,09 C$; $H_2 = 8950 \text{ m}$
 Separación horizontal entre las cargas puntuales: 1737 m
 $\chi^2 = 4,26$
 Error con respecto al CGLSS: 2418 m
- La corriente de retorno reportada por el CGLSS fue -23,1 kA.

Los anteriores resultados concuerdan muy bien con descargas CG negativas que típicamente tienen alturas de inicio cercanas a los 8000 m y valores de carga entre 10 y 100 C [36][8][38]. El valor de la corriente de retorno reportada por el CGLSS también es coherente

con los parámetros obtenidos en la rutina de optimización.

Como se puede apreciar, los valores del χ^2 obtenidos son menores a 10, lo que indica, según [36], que los parámetros calculados para cada uno de los modelos son soluciones aceptables. El error en la localización realizada por la red de molinos de campo con respecto a la detección del rayo CG reportado por el CGLSS, no supera los 3 km lo que refuerza aún más el buen ajuste de los datos con los dos modelos de carga.

Con base en los parámetros obtenidos para los modelos Q y 2QA se reconstruyó la curva ΔE vs D en ambos casos. En la Figura 5.18 puede observarse el ajuste de las dos curvas con los ΔE medidos.

El anterior caso es un ejemplo de un evento que muestra buen ajuste con los modelos de carga, por lo tanto se puede considerar como un dato válido para construir un patrón de calibración basado en las distribuciones de probabilidad descritas en el numeral 4.4.

De lo anterior podría concluirse que los eventos adecuados para estudiar la curva de calibración de los sensores son aquellos casos más cercanos con las características típicas de las descargas nube-tierra negativas; sin embargo un gran número de éste tipo de descargas presentan errores muy grandes de ajuste con los modelos de carga, es decir, valores altos de χ^2 y diferencias grandes con respecto a los datos de detección del CGLSS.

La Figura 5.19 muestra la distribución de radiaciones de VHF detectadas por LDAR durante el mismo evento CG ilustrado en la Figura 5.18. En la parte superior de la figura se ilustra el lugar de ocurrencia del evento dentro del área de cobertura de la red de molinos de campo; en éste esquema puede notarse que las radiaciones se encuentran concentradas en una pequeña área con poca distribución horizontal.

La Figura 5.19 muestra también la distribución vertical de las radiaciones de VHF; el eje y concuerda con la dirección sur - norte mientras que el eje x corresponde con la dirección oriente - occidente. En estos gráficos pueden distinguirse detecciones asociadas con los fenómenos en el interior de la nube desde el encendido de la descarga hasta la etapa del líder, finalizando en el lugar de impacto en tierra. En este caso la mayoría de las detecciones se ubican alrededor de los 6000 m de altura aunque algunas radiaciones alcanzan los 12000 m. En la figura se ilustra igualmente la localización reportada por el CGLSS; para éste evento en particular se observa la buena correlación entre las detecciones del CGLSS y el LDAR.

Si se sobreponen sobre las anteriores imágenes las soluciones de carga puntual obtenidas del método de ajuste para los modelos Q y 2QA, se encuentra que las soluciones de carga puntual tienden a tomar un valor de altura entre 8000 y 10000 m que se aproxima al valor medio de las alturas de las radiaciones detectadas por LDAR dentro de la nube que van desde los 5000 hasta los 14000 m aproximadamente.

Lo que se puede concluir de casos como el del ejemplo anterior es que los eventos de buen

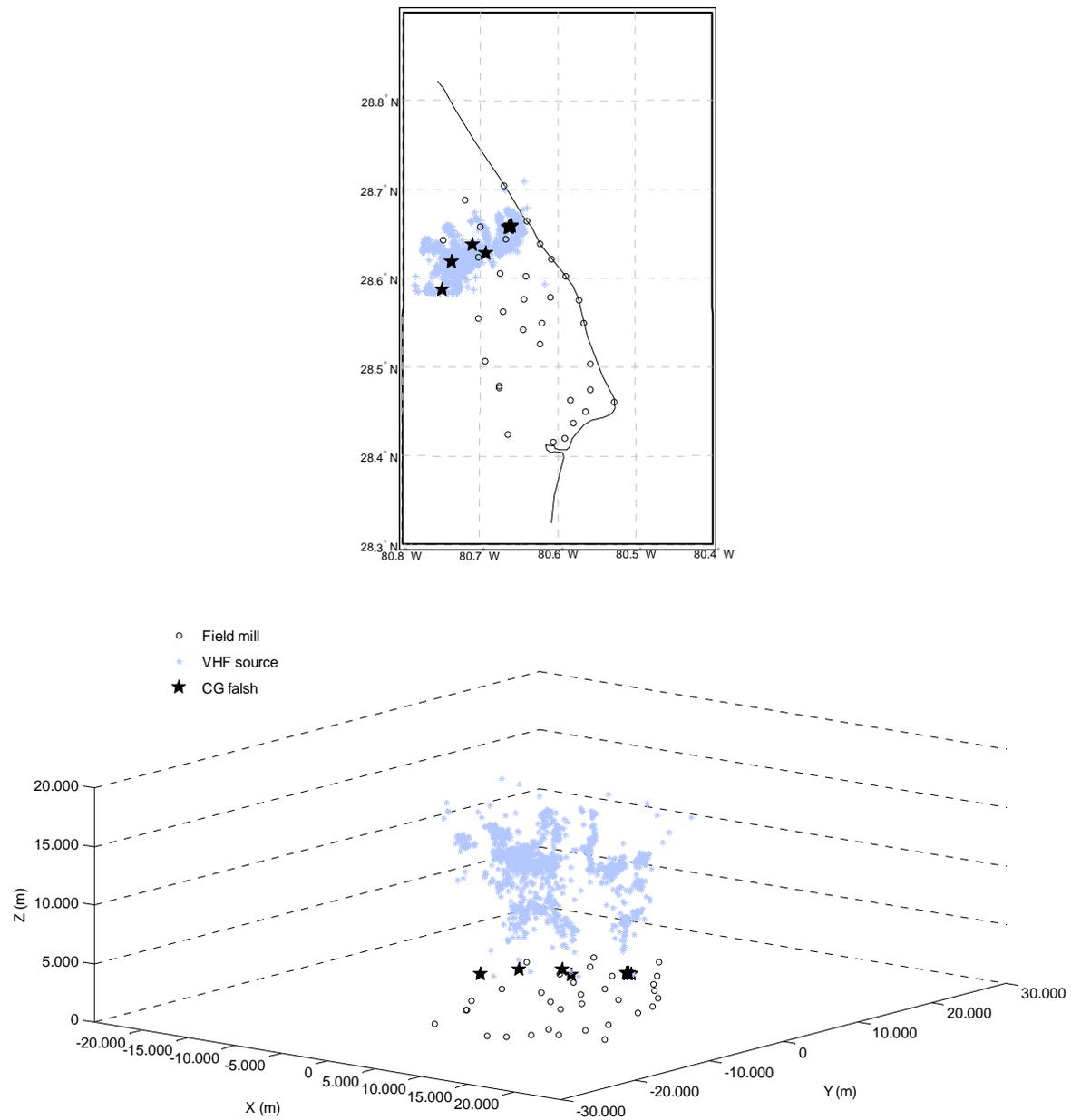


FIGURA 5.19: Ubicación de las radiaciones de VHF detectadas por LDAR en el evento 2009-07-17 (74383s) y de la detección realizada por CGLSS.

ajuste se asocian con una distribución de carga poco distribuida dentro de la nube, en los cuales es posible hacer la simplificación a un modelo de carga puntual. Como se muestra más adelante existen eventos CG en los cuales la distribución de carga en la nube tiene una extensión demasiado grande para ser representados como cargas puntuales.

5.4.2. Eventos que no se ajustan al modelo de carga

Para ilustrar el comportamiento de los casos en los que no es posible obtener un buen ajuste usando modelos de carga puntual, en la Figura 5.20 se muestra el comportamiento de los ΔE medidos por todos los molinos de campo durante un evento CG el 9 de julio de 2009. De los 31 molinos de campo, en 10 de ellos en este caso no se detecto ningún cambio de campo eléctrico, es decir el ΔE fue igual a 0.

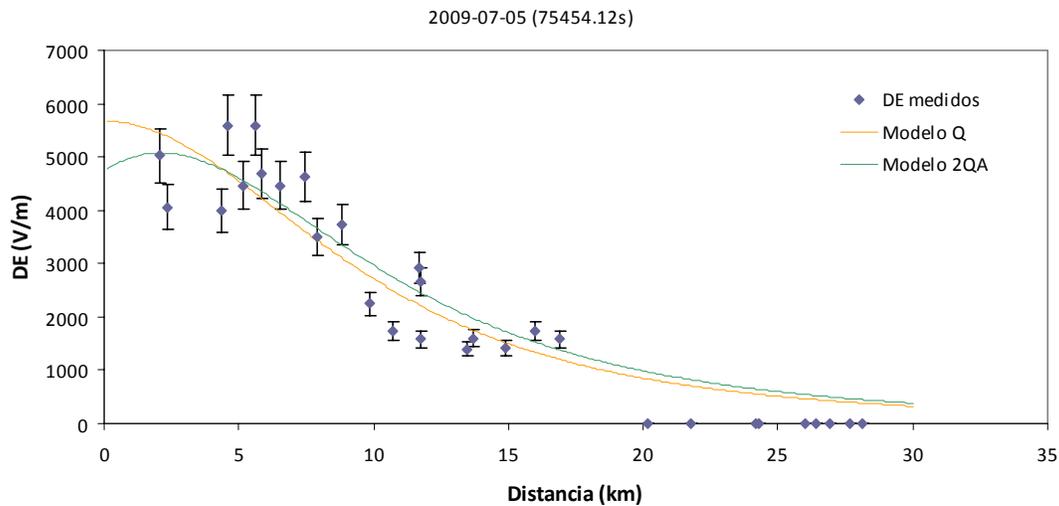


FIGURA 5.20: ΔE medidos por todos los molinos de campo durante un evento CG. En el título de la gráfica se especifica la fecha y el segundo de ocurrencia entre paréntesis. La figura ilustra el ajuste de los datos medidos al modelos Q.

Los parámetros obtenidos después de ejecutar el algoritmo de ajuste son:

- Modelo Q:
 $Q = 49,92 \text{ C}$; $H = 12555 \text{ m}$
 $\chi^2 = 494,7$
 Error con respecto al CGLSS: 12529 m
- Modelo 2QA:
 $Q_1 = 55,13 \text{ C}$; $H_1 = 13249 \text{ m}$; $Q_2 = -1,65 \text{ C}$; $H_2 = 4357 \text{ m}$
 Separación horizontal entre las cargas puntuales: 11332 m
 $\chi^2 = 506,5$
 Error con respecto al CGLSS: 13318 m

- La corriente de retorno reportada por el CGLSS fue -31,5 kA.

Para los dos modelos de carga (Q y 2QA) el χ^2 obtenido estuvo alrededor de 500. El error de localización con respecto al CGLSS fue de aproximadamente 13 km en ambos casos y la separación horizontal entre las dos soluciones de carga del modelo 2QA fue de 11 km. La Figura 5.20 muestra como los ΔE presentan un distanciamiento con los modelos Q y 2QA.

El estudio de los anteriores casos permite sacar conclusiones acerca de los criterios generales para depurar los datos en la curvas ΔE vs D con miras a establecer una curva de medida característica. Con base en lo discutido en los numerales previos se plantearon los siguientes criterios:

Los datos escogidos son aquellos que cumplen:

- Que sean eventos reportados por el CGLSS como rayos nube-tierra.
- El valor del cambio de campo eléctrico debe ser mayor a 1 kV/m en por lo menos tres molinos de campo [36].
- Los valores de altura y carga estimados para las soluciones puntuales a partir del método de optimización deben ser coherentes con los valores típicos [36][8][38].
- El error de localización (CGLSS vs molinos de campo) debe ser menor a 10 km.
- El parámetro χ^2 debe ser menor o igual a 300.

Usando los anteriores criterios se depuraron los patrones de comportamiento de los ΔE inicialmente obtenidos para los 31 molinos de campo. La Figura 5.21a muestra la distribución de los ΔE para el molino de campo no. 1 antes de realizar la depuración de datos.

En la gráfica de la izquierda los valores incoherentes pueden notarse principalmente en cambios de campo eléctrico muy grandes para distancias mayores a 10 km; también puede notarse como para distancias mayores a 10 km los ΔE pueden tomar cualquier valor entre 0 y 3 kV/m. En la gráfica de la derecha, en la cual se muestra el comportamiento de los cambios de campo eléctrico en escala logarítmica, puede notarse en forma más clara como los ΔE toman cualquier valor entre 100 y 10000 V/m para distancias superiores a 15 km.

Después de aplicar los criterios de depuración para el molino de campo no. 1 se obtiene la distribución de la Figura 5.21b. De los 2965 ΔE detectados por el molino de campo durante los 9 episodios de tormenta y que satisfacen la segunda condición de los criterios listados anteriormente, tan solo 901 cumplieron con todos los criterios de selección.

En ésta gráfica puede notarse como los valores de ΔE altos para distancias grandes (mayores a 10 km) desaparecen y se hace más evidente la dependencia de los cambios de campo eléctrico con la distancia. En la gráfica de la derecha, en la cual se usa una escala logarítmica, puede notarse como los ΔE para distancias mayores a 20 km toman valores entre 100 y 1000

V/m, mientras para distancias menores a 5 km toman valores de 1000 a 10000 V/m. La gráfica mostrada en la Figura 5.21b tiene una gran similitud con resultados de otros estudios realizados en el KSC como por ejemplo en [36] (Fig. 2).

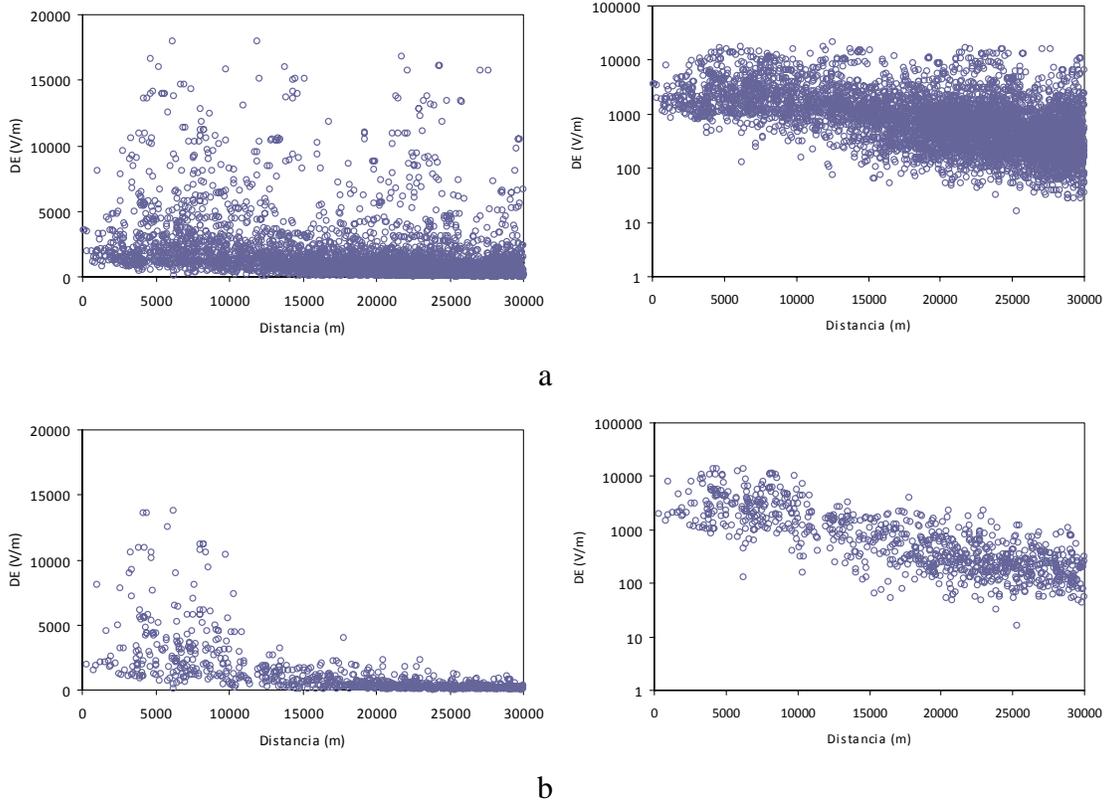


FIGURA 5.21: ΔE vs Distancia para el molino de campo 01

Nótese cómo los resultados mostrados en la Figura 5.21b se ajustan mucho mejor a la distribución teórica ilustrada en la Figura 5.4.

En general para los 31 molinos de campo se obtuvo que alrededor del 30% de los ΔE cumplían con los criterios de selección. En todos los casos se obtuvieron comportamientos similares al mostrado en la Figura 5.21b; Las curvas presentadas por todos los sensores se encuentran en el anexo A.

5.5. Parámetros del patrón de calibración

A partir de los datos depurados obtenidos después de remover los casos que no presentaban ajuste con los modelos simplificados de carga, es posible encontrar una distribución patrón

para los molinos de campo en Florida. Dicho patrón puede ser adaptado a otras condiciones para ser usado como referencia de molinos de campo en otros lugares.

Con base en los patrones de comportamiento de los ΔE para todos los molinos de campo se realizó una regresión para encontrar la relación estadística entre la amplitud de los cambios de campo eléctrico como variable de respuesta y la distancia como predictor.

De forma similar a como ocurre con la carga eléctrica neutralizada por el rayo (Figura 5.3), el ΔE presenta una distribución de probabilidad log-normal, por lo tanto, antes de realizar una regresión es necesario hacer una transformación logarítmica para representar el ΔE de la forma:

$$\log(\Delta E) \approx N(\mu_{\Delta E}, \sigma_{\log(\Delta E)}) \quad (5.7)$$

Con mediana $\mu_{\Delta E}$ y desviación estándar $\sigma_{\log(\Delta E)}$.

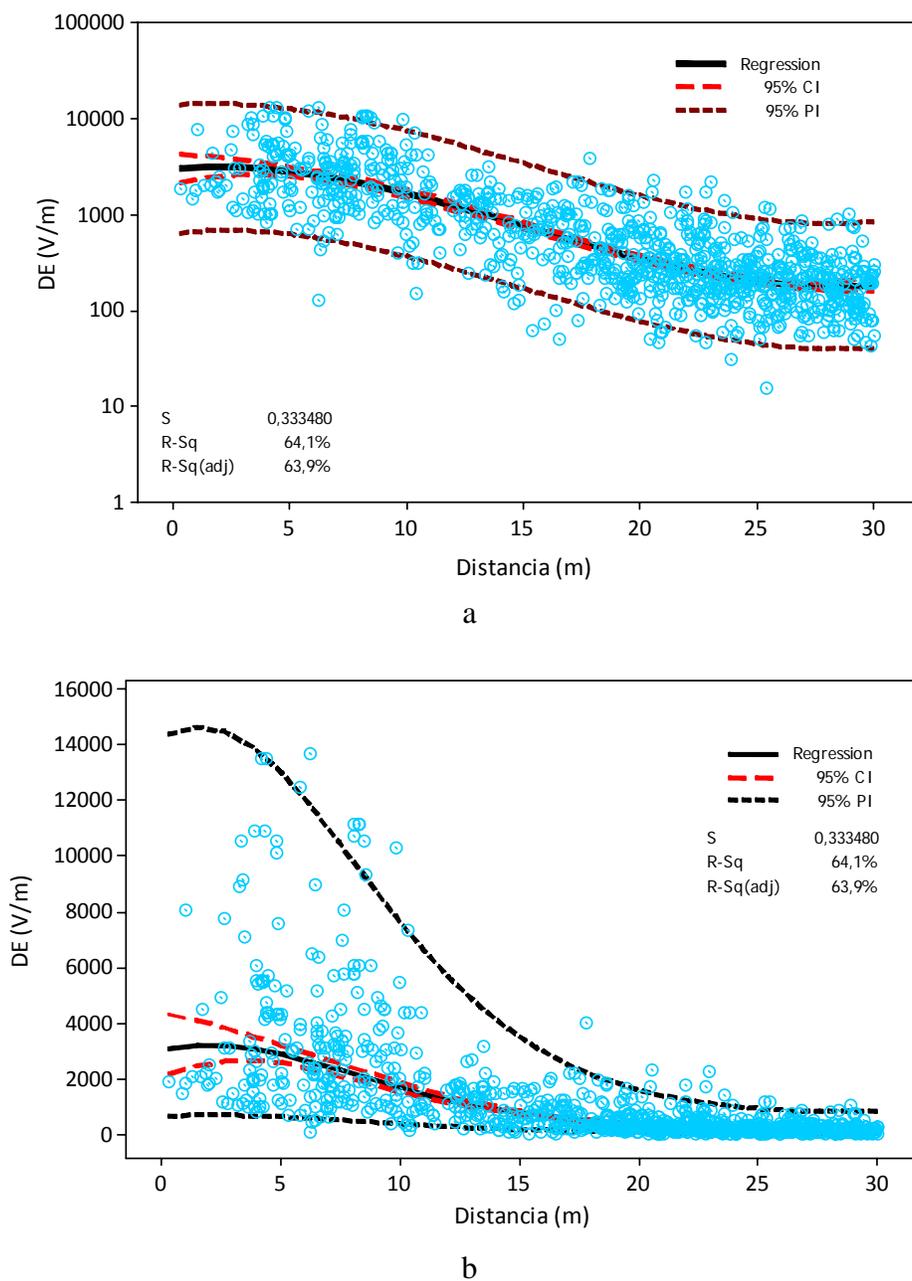
La Figura 5.22 muestra la regresión realizada para el molino de campo no. 1; en éste caso se hizo un ajuste mediante un modelo de regresión cúbica, usando como variable de respuesta $\log(\Delta E)$ y como predictor la distancia d .

Después de la linealización mediante el uso de la relación logarítmica se obtiene el ajuste descrito en la ecuación 5.8, para este caso se obtuvo un coeficiente de correlación R^2 (R-Sq en la gráfica) de 0,641 es decir que el modelo de regresión se ajusta al 64,1 % de la variabilidad de los datos.

$$\log(\Delta E) = 3,481 + 0,02341d - 0,006256d^2 + 0,000138d^3 \quad (5.8)$$

Para $D = 0$, el valor medio de ΔE es 3027 V/m; la varianza de $\log(\Delta E)$ es 0.3335, lo que significa que la varianza de ΔE en $D = 0$ es 1404 V/m debajo del valor medio y 6523 por encima de éste.

El intervalo de confianza - CI y el intervalo de predicción PI son también dibujados en la Figura 5.22. Para éste caso se consideró un intervalo de confianza de 95 %, lo que significa que para una distancia dada, el valor medio del cambio de campo eléctrico va a estar dentro del intervalo ilustrado en la Figura 5.22 con una probabilidad de 95 %. Nótese que el intervalo de confianza se vuelve más amplio para distancias menores a 5 km y para $D = 0$ el valor medio de ΔE puede tomar cualquier valor entre 2185 y 4321 V/m; en ésta forma, puede interpretarse que los límites del intervalo de confianza dan una idea de los intervalos de distancia en los cuales el modelo ajustado es más confiable. Los límites del intervalo de predicción - PI definen la región para el posible ΔE asociado a una distancia con una probabilidad del 95 %. Los

FIGURA 5.22: Regresión para el ajuste de los ΔE . Molino de campo no. 1.

intervalos de predicción pueden usar como parámetro de filtrado para eliminar casos atípicos.

Todos los molinos de campo presentaron intervalos de confianza que se ampliaban para

el rango de 0 a 7 km de distancia, adicionalmente muchos sensores también mostraron un intervalo amplio para distancias mayores a 22 km. Los rangos amplios de CI para distancias cortas pueden explicarse en parte debido a que: i. En éstas distancias ocurre un menor número de *flashes*, es decir, un menor número de medidas de ΔE . ii Los posibles errores de localización tienen mayor efecto entre menor sea la distancia y iii. Para distancias cortas los modelos simplificados de carga pierden validez.

El patrón de comportamiento de los ΔE y la curva de ajuste para el molino de campo no. 1 se muestra en la Figura 5.23. Los ajustes realizados para los demás sensores de la red se muestran en el anexo A.

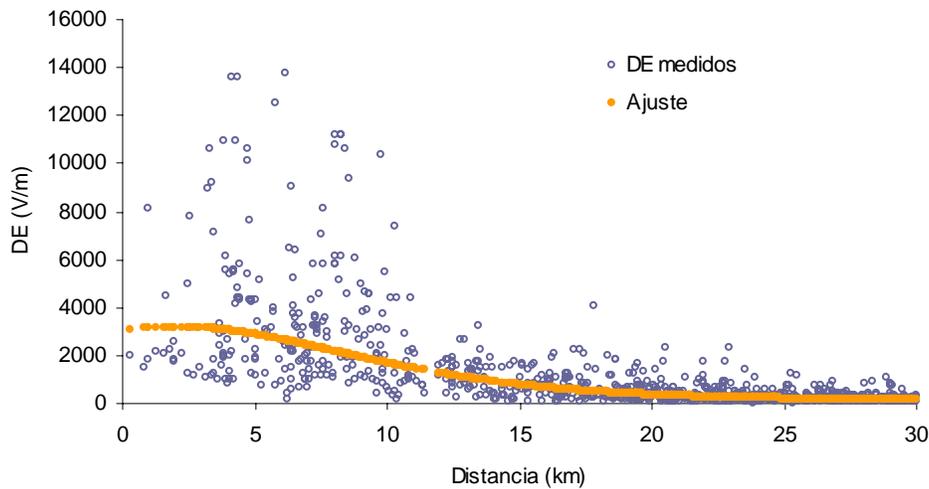
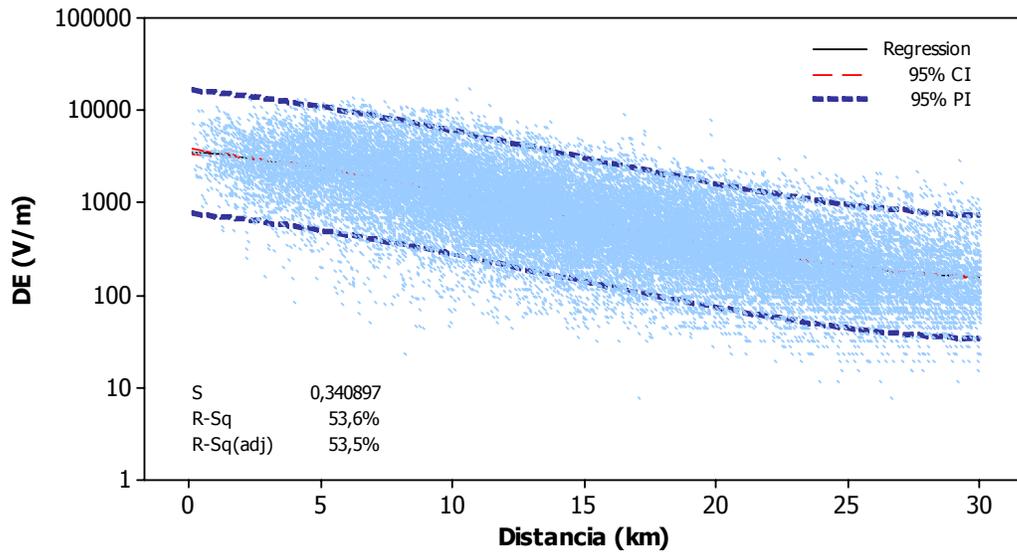


FIGURA 5.23: ΔE y curva de ajuste para el molino de campo 01.

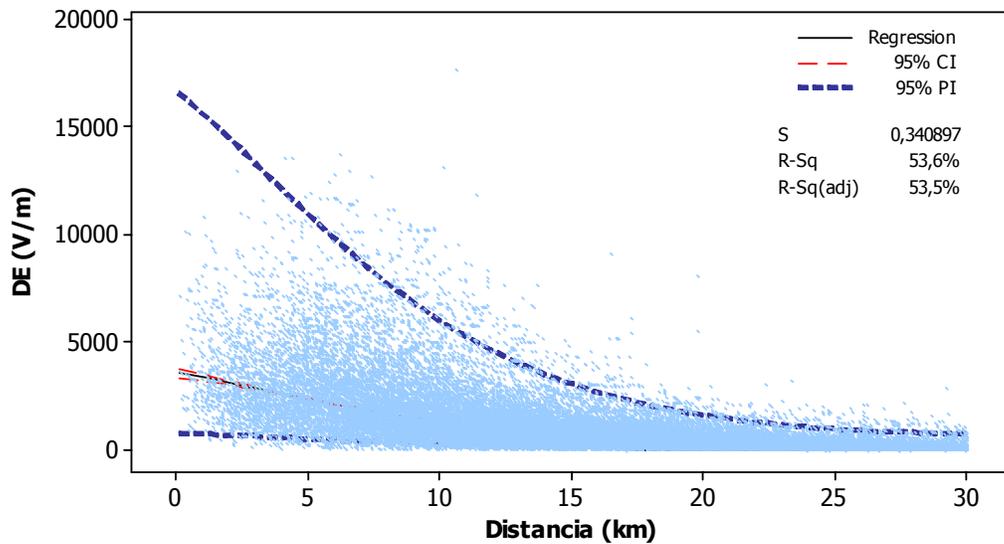
Teóricamente, si todos los molinos de campo no tienen error de sitio y sus parámetros de funcionamiento como la ganancia y el error de medida son similares, sus curvas características ΔE vs D deben ser similares. De otro lado, si los episodios de tormenta estudiados presentaron una distribución homogénea de las descargas nube-tierra en toda la red de molinos de campo, los intervalos CI y PI deben presentar comportamientos similares en cada sensor.

Una curva estándar que resuma el comportamiento encontrado en los molinos de campo puede ser obtenida creando un grupo de datos unificado combinando las 31 series. La base de datos resultante se conforma de 35529 puntos. Teniendo en cuenta que todos los molinos de campo tienen la misma instalación y el mismo factor de ganancia, la base de datos unificada puede considerarse como 35529 ΔE medidos por un solo molino de campo. La línea de regresión está dada por la expresión (5.9), D está dado en km. La Figura 5.24 muestra la distribución de los datos y el ajuste realizado.

$$\Delta E = 10^{3,554+0,0256 \cdot D - 0,00248 \cdot D^2 + 0,000061 \cdot D^3} \quad (5.9)$$



a



b

FIGURA 5.24: Número de rayos a menos de 5 km y error de ajuste para los 34 molinos.

Para $D = 0$ se encuentra que el valor medio de ΔE es 3581 V/m; la varianza de $\log(\Delta E)$ es 0.341, es decir, la varianza de ΔE es 1944 V/m por debajo del valor medio y 4253 por

encima de éste valor. Los límites del intervalo de confianza se localizan en 3355 y 3780 V/m. Los límites del intervalo de predicción se encuentran en 764 y 16600 V/m.

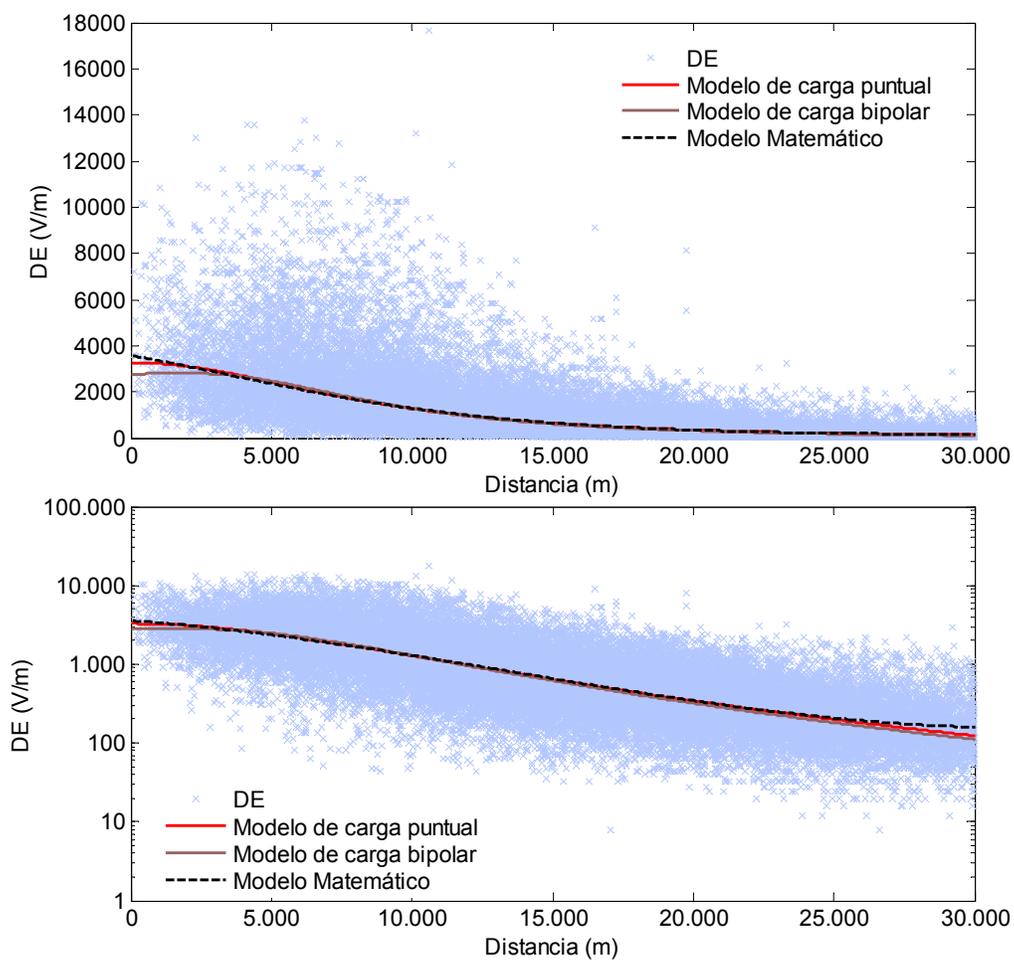
Comparando los resultados de la regresión realizada para un molino de campo solo y para las 31 series de datos unificadas, se puede concluir que las series unificadas permiten obtener un modelo de regresión más confiable con un intervalo de confianza mucho más estrecho. Para todos los molinos de campo se encontró que el intervalo de confianza para $D = 0$ tenía una variación de hasta 3340 V/m; para el caso de todos los molinos de campo juntos el intervalo de confianza presento una variación de 425 V/m. En el caso de la varianza, no se presentaron cambios representativos.

La expresión (5.9) proporciona un modelo matemático para la curva patrón; sin embargo para encontrar un equivalente físico se realizó un ajuste a los modelos simplificados de carga. El ajuste se realizó utilizando un procedimiento de mínimos cuadrados no lineal similar al usado para obtener soluciones de carga a partir de medidas simultáneas de cambios de campo eléctrico. En este caso el número de parámetros conocidos es igual a 35529, mientras que los parámetros desconocidos son 4 en el caso de modelo de carga puntual y 8 en el caso del modelo bipolar. Al igual que en los casos anteriores, el ajuste se hizo después de aplicar una transformación logarítmica a los datos. La Figura 5.25 muestra las curvas resultantes después del ajuste para los dos modelos de carga.

La Tabla 5.4 resume los modelos matemático y físicos para la curva patrón. Nótese que los parámetros de los modelos de carga puntual y bipolar son concordantes con los resultados de *Murphy* (1996)[40].

CUADRO 5.4: Resumen de modelos matemático y físicos para la distribución patrón de ΔE .

Modelo	Parámetros / valores
Modelo matemático	$\Delta E = 10^{3,554+0,0256 \cdot D - 0,00248 \cdot D^2 + 0,000061 \cdot D^3}$; D en km
$VAR(\log(\Delta E))$	0.341
$Stdev(\log(\Delta E))$	0.584
Intervalo de confianza IC	3.35 a 3.78 (0.425) kV/m (para $d=0$)
Intervalo de predicción IP	0.76 a 16.6 kV/m (para $d=0$)
Modelo de carga puntual	$\Delta Q = -20.73$ C, $H = 10681$ m
Modelo de carga bipolar	$\Delta Q_1 = -25.07$ C, $H_1 = 8976$ m, $\Delta Q_2 = 5.55$ C, $H_2 = 5946$ m

FIGURA 5.25: Modelos matemático y físicos para la distribución patrón de ΔE .

Estudio de instalaciones en montaña y terreno plano

Después de la revisión bibliográfica prácticamente no se encuentran trabajos en los que se estudie el efecto de la topografía en la operación de los molinos de campo; *Reynolds y Neill* [4] realizaron su experimento de múltiples medidas simultáneas a 2100 msnm en Nuevo Méjico; cómo resultado encuentran que la altura de las soluciones de carga es menor con respecto a la altura del terreno local, pero similar con respecto a las alturas encontradas en estudios realizados a nivel del mar. La única apreciación relacionada con la topografía es que las medidas de campo eléctrico tienden a ser mayores en lugares que no están al nivel del mar, dado que las cargas se encuentran más cerca del sensor.

Para estimar el efecto de la topografía en las medidas de campo electrostático se realizó un estudio basado en las primeras experiencias de *Wilson*(1920) [2] en terreno plano en Cambridge Inglaterra, pero ahora en terreno montañoso en diferentes lugares. El análisis experimental se basa nuevamente en el estudio de los cambios de campo eléctrico ΔE y su dependencia con la distancia.

El presente capítulo analiza el comportamiento que presentan los molinos de campo instalados en zona montañoso; para ello se estudian medidas realizadas durante episodios de tormenta con sensores de campo eléctrico instalados en las montañas de la comunidad de Navarra, España y en Bogotá, Colombia. El problema también es analizado en forma teórica mediante la realización de simulaciones de elementos finitos.

6.1. Definición del problema

En la práctica se suele asociar el efecto del lugar de instalación de un molino de campo con un factor k de amplificación o atenuación. Sin embargo es de esperarse que el efecto topográfico tenga un comportamiento más complejo.

Con el propósito de estudiar el efecto topográfico en la distribución del ΔE en función de la distancia se realizó inicialmente una simulación de elementos finitos en la cual se consideró un perfil sencillo de montaña con una altura de 1000 msnm. La pendiente promedio del perfil utilizado es de 17%.

Wilson [2] en 1920 e investigaciones posteriores con una estación de medida (ej. *Wormell* (1939) [3]) y múltiples estaciones (ej. *Reynolds y Craib*, 1955 [4]; *Jacobson y Krider*, 1976 [36]), demostraron que en su mayoría los ΔE a nivel del suelo producidos por las descargas nube-tierra pueden ser bien representados por modelos de carga puntual. Para éste caso los ΔE fueron simulados considerando una variación de carga ΔQ de -28.7 C a una altura de 8500 m y representada por una esfera de 1 km de diámetro. La esfera de carga fue movida desde una distancia de 30 hasta 0 km de la cima de la montaña en donde se supone se encuentra el equipo de medida.

El propósito de la simulación es encontrar la diferencia entre las curvas de ΔE en función de la distancia para el caso de terreno plano y el caso de la presencia de la montaña. La Figura 6.1 ilustra el perfil de montaña considerado, la esfera de carga usada para la representación de la descarga nube-tierra y la forma de las curvas equipotenciales.

Las curvas de ΔE en función de la distancia para los casos de montaña y terreno plano son mostradas en la Figura 6.2. La Figura de la izquierda muestra como se presenta un factor de amplificación k (ecuación 6.1) del campo eléctrico para el caso de la presencia de la montaña, con un valor del orden de 2 para una distancia de 0 m; no obstante puede notarse que dicho factor de distorsión no permanece constante a medida que aumenta la distancia. La imagen de la derecha muestra el comportamiento de las curvas para los casos de montaña y terreno plano en escala logarítmica; como se puede notar, el ΔE se reduce mucho más rápido con la distancia para el caso de terreno plano que para el caso de montaña.

El anterior resultado sugiere que el efecto topográfico no puede considerarse únicamente mediante una constante de corrección; de ser así, las curvas de ΔE en función de la distancia vistas en escala logarítmica deberían ser paralelas. La Figura 6.3 muestra el factor de amplificación que se obtiene en el campo eléctrico para las diferentes distancias al considerar los casos montaña y terreno plano. La curva mostrada por el factor k indica que los ΔE para $d = 0$ medidos por el sensor en montaña deberían ser corregidos con un factor de 2 mientras que los ΔE a 30 km deberían corregirse con un factor de 8.

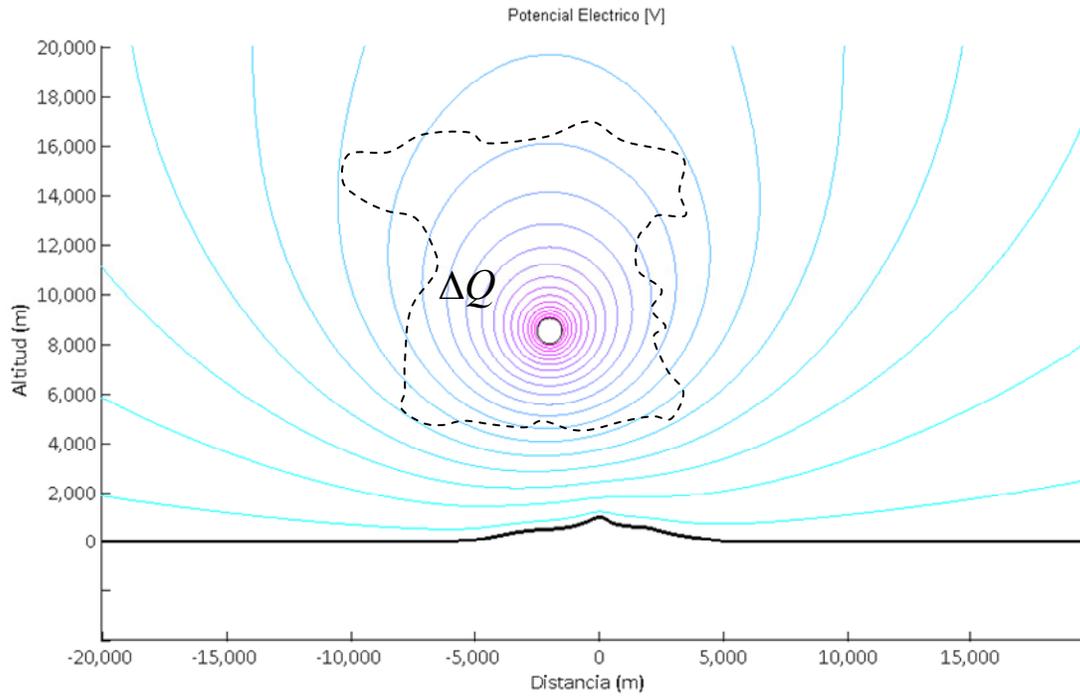
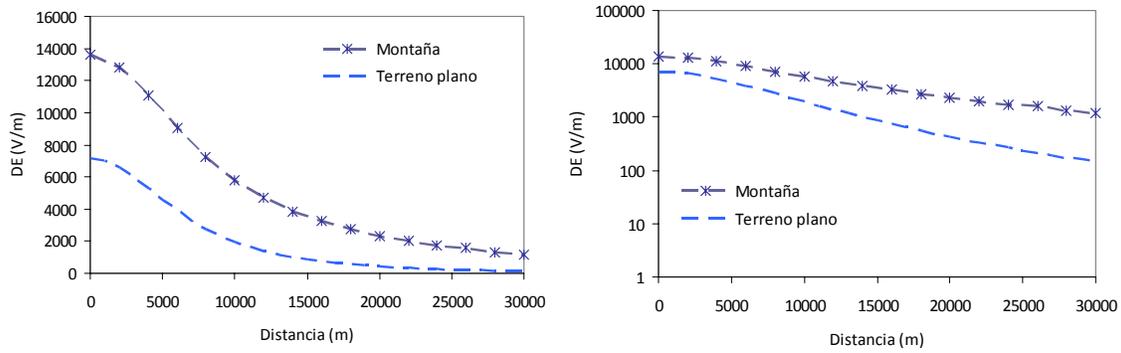


FIGURA 6.1: Efecto topográfico en la distribución del potencial eléctrico.

FIGURA 6.2: ΔE en función de la distancia para los casos en montaña y terreno plano.

$$k = \frac{\Delta E_{montaña}}{\Delta E_{plano}} \quad (6.1)$$

Una opción para poder usar los molinos de campo instalados en montaña como sistemas de alarma es hacer la corrección necesaria para que las medidas de campo eléctrico sean cercanas al caso de terreno plano, no obstante como se observa de los resultados de simulación, el problema no puede resolverse aplicando únicamente un factor constante (factor k); es necesario crear un método que incluya las no-linealidades introducidas por la topografía.

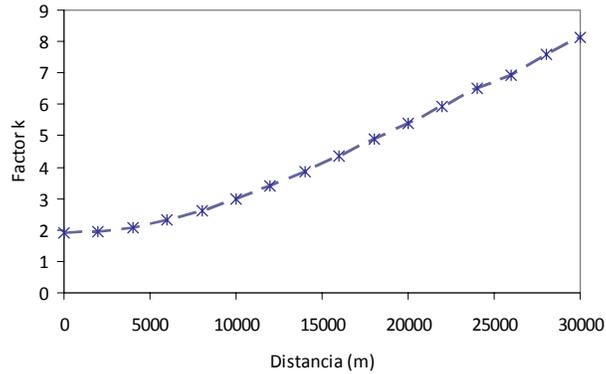


FIGURA 6.3: Factor k para el caso del sensor de campo eléctrico en montaña.

Desde el punto de vista de la calibración experimental, el análisis de patronamiento común consiste en hacer medidas simultáneas con el sensor afectado por los factores de distorsión y un sensor de referencia sin distorsiones pero lo suficientemente cerca para considerar que ambos están midiendo el mismo campo eléctrico; para ello comúnmente se han usado molinos de campo enterrados con sus electrodos de medida orientados verticalmente a nivel de suelo o antenas de plato a nivel del suelo (ej. *Reynolds y Neill* (1955) [4], *Montanyà et al.* (2004) [42] y otros). En la mayoría de los casos, por el efecto topográfico no es posible plantear dicho patronamiento; no obstante sí es posible realizar un estudio basado en dos tipos de análisis:

1. Hacer un patronamiento a partir de los rayos nube-tierra ocurridos a la misma distancia horizontal del sensor en montaña y el sensor sobre terreno plano.
2. Realizar un patronamiento basado en el comportamiento estadístico en función de la distancia de los cambios de campo electrostático; para ello se requiere un amplio número de rayos nube-tierra ocurridos en todo el rango de cobertura tanto del sensor en terreno plano como el de montaña.

El primer tipo de análisis fue probado con los sistemas experimentales en montaña involucrados en la tesis; el sistema con mejores condiciones para hacer dicho análisis es la red de sensores instalados en Navarra. Debido a que prácticamente no existen casos de un rayo a exactamente la misma distancia de dos molinos de campo, para buscar los eventos nube-tierra que ocurrieron a la “misma distancia” se usó un margen de 2 km de diferencia entre las distancias a cada sensor; sin embargo, la cantidad de eventos encontrados fue muy poca para poder hacer un análisis confiable.

El segundo tipo de análisis parte de la base de considerar que los sensores a comparar se encuentran expuestos a la misma fuente, es decir, a la misma tormenta con los mismos valores medios de carga y altura para las descargas nube-tierra. Si bien no es posible considerar un mismo rayo a la misma distancia para los dos equipos, sí es válido considerar que si una misma celda de tormenta durante su fase activa pasa en tiempos diferentes por sobre

dos sensores diferentes, y si las distribuciones estadísticas de la altura H y la variación de carga ΔQ se mantiene, la distribución de ΔE en función de la distancia debe ser la misma para los dos sensores. Adicionalmente si la mayoría de los eventos de tormenta durante una época del año dada tienden a mostrar la misma distribución estadística es posible realizar la comparación entre dos equipos con tormentas diferentes, en la misma época.

6.2. Medidas de campo electrostático en zona montañosa en Navarra, España

En ésta tesis, las primeras medidas realizadas por la red sensores de Navarra entre el periodo de diciembre de 2009 a octubre de 2010, son usadas para estudiar los factores de distorsión que presentan los molinos de campo en una instalación más habitual y la que comúnmente se encuentra en la mayoría de los molinos de campo usados para aplicaciones de alarma por rayos.

Con el propósito de comprobar el comportamiento descrito en el numeral anterior y que es derivado de las simulaciones, en la presente tesis se hace la reconstrucción de casos reales de medidas hechas por sensores instalados en zona montañosa. Gracias a la buena operación del sistema LINET, es posible reconstruir con buen detalle la trayectoria recorrida por una celda de tormenta y así mismo conocer el perfil del terreno a lo largo de la trayectoria.

Los 11 sensores en Navarra presentan una condición especial para el estudio del efecto topográfico en el funcionamiento de los molinos de campo; en un área relativamente pequeña se encuentran sensores en terreno plano y a pocos kilómetros sensores en la cima de montañas. El montaje descrito es un paso intermedio entre las condiciones casi ideales de los sensores en el KSC en Florida sobre terreno plano y las condiciones de los sensores en Colombia instalados sobre terreno totalmente montañoso. La Figura 4.18 muestra la ubicación de los 11 sensores.

6.2.1. Procesamiento de datos

Teniendo en cuenta que las distancias entre los sensores de Navarra son relativamente grandes comparadas con las de los sensores del KSC, para éste caso es necesario considerar un mayor número de episodios de tormenta para contar con una cantidad apropiada de rayos que permitan reconstruir la curva típica de operación de cada sensor.

Para el análisis fueron consideradas tormentas eléctricas ocurridas entre marzo y octubre de 2010. Durante ese periodo de tiempo se presentaron al menos 33 eventos de tormenta que se detectaron por uno o más sensores de la red. El Cuadro 6.1 resume los episodios de tormenta estudiados y los molinos de campo involucrados en cada caso. El número total de episodios de tormenta considerados individualmente para cada sensor estuvo entre 9 y 19

eventos.

Los eventos mostrados en la Tabla 6.1 no son todos los casos presentados durante el periodo estudiado sino aquellos que tuvieron mayor cantidad de descargas en el área de cobertura de los equipos. Todos los casos que presentaban rayos aislados que no podían asociarse correctamente con la ocurrencia de una tormenta en el área de cobertura fueron eliminados. Igualmente, en varios casos se presentaron errores en las referencias de tiempo entre LINET y los molinos de campo; tales diferencias fueron debidas principalmente a que las estaciones de medida no tienen un sistema de referencia local como un GPS sino que se sincronizan con un servidor de tiempo; lo que puede introducir errores. En muchos eventos fue posible identificar con precisión el error de tiempo y corregirlo; los eventos en los que no fue posible calcular el valor de dicho error fueron también descartados.

CUADRO 6.1: Episodios de tormenta y sensores involucrados.

Fecha	Número de sensor										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
20100324	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x
20100325	x	x	x				x				
20100403		x	x								
20100418	x										
20100419	x						x	x			
20100421										x	
20100429	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
20100430		x	x	x		x	x	x	x	x	
20100509		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
20100605		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
20100606	x	x	x	x	x		x				
20100608	x										
20100626		x				x	x		x	x	
20100627		x	x	x			x	x		x	
20100628										x	
20100702	x	x	x	x				x		x	
20100703								x			x
20100709		x	x	x		x	x				x
20100711	x	x	x		x	x	x	x	x		
20100720	x	x	x	x			x				x
20100721	x					x					
20100722	x	x	x		x	x	x				x
20100801	x	x	x		x						
20100802		x	x								
20100819				x					x		
20100901	x										
20100902	x	x	x	x	x		x				
20100906			x								
20100907					x	x					x
20100908						x					
20100923	x	x		x	x	x	x		x		x
20101009	x		x	x	x						
Total	16	19	19	13	12	13	16	10	9	10	10

Las tormentas presentadas varían desde casos localizados que involucran una sola estación de medida, hasta tormentas extensas que involucran las 11 estaciones. Un ejemplo es mostrado en la Figura 6.4, para el caso del 29 de abril de 2010; en este evento todos los sensores detectaron la ocurrencia de la tormenta.

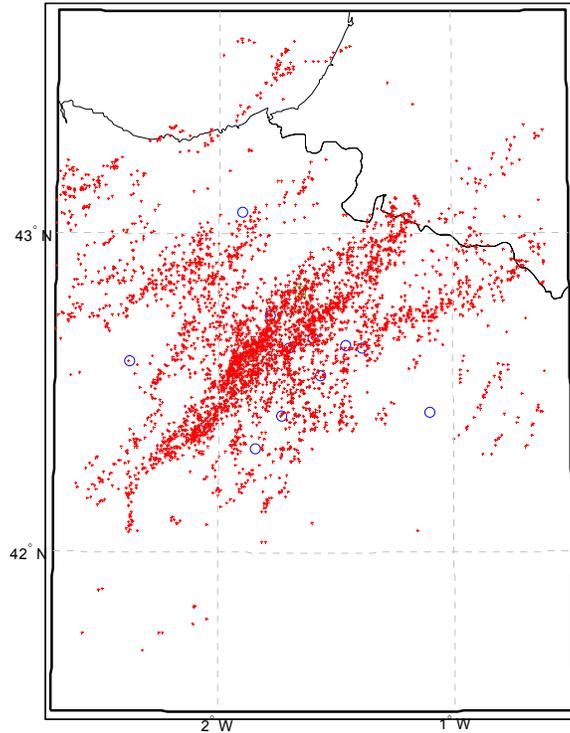


FIGURA 6.4: Tormenta presentada sobre la red de medida el 29 de abril de 2010. Los puntos rojos muestran la detección de strokes nube-tierra realizada por LINET; los círculos azules muestran la ubicación de cada molino de campo.

Los registros de campo eléctrico permiten observar que la tormenta se compuso de varias celdas que se aproximaron a los sitios de medida a diferentes horas. En varias ocasiones se observó el incremento del campo electrostático sugiriendo la presencia de carga eléctrica aunque sin presentar la ocurrencia de rayos. En la mayoría de los casos puede distinguirse en la medida de campo eléctrico la aproximación de una celda de tormenta; un ejemplo es la medida realizada por el sensor no. 6 el mismo caso del 29 de abril, mostrada en la Figura 6.5. La Figura muestra como una celda de tormenta que inicia a aproximadamente 80 km del sensor se desplaza hasta entrar en su zona de cobertura; cuando la tormenta se encuentra a menos de 15 km, el sensor la detecta mediante un cambio de polaridad debido al efecto de la carga negativa de la parte baja de la nube. Todos los sensores que tuvieron descargas nube-tierra a menos de 10 kilómetros de distancia permitieron observar una respuesta similar del campo eléctrico.

Debido al factor de amplificación producido por la topografía, la instalación sobre una edificación y en general por las condiciones del entorno, sensores como el de la estación 6 presentan cambios de campo eléctrico por descargas cercanas mucho mayores a los mostrados por los sensores del KSC. Nótese en la Figura 6.5 que para descargas a una distancia menor a 5 km se presentan cambios de campo eléctrico que con facilidad superan los 40 kV/m, el mayor de ellos alcanzando 113 kV/m.

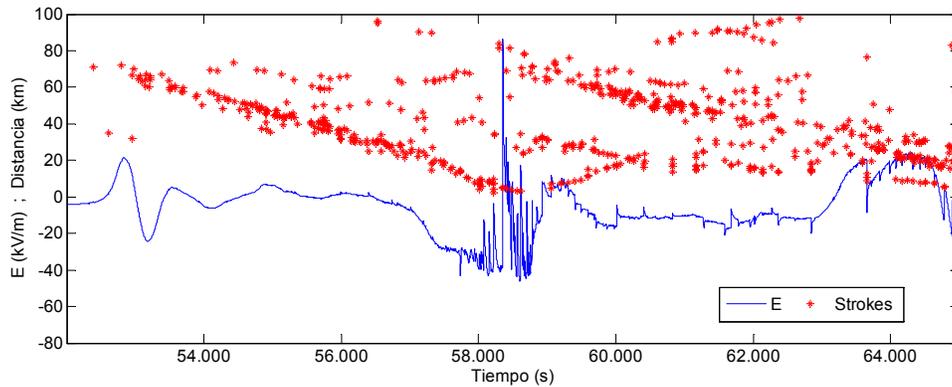


FIGURA 6.5: Medida de campo eléctrico realizada por la estación no. 6 durante un evento de tormenta el 29 de abril de 2010.

Para el cálculo de los cambios de campo eléctrico se usó el mismo método del capítulo 4 para el análisis de las medidas en el *Kennedy Space Center*. La Figura 6.6 ilustra la detección de los ΔE asociados con cada *flash*, en un segmento de la medida de campo eléctrico realizada por el molino de campo no. 6 el 29 de abril de 2010. Las x rojas ilustran el tiempo y la distancia de ocurrencia de cada *stroke*; nótese cómo *strokes* de un mismo *flash* se agrupan alrededor de un mismo cambio de campo eléctrico. En la Figura se muestran los puntos *pi* y *pf* los cuales ilustran las muestras inicial y final de cada variación. Los puntos *pi* y *pf* que se encuentran ubicados en cero, corresponden con rayos nube-tierra a más de 30 km del sensor.

La Figura 6.7 muestra otro evento de aproximación de una tormenta al sitio de medida; en éste caso se trata del sensor no. 1 el día 5 de mayo de 2010. Los datos proporcionados por LINET permiten observar el inicio de una celda de tormenta a aproximadamente 50 km del sensor, que tarda aproximadamente 50 min. en entrar en el área de cobertura del molino de campo (ver esquema de distancia vs tiempo, Figura 6.7). La señal de campo eléctrico permite observar también cómo el molino de campo empieza a detectar pequeños cambios de campo eléctrico cuando la tormenta aún se encuentra alrededor de 30 km; a esa misma distancia se empieza a observar un aumento de amplitud de polaridad positiva. Cuando la tormenta se encuentra a aproximadamente 10 km de distancia se presenta el cambio de polaridad típico.

En la parte inferior de la Figura 6.7 se muestra el comportamiento en función de la distancia de los ΔE (izquierda) y $\log(\Delta E)$ (Derecha, dados en kV/m) medidos por el sensor no. 1

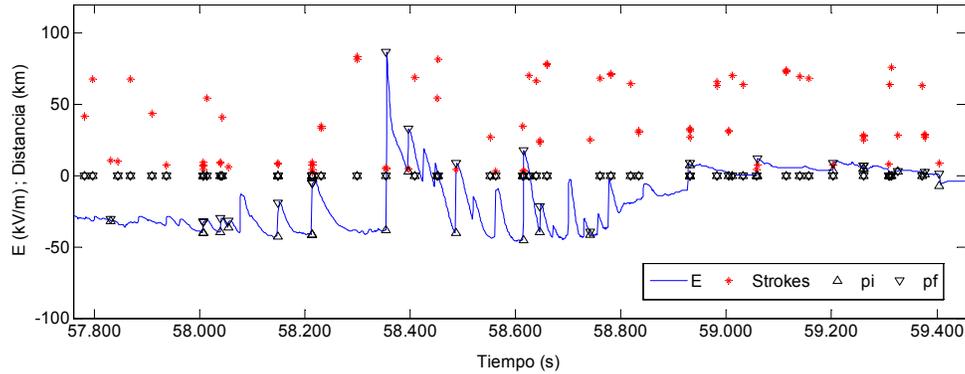


FIGURA 6.6: Comparación de variaciones de campo eléctrico vs detecciones de LINET (estación no. 6, 29 de abril de 2010). Las x rojas muestran la distancia de ocurrencia de cada stroke con respecto al molino de campo mientras la línea continua muestra el valor instantáneo del campo eléctrico.

durante el evento del 9 de mayo. Nótese que los ΔE presentan el comportamiento esperado al considerar las descargas nube-tierra como cargas puntuales (sección 4.5); las curvas obtenidas son coherentes con los resultados encontrados en el *Kennedy Space Center* (Capítulo 4) y con las referencias [2][36]. Las distribución de los ΔE en escala logarítmica muestra, además de la dependencia con la distancia, que la dispersión de los datos es aproximadamente la misma para todas las distancias, lo que avala la naturaleza log-normal de la variación de carga.

Todos los episodios de tormenta mostrados en el Cuadro 6.1 para las 11 estaciones de medida fueron analizados mediante el procedimiento descrito anteriormente. Para cada evento de tormenta se calcularon los ΔE 's y la distancia del rayo nube-tierra correspondiente detectado por LINET; posteriormente los datos de todos los eventos de tormenta fueron unificados para construir la curva característica de medida en cada estación.

6.2.2. Depuración de datos

En varios de los sensores en Navarra se presentaron valores erróneos similares a los discutidos en el Capítulo 4 para los sensores en el KSC. Principalmente valores de ΔE grandes para rayos relativamente alejados del sensor. Al realizar el análisis de regresión y correlación para encontrar los modelos físicos y matemáticos de la curva de operación característica de cada estación, se encontró que los valores no coherentes introducían errores muy grandes en las funciones de optimización; dichos errores en muchos casos no permitían la convergencia numérica de las soluciones.

Para eliminar dichos datos extremos se aplicó un criterio de filtrado similar al descrito en la sección 4.6 (Figura 5.9). Con base en la naturaleza log-normal de la variación de carga eléctrica ΔQ presentada por las descargas nube-tierra, se pueden definir límites para un ΔQ

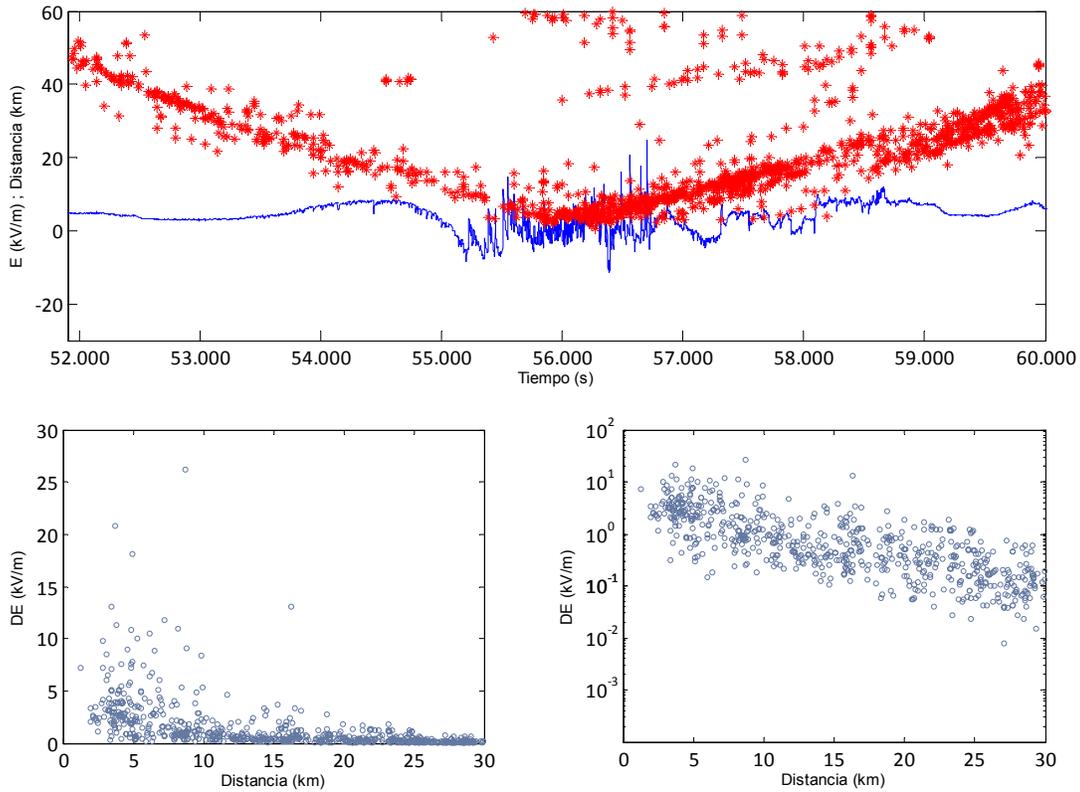


FIGURA 6.7: Campo eléctrico en la estación no. 1 y descargas nube-tierra detectadas por LINET para el evento de 9 de mayo de 2010. Arriba: Esquema de distancia vs tiempo y señal de campo eléctrico. Abajo: Comportamiento de los DE's en función de la distancia.

con una probabilidad virtualmente igualmente a cero; en el caso de la Figura 5.9 se consideró una probabilidad de 0,0001 para los límites superior e inferior. El caso de la Figura 5.9 corresponde al sensor 8 del KSC, en el cual se considera despreciable el error debido a la topografía y los elementos cercanos; los molinos de campo en Navarra por el contrario tienen errores de sitio grandes los cuales se ven reflejados en las magnitudes de los ΔE medidos.

Para la definición de los límites de filtrado se consideró una probabilidad igual a la del caso de los molinos de campo en KSC ($P(\Delta Q) = 0.0001$); sin embargo se incluyó adicionalmente un factor de amplificación debido al error de sitio. En éste caso en el modelo de carga puntual (ecuación. 5.2) se reemplazó el parámetro ΔQ por $k_q \Delta Q$. Más adelante se mostrará cómo es necesario también incluir en los modelos un factor H_m afectando el parámetro de altura H ; no obstante, para éste análisis de filtrado es suficiente con incluir el factor de modificación de la carga para obtener una curva de probabilidad virtualmente igual a cero.

La Figura 6.8 muestra la distribución de ΔE s en función de la distancia para el sensor de la estación n. 9; la gráfica se compone de 2053 puntos obtenidos después de la selección

de los episodios de tormenta que permitieron identificar en forma precisa la correspondencia entre la detección realizada por LINET y el cambio de campo eléctrico visto por el sensor.

En la Figura 6.8 se muestran los límites de filtrado para eliminar datos extremos. Un análisis de regresión preliminar permitió observar que el factor de amplificación del sensor con respecto al patrón obtenido en el Capítulo 4 (Figura 5.25) podía llegar a un valor de hasta 4. Si bien no se conoce con certeza cual es la diferencia entre los valores promedio de carga ΔQ de las tormentas en Florida y Navarra, es posible hacer una comparación en términos de la variable $k_q \Delta Q$; para éste caso se puede definir la relación:

$$(k_q \Delta Q)_9 \leq N(k_q \Delta Q)_{Patrón} \quad (6.2)$$

La relación de amplificación aproximada (Ec. 6.2) es válida para establecer los límites de probabilidad virtual igual a 0 para la eliminación de valores extremos; no obstante la definición exacta del factor de amplificación se debe hacer mediante un análisis más detallado de los modelos físico y matemático de cada distribución. Para definir los límites de filtrado del sensor no. 9 (Figura 6.8) se consideró $N=4$; más adelante se mostrará que el factor de amplificación real es menor.

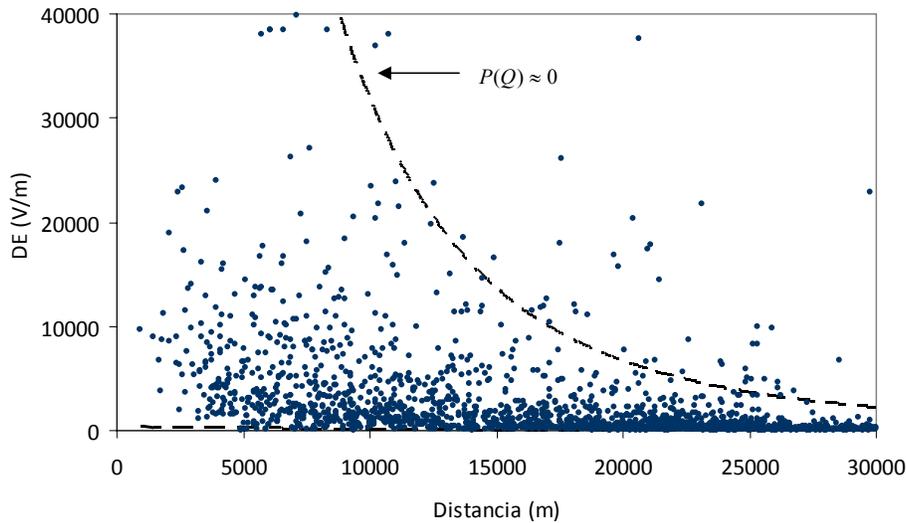


FIGURA 6.8: Distribución de ΔE 's en función de la distancia para el sensor de la estación 9. Las líneas discontinuas ilustran los límites de filtrado para datos extremos.

La Figura 6.9 muestra la distribución de ΔE s en función de la distancia para la estación 2. Para éste caso la gráfica se compone de 4318 puntos. En ésta estación un análisis de regresión inicial mostró que el valor de amplificación del ΔE medio en función de la distancia podía alcanzar valores de hasta 8; igualmente se consideró un valor conservador de $N=8$ para definir

los límites de filtrado; en las secciones siguientes se encontrará que el valor real es menor.

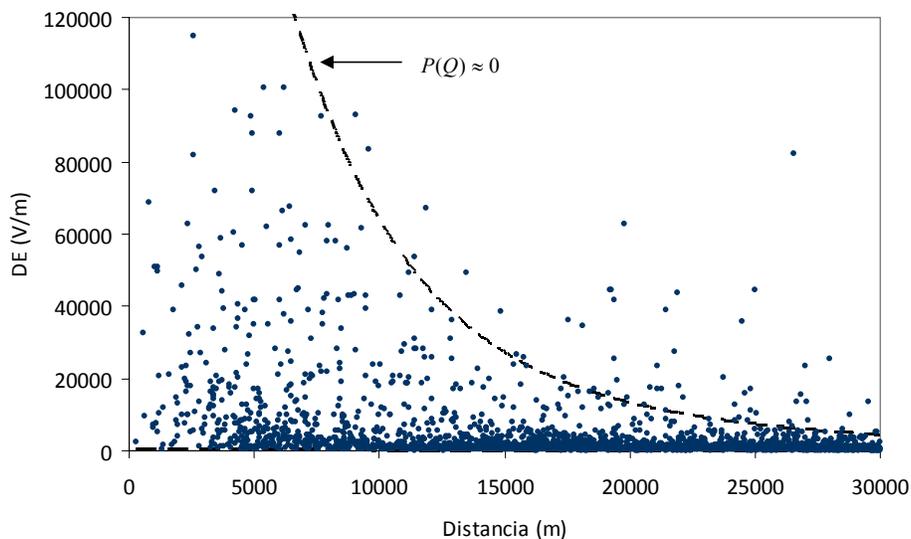


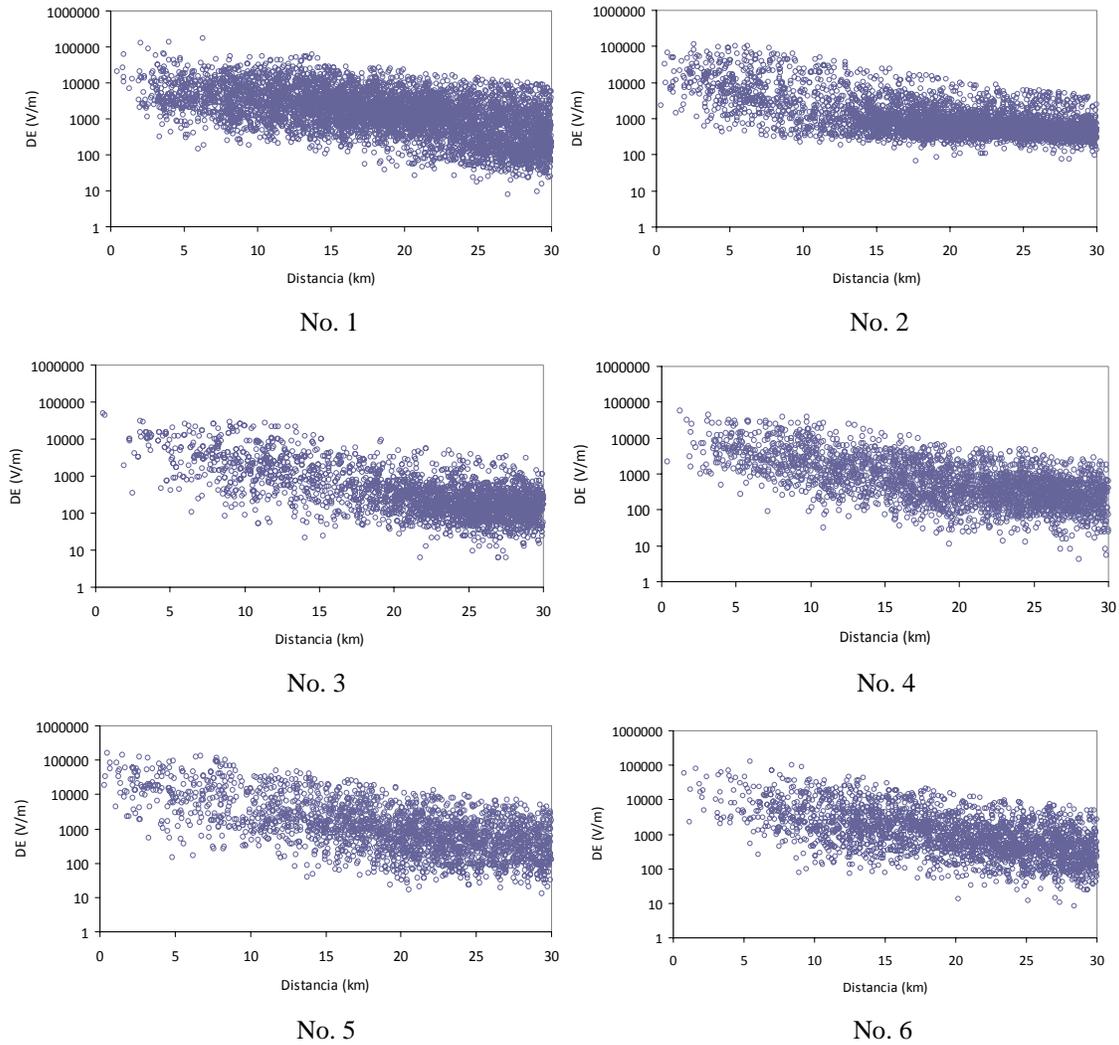
FIGURA 6.9: Distribución de ΔE 's en función de la distancia para el sensor de la estación 2. Las líneas discontinuas ilustran los límites de filtrado para datos extremos.

6.2.3. Resultados

La Tabla 6.2 resume la cantidad de eventos que finalmente conforman las curvas de ΔE en función de distancia para cada molino de campo después de eliminar datos extremos. Los eventos corresponden únicamente con descargas reportadas como nube-tierra por LINET. A excepción de la estación no. 11, en todos los sensores fue posible obtener un valor suficiente de datos para los análisis de regresión y ajuste posteriores. Las Figuras 6.10 y 6.11 muestran los ΔE en función de la distancia obtenidos para las 11 estaciones de medida.

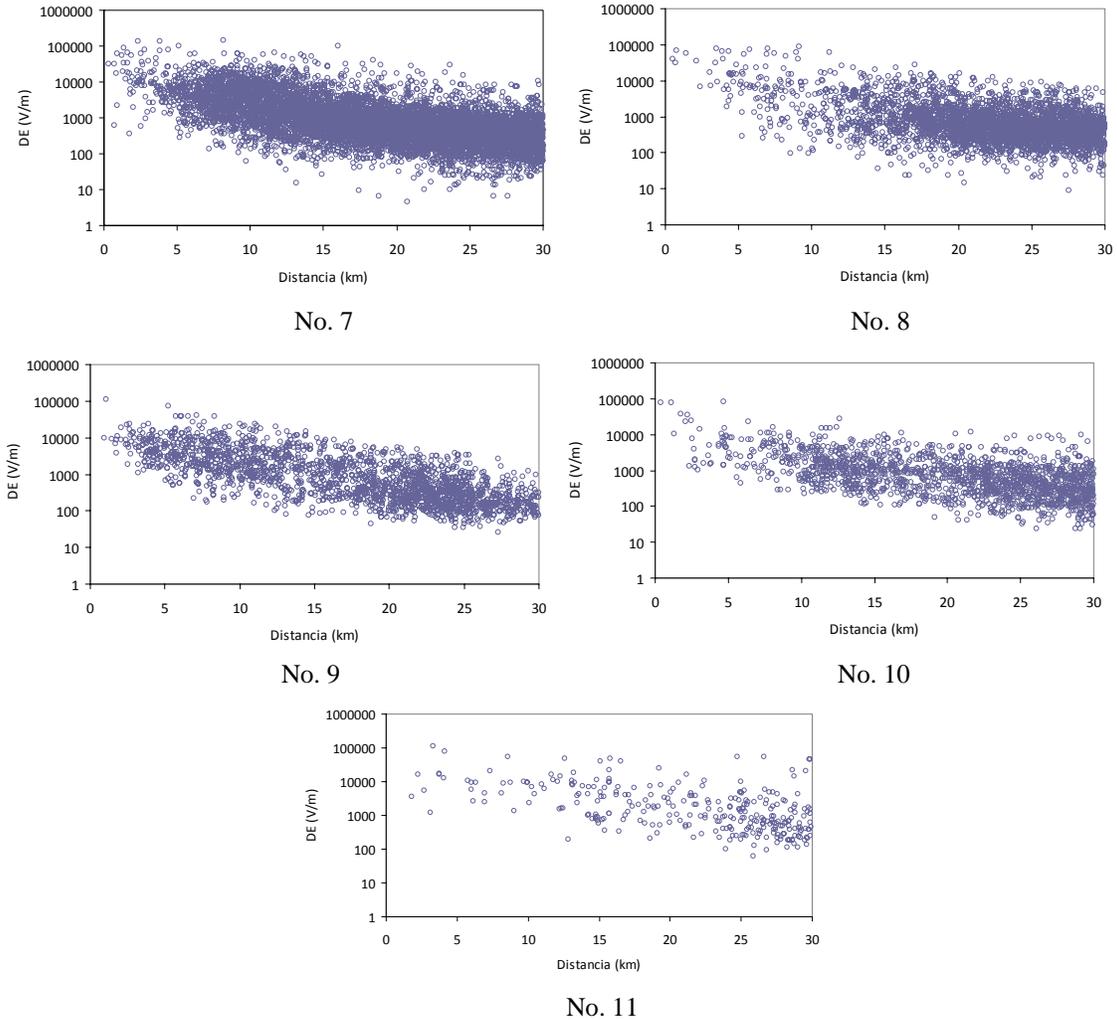
CUADRO 6.2: Número de *flashes* usados para cada estación de medida.

Estación No.	Altura (m.s.n.m.)	Número de <i>flashes</i>
1	1107	4504
2	898	4282
3	934	3967
4	811	2773
5	933	2313
6	749	2398
7	667	3580
8	426	3192
9	429	1990
10	867	1792
11	902	303

FIGURA 6.10: Distribución de ΔE vs d para las estaciones 1 a 6.

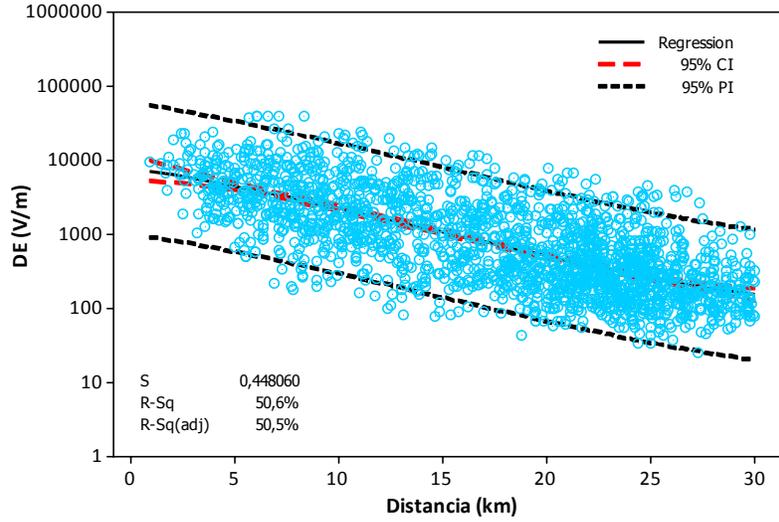
6.2.3.1. Referencia de terreno plano

Inicialmente se realizó el análisis para el sensor no. 9, el cual se encuentra ubicado sobre terreno plano y puede usarse como referencia para los sensores en montaña. La Figura 6.12 muestra el análisis de regresión en donde la variable de respuesta es $\log(\Delta E)$ (en el gráfico la escala es dada en kV/m) y el predictor es la distancia d . El mejor ajuste se logró usando un polinomio de tercer orden. El intervalo de predicción PI de 95 % obtenido se encuentra entre 0.92 y 55.7 kV/m para $d = 0$; es decir que todos los ΔE esperados ocurrirán dentro de éste intervalo con una probabilidad del 95 %. Los límites del intervalo de confianza CI de 95 % para $d = 0$ se localizan en 5.19 y 9.91 kV/m, es decir con una diferencia de 4.72 kV/m; lo que se puede interpretar como que el valor medio de los ΔE estará ubicado dentro de ese

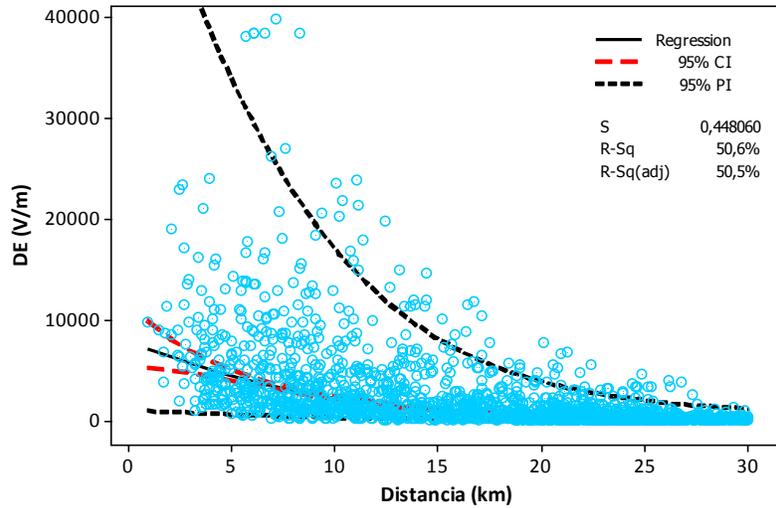
FIGURA 6.11: Distribución de ΔE vs d para las estaciones 7 a 11.

intervalo con una probabilidad del 95%. La Tabla 6.3 resume los resultados del análisis de regresión del sensor no. 9 y los compara con los parámetros de ajuste encontrados para el sistema patrón obtenido de los sensores del KSC; en esta tabla N es el número de datos, IC es el intervalo de confianza e IP es el intervalo de predicción.

La Figura 6.13 muestra la distribución de los ΔE en función de la distancia para el sensor número 9 instalado sobre terreno plano a 429 msnm. Mediante un procedimiento de optimización de mínimos cuadrados no lineal, la distribución de datos fue ajustada a un modelo de carga puntual. Como función objetivo se definió la función de error C^2 (6.3). ΔE_{ci} es el cambio de campo eléctrico calculado a partir de los parámetros desconocidos que en éste caso son la altura H y el valor de la carga puntual ΔQ . ΔE_{mi} es el valor de campo eléctrico medi-



a



b

FIGURA 6.12: Distribución de ΔE en función de la distancia y análisis de regresión para el sensor no. 9. a. Distribución de $\log(\Delta E)$ dada en V/m. b. Distribución de ΔE .

do y N es el número total de cambios de campo eléctrico; para el caso del sensor no. 9 son 1990.

$$C^2 = \sum_{i=1}^N (\Delta E_{ci}(H, \Delta Q) - \Delta E_{mi})^2 \quad (6.3)$$

Los parámetros que mejor representan la distribución de datos del sensor 9 son $\Delta Q =$

CUADRO 6.3: Comparación entre los los resultados de ajuste del sensor no. 9 y el patrón obtenido de los sensores del KSC. Los valores entre paréntesis indican el ancho del intervalo de confianza para $d = 0$.

Parámetro	Patrón	Sensor no. 9
N	35529	1990
ΔE medio ($d=0$)	3.581 kV/m	7.173 kV/m
CI 95 % ($d=0$)	3.35 a 3.78 (0.425) kV/m	5.19 a 9.91 (4.72) kV/m
PI 95 % ($d=0$)	0.76 a 16.6 kV/m	0.92 a 55.7 kV/m

32.2 C y $H = 8995$ m; la línea roja en la Figura 6.13 corresponde con los ΔE asociados con dichos parámetros. La línea negra de la Figura 6.13 corresponde con el modelo obtenido en el capítulo 4 para los sensores del KSC. Como puede apreciarse en la figura las dos líneas son casi paralelas, lo que indica que la relación entre los dos modelos es una constante que lo más probable es que se encuentre relacionada con los factores locales debidos a las características de instalación del sensor. El hecho de que las dos líneas de ajuste sean paralelas sugiere que no hay efecto topográfico en las medidas del sensor no. 9, lo cual es correcto ya que éste se encuentra en terreno plano.

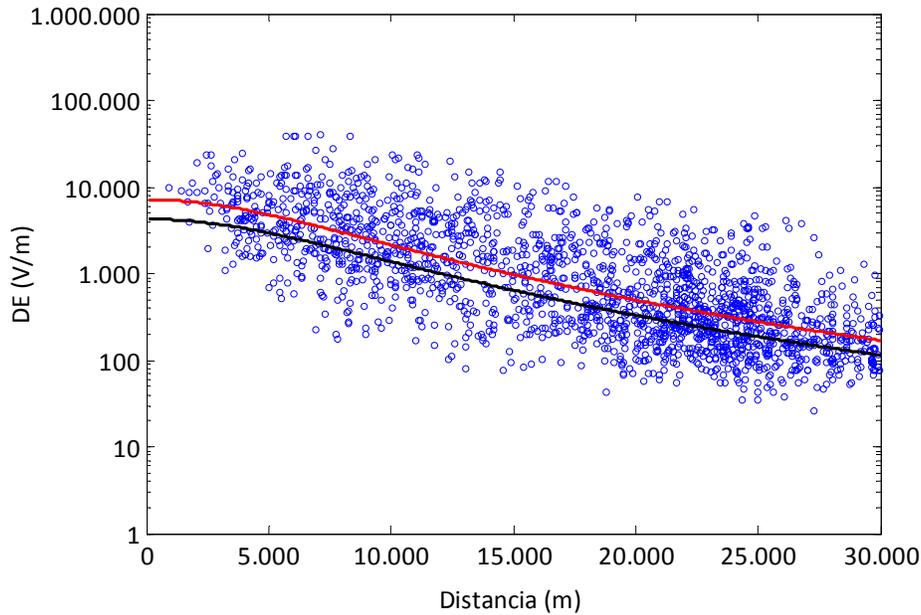


FIGURA 6.13: Distribución de ΔE y modelo físico para el sensor no. 9 y comparación con el modelo físico del sistema patrón (Capítulo 4).

Para el caso de la estación no. 8, ubicada también sobre terreno plano se obtuvo un modelo físico con $\Delta Q = 41.7$ C y $H = 8759$ m. La diferencia entre los ΔQ para los sensores 8 y 9 es debida muy probablemente a la diferencia entre los errores locales introducidos por el sitio de instalación. En cuanto al valor de la altura H se observa buena concordancia entre

los ajustes para las dos estaciones.

6.2.3.2. Análisis de simulación para la estación no. 1

En el análisis de simulación se busca reproducir eventos de aproximación de tormenta a un punto de medida, en los cuales se pueda identificar con claridad la trayectoria de la tormenta y el perfil del terreno. Para el análisis se escogió el sensor no. 1 ubicado en la parte alta de una montaña a 1107 msnm, éste sensor fue escogido debido a que el perfil del terreno es relativamente sencillo comparado con los otros sensores en montaña. El evento de tormenta corresponde con el caso del 5 de mayo mostrado en la Figura 6.7. La trayectoria de la tormenta es descrita en la Figura 6.14 por la línea discontinua. La trayectoria inicia en una región casi plana a una altura media de 420 msnm y llega hasta el sensor siguiendo el perfil del terreno mostrado en la parte inferior de la Figura 6.14.

Nótese que los sensores 8 y 9, instalados sobre la zona plana, pueden considerarse como equipos de referencia de terreno plano para el sensor no. 1.

El perfil descrito fue incluido en una simulación de diferencias finitas así como se ilustra en la Figura 6.15. Los puntos del perfil se tomaron cada 2 km para la zonas planas y cada 50 m para las partes más montañosas.

La variación puntual de carga asociada con la descarga nube-tierra fue considerada mediante una esfera de 500 m de radio ubicada a 9297 m de altura; dicho valor corresponde con el promedio de las alturas de los ΔQ obtenidos en los modelos físicos para las estaciones 8 y 9 ubicadas en terreno plano, las cuales fueron 8995 y 8760 m respectivamente, más 420 m que es la altura de las estaciones a nivel del mar. La variación carga se consideró distribuida en forma homogénea por la superficie de la esfera con un valor neto de 23.09 C. Dicha esfera se desplazó hacia el sensor desde una distancia de 30 km en pasos de 2 km.

Nótese que el valor de ΔQ considerado es cercano al valor medio obtenido en las soluciones de carga para el KSC en el verano de 2009 (Capítulo 5).

La Figura 6.15 muestra adicionalmente el comportamiento de la componente normal de la variación de campo eléctrico ΔE calculada a lo largo del perfil por la superficie del terreno; para el caso de la figura la variación puntual de carga se localizó a 15 km del sensor. Como es de esperarse, la topografía introduce distorsiones en las variaciones de campo eléctrico, en especial interesa observar el aumento que se presenta en el lugar de ubicación del molino de campo (distancia igual a 0 en la Figura 6.15).

Las variaciones de campo eléctrico obtenidas en el sitio de ubicación del sensor no. 1 para el rango de distancia entre 0 y 30 km son mostradas en la Figura 6.16; en ésta figura la distribución de los ΔE en montaña son comparados con el caso ideal de terreno plano en escalas lineal y logarítmica. Tanto en el gráfico en escala lineal como en escala logarítmica

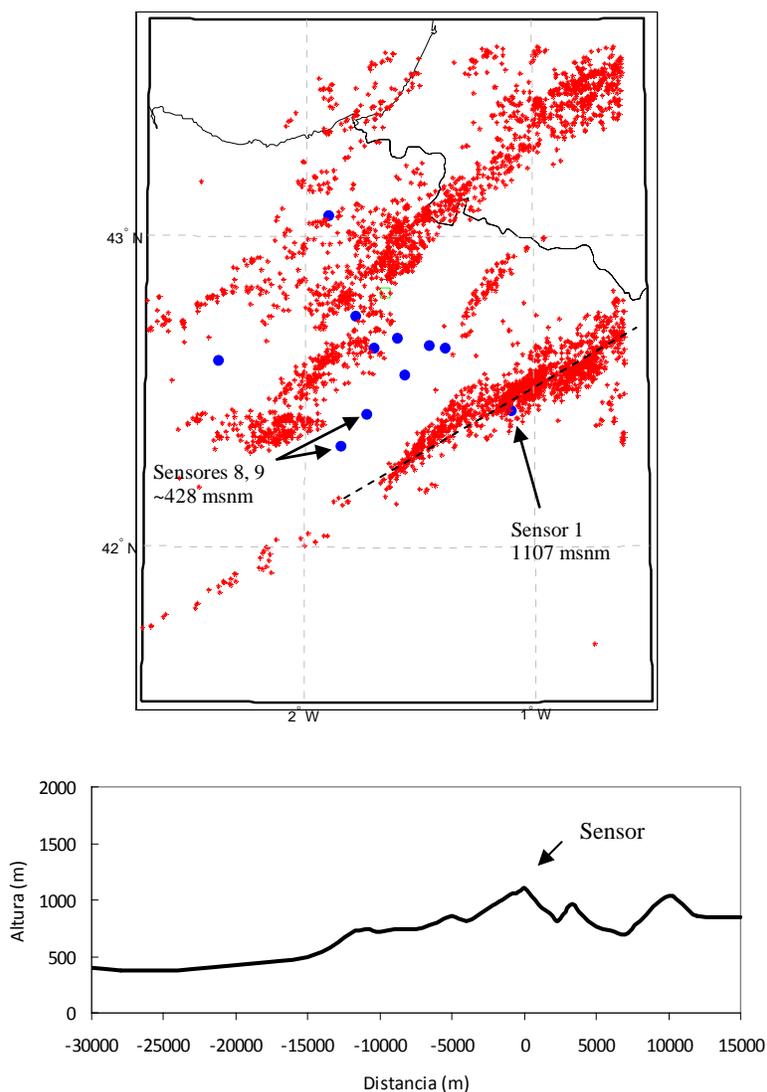


FIGURA 6.14: Caso de tormenta del 5 de mayo de 2010. Aproximación de una celda de tormenta al sensor no. 1 instalado a 1107 msnm. y perfil del terreno en la dirección de la aproximación.

puede observarse que la relación entre los casos de terreno plano y montaña no es lineal. El factor k (gráfico inferior, Figura 6.16) evidencia la no-linealidad introducida por el efecto topográfico.

6.2.3.3. Análisis de regresión para la estación no. 1

El análisis de regresión para los ΔE en función de la distancia obtenidos de las medidas realizadas por la estación no. 1 se resume en la Figura 6.17. Al igual que para el caso de la referencia de terreno plano (sensor no. 9) el análisis se hace considerando $\log(\Delta E)$ como

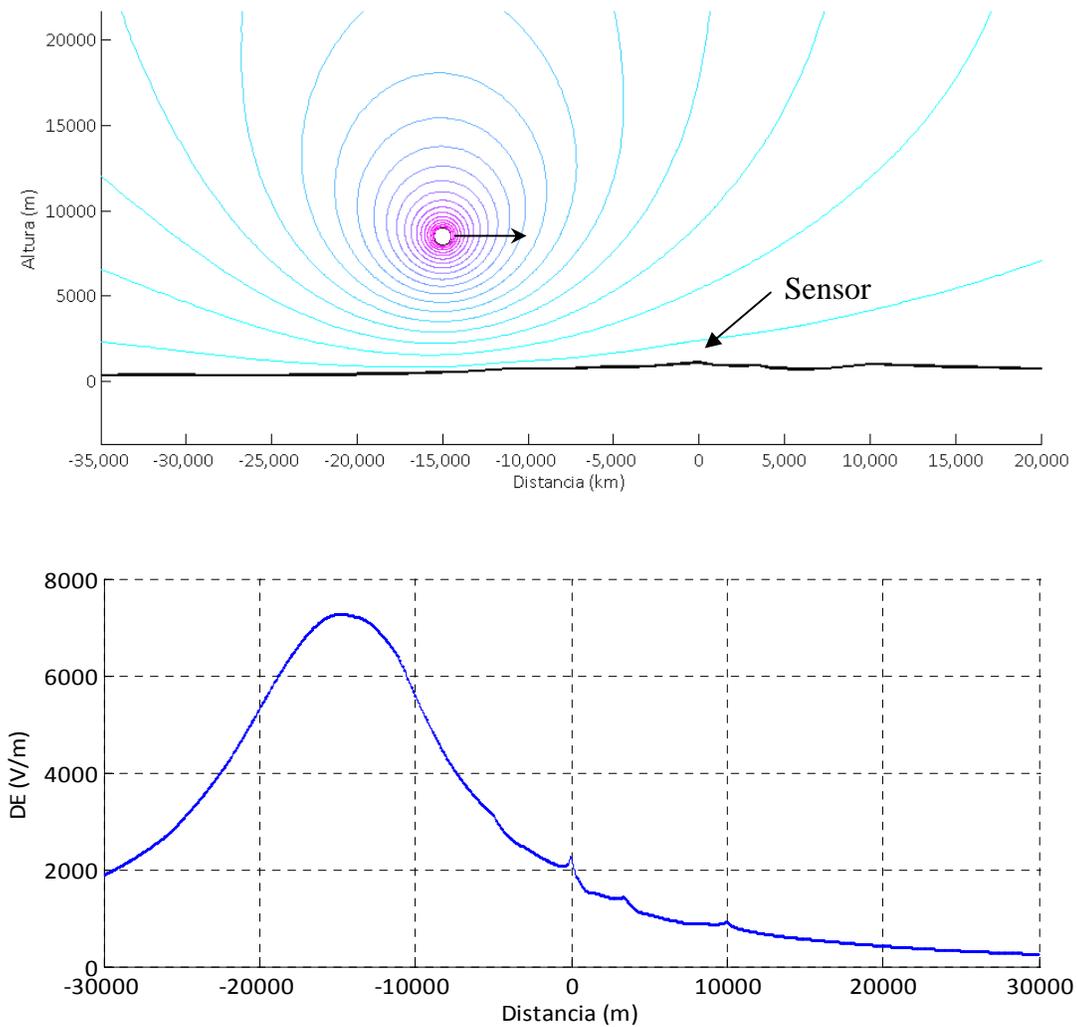


FIGURA 6.15: Simulación de campo electrostático y variación de la componente vertical del campo eléctrico a nivel del suelo en función de la distancia.

variable de respuesta y d como el predictor. El intervalo de predicción PI de 95 % se localizó entre 0.75 y 69.09 kV/m para $d = 0$; el intervalo de confianza CI de 95 % se localizó entre los límites 5.0 y 10.38 kV/m para $d = 0$, con un rango de 5.38 kV/m. Lo anterior se puede interpretar como que el valor medio de los ΔE tiene una probabilidad de 95 % de ubicarse en el intervalo descrito. La ecuación (6.4) presenta la expresión obtenida para la línea de regresión para el valor medio de ΔE .

$$\Delta E = 10 \exp [3,939 - 0,09201 \cdot D + 0,003249 \cdot D^2 - 0,000063 \cdot D^3] \quad (6.4)$$

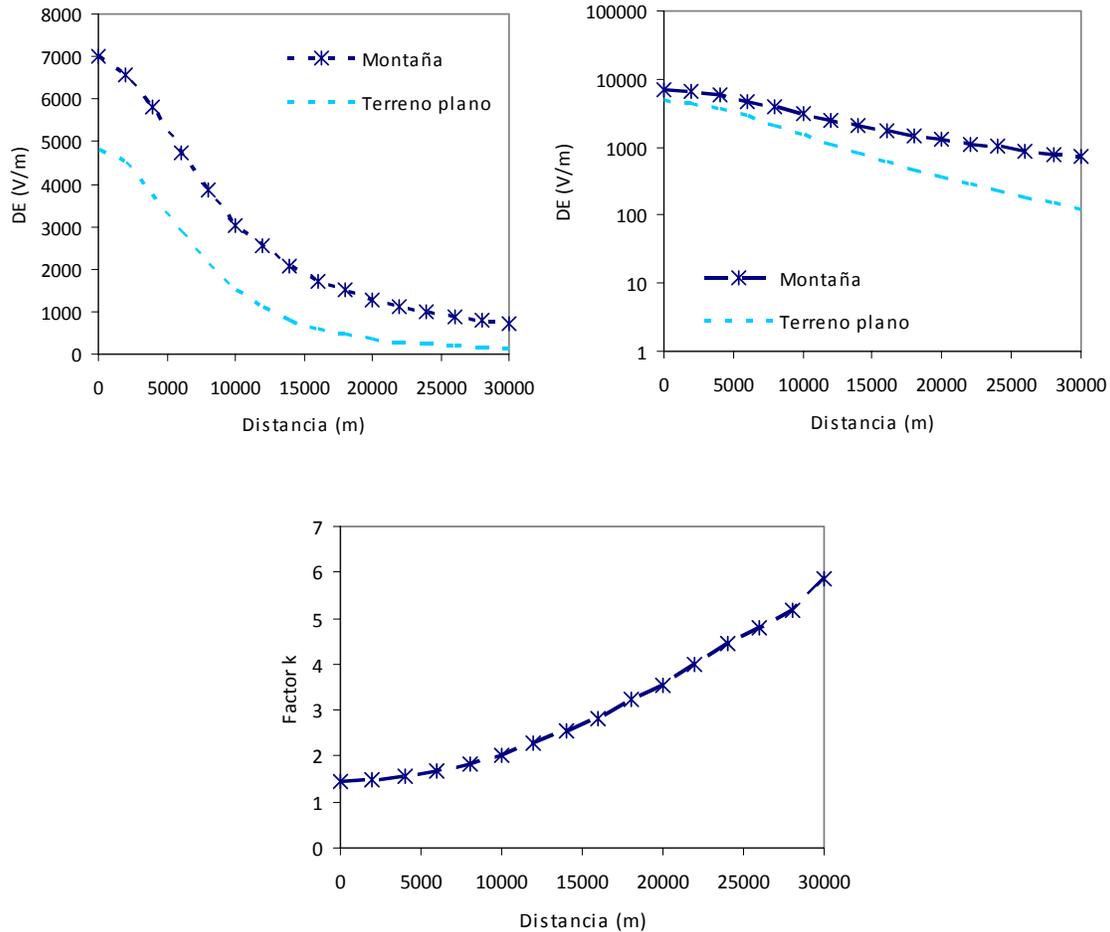


FIGURA 6.16: Comportamiento de ΔE en función de la distancia y factor k .

Como se explicó en la secciones anteriores, el efecto topográfico introduce un comportamiento en el ΔE en función de la distancia que no puede ajustarse a un modelo de carga puntual; por tal razón, para el caso del sensor no. 1 no es posible asociar un modelo físico de carga como sí se hizo para el caso del sensor no. 9.

6.2.3.4. Comparación de resultados teóricos y experimentales para la estación no. 1

En la Figura 6.18a se comparan las curvas de ΔE en función de la distancia para el caso teórico obtenido de la simulación de elementos finitos considerando el perfil real del terreno y el caso experimental obtenido de las medidas realizadas por la estación no. 1 durante el

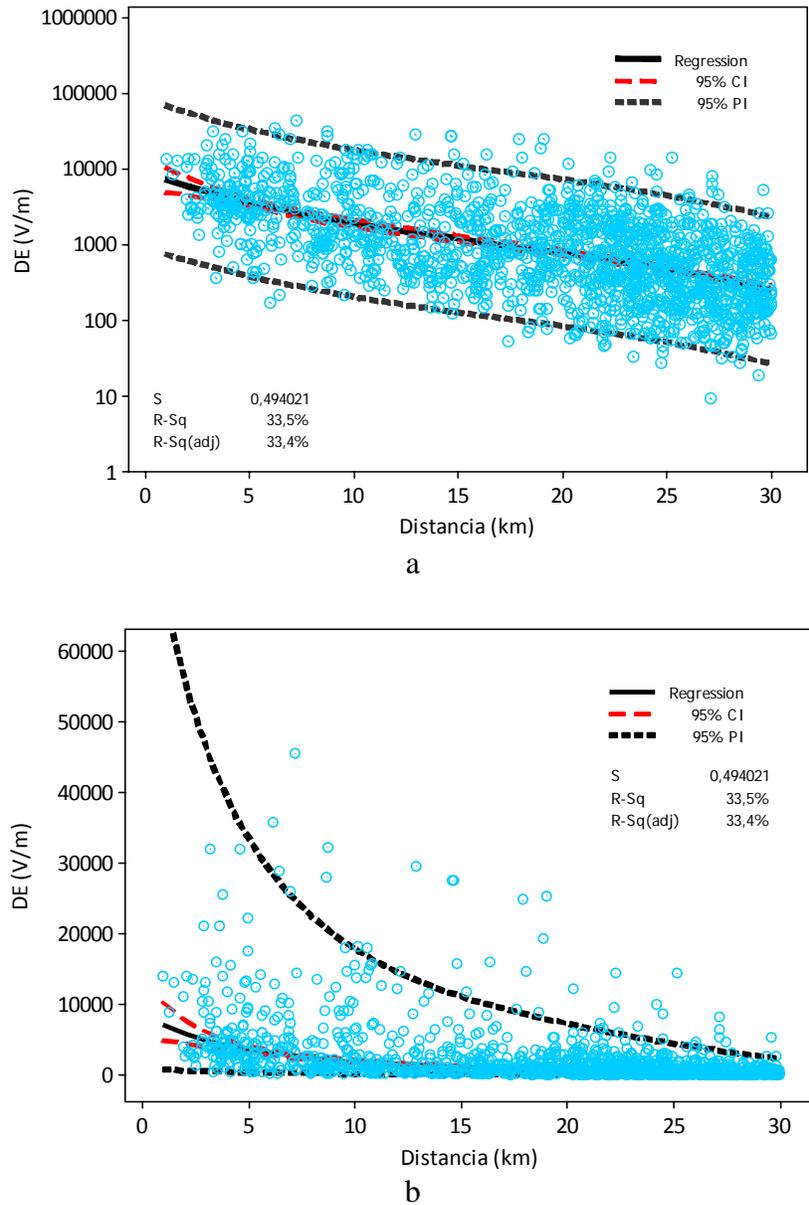
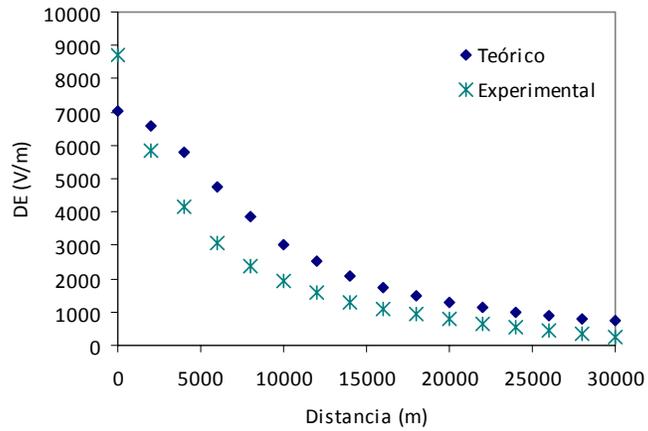


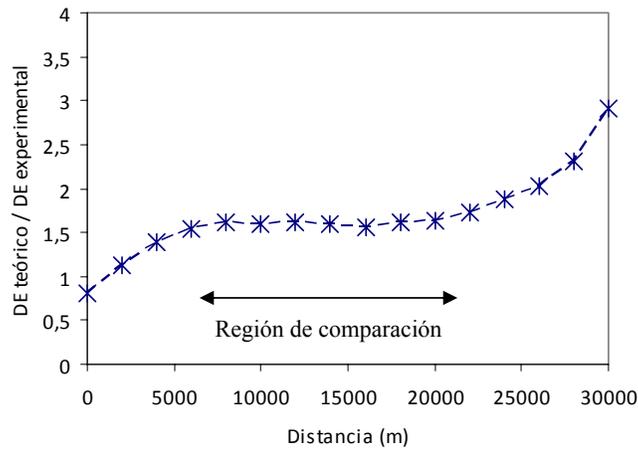
FIGURA 6.17: Análisis de regresión para la estación no. 1. a. En escala logarítmica. b. En escala lineal.

evento de tormenta del 5 de mayo de 2010. Los puntos de la curva experimental en la Figura 6.18a corresponden con la línea de regresión obtenida en la sección anterior. Para todas las distancias los ΔE teóricos presentan valores mayores a los ΔE experimentales.

Si se calcula la relación (6.5) para cada distancia se obtiene la curva de la Figura 6.18b. La relación entre ambas magnitudes no es constante, sin embargo se encuentra una región



a



b

FIGURA 6.18: a. Curva ΔE vs d obtenida de la simulación de elementos finitos (Teórico) y de la regresión realizada a partir de las medidas obtenidas por el sensor no. 1 el 5 mayo de 2010 (Experimental). b. Relación entre $\Delta E_{Teórico}$ y $\Delta E_{Experimental}$ en función de la distancia.

comprendida entre 6 y 22 km de distancia aproximadamente en la cual las dos magnitudes guardan una relación aproximada $k_c = 1,7$ ($\Delta E_{Teórico} \approx 1,7 \Delta E_{Experimental}$).

$$k_c = \frac{\Delta E_{Teórico}}{\Delta E_{Experimental}} \tag{6.5}$$

La no correspondencia entre los ΔE teórico y el ΔE experimental para el rango de distancia entre 0 y 6 km se encuentra muy probablemente relacionada con que el error producido al

considerar la región de transferencia de carga en la nube como una carga puntual deja de ser despreciable para ese rango de distancias. Este resultado es coherente con los resultados de *Wormell* (1939) [3] quien encontró una alta dispersión de los ΔE para ese mismo rango de distancias. De igual forma *Wormell* encontró que los ΔE entre 0 y 6 km se ajustaban a un modelo de carga con una altura y carga diferentes al ajuste obtenido para distancias mayores a 6 km.

Igualmente hay que recordar que la curva experimental es el resultado de un análisis de regresión en el cual se obtuvo que el intervalo de confianza de 95 % tenía asociado un rango de variación de de 5.38 kV/m para el ΔE medio en $d = 0$.

Para distancias superiores a 22 km se observa que el ΔE experimental tiende a decrecer con la distancia más rápido que el ΔE teórico. Lo anterior muy probablemente se encuentra relacionado con no-linealidad en el desempeño de los equipos para medir cambios de campo eléctrico producidos por descargas lejanas.

El valor promedio de la constante k_c considerando únicamente el rango de distancias entre 6 y 22 km es de 1,68 es decir:

$$\Delta E_{Teórico} = 1,68 \cdot \Delta E_{Experimental} \quad (6.6)$$

El anterior resultado se puede interpretar como que los efectos locales del lugar de instalación de la estación no. 1 producen que los ΔE se vean reducidos en 1,68 veces.

Si se considera a $k_c = 1,68$ como el factor de corrección que debe aplicarse a las medidas experimentales se obtiene la curva de la Figura 6.19; en ésta curva se muestran los resultados teóricos y experimentales para los casos montaña y terreno plano con respecto al sensor no. 1. La curva “Teórico” para el caso de montaña es derivada de las simulaciones de elementos finitos para el sensor a 1107 msnm; “Teórico terreno plano” es obtenida de la simulación para el caso de terreno plano a la altura del sensor de referencia no. 9. La curva “Experimental* k_c ” es obtenida después de multiplicar la curva de regresión por el factor k_c y “Referencia de terreno plano” corresponde con la curva asociada al modelo físico del sensor no 9. (32,2 C a 8995 m de altura) pero considerando la carga media (23,09 C) derivada del sistema patrón (capítulo 5).

En primera medida se puede observar como los ΔE en función de la distancia después de usar el factor k_c son concordantes con el caso teórico; sin embargo ésta mera comparación no es suficiente para avalar la coherencia entre los resultados teóricos y experimentales. Para verificar la validez de la corrección se hace la comparación del comportamiento de los ΔE teóricos y experimentales en montaña y su relación con los mismos sobre terreno plano; en la Figura 6.19 también se muestran las curvas de referencia de terreno plano usadas para los

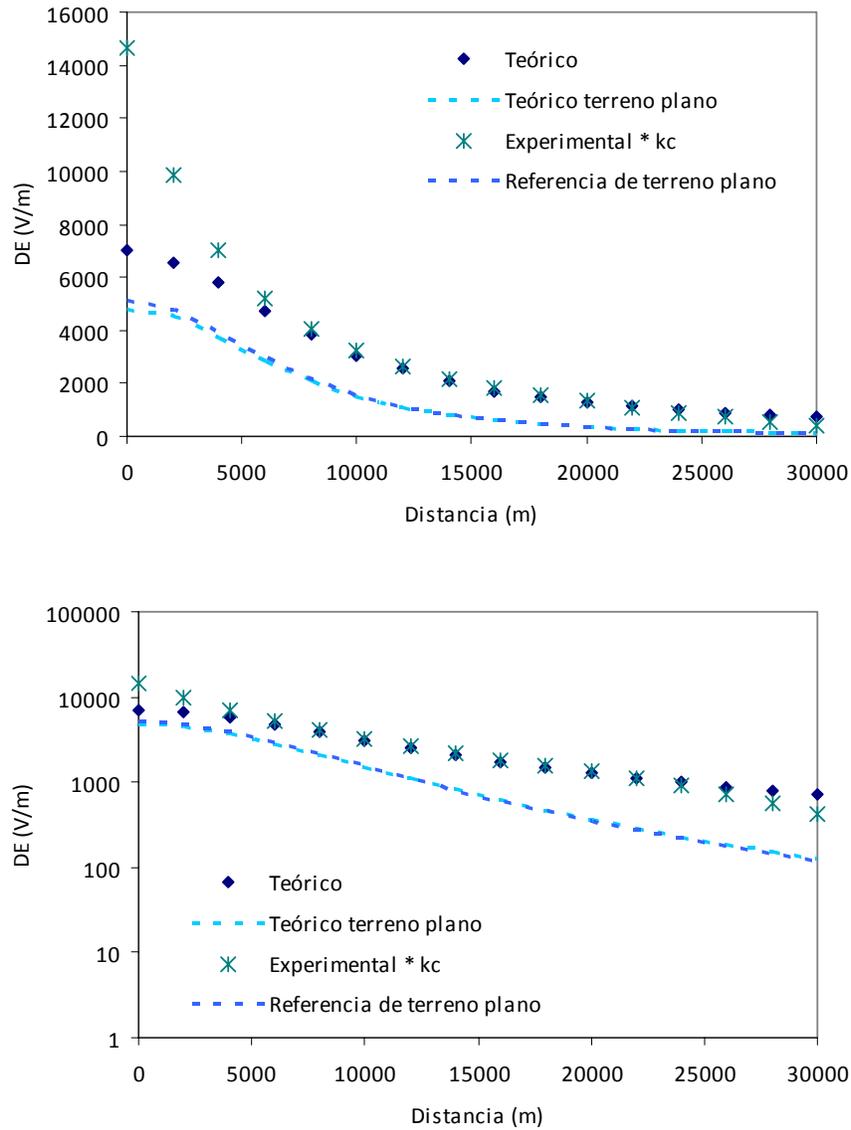


FIGURA 6.19: Comparación de resultados teóricos y experimentales para los casos de montaña y terreno plano. Teórico corresponde con los resultados de simulación para el caso montaña mientras Teórico terreno plano corresponde con el caso de terreno plano a 420 msnm. Experimental* k_c corresponde con el valor obtenido del análisis de regresión para el sensor no. 1 afectado por la constante k_c y Referencia de terreno plano corresponde con el modelo obtenido de las medidas del sensor no. 9.

casos teórico y experimental.

Como fue definido anteriormente, el factor k relaciona los ΔE en montaña y terreno plano (ec. 6.1). El factor k obtenido para los casos teórico y experimental es ilustrado en la Figura

6.20. Como se puede apreciar, los factores k teórico y experimental son concordantes en el rango de distancias entre 6 y 22 km aproximadamente.

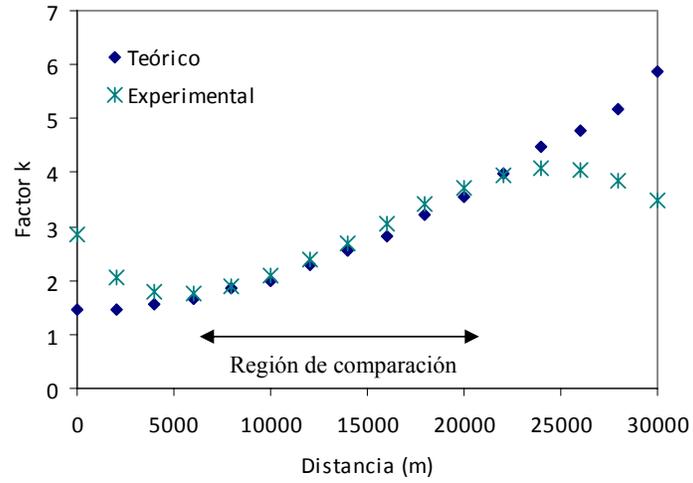


FIGURA 6.20: Factor k obtenido de los resultados teóricos y experimentales

6.3. Medidas de campo electrostático en Colombia

Durante el mes de noviembre de 2010 se observaron 16 episodios en los que el campo electrostático medido por la estación en Bogotá presentó variaciones relacionadas con la actividad de nubes electrificadas. De los 16 eventos, en 9 de ellos fue posible reconstruir el comportamiento de los ΔE en función de la distancia para descargas nube-tierra. En todos los casos se presentaron pequeños errores de tiempo entre la estampa de hora de los registros de campo eléctrico y los datos de localización de rayos proporcionados por el SID. Tales errores son debidos principalmente a que el molino de campo eléctrico no se encuentra referenciado a un sistema GPS sino a un reloj local sincronizado con un servidor NTP. Las correcciones aplicadas variaron entre 0 y 30 s. Los eventos en los cuales se presentaron rayos nube-tierra en un rango menor a 30 km del sensor y en los que fue posible hacer la corrección de tiempo sin ambigüedad son mostrados en la Tabla 6.4. En total se relacionaron 491 rayos nube-tierra con su correspondiente ΔE en el rango de 0 a 30 km de distancia.

El 29 de noviembre de 2010 se presentó una tormenta muy intensa en las cercanías del sensor; los registros mostraron un error de tiempo pero debido a la cantidad de rayos por minuto no fue posible identificar el corrimiento de tiempo sin ambigüedad.

CUADRO 6.4: Episodios de tormenta estudiados en Bogotá

Fecha (dd/mm/aaaa)	Hora local	Número de <i>flashes</i> nube-tierra
04/11/2010	13:00	149
15/11/2010	17:45	21
17/11/2010	13:37	99
19/11/2010	17:00	54
20/11/2010	12:05	38
22/11/2010	15:08	14
25/11/2010	13:00	68
27/11/2010	13:45	37
28/11/2010	13:28	11
Total	–	491

La mayoría de los episodios de tormenta se presentaron en la zona de la sabana de Bogotá en forma de celdas aisladas; la Figura 6.21 muestra como ejemplo el caso del día 17 de noviembre de 2010; en éste evento la tormenta inició a aproximadamente 140 km al nororiente y se desplazó alcanzando el punto de medida en Bogotá, atravesando la ciudad de norte a sur.

La Figura 6.22 muestra un esquema distancia contra tiempo para cada uno de los strokes de la tormenta del 17 de noviembre con respecto al sensor en Bogotá. Igualmente se muestra la respuesta del molino de campo durante la aproximación de la tormenta. El esquema permite distinguir la aproximación de una celda aislada, no obstante el campo eléctrico muestra la presencia de una nube electrificada de poca actividad de rayos antes de que la tormenta principal se encuentre en las cercanías del sensor, dicha tormenta presenta rayos aislados. La Figura 6.23 muestra una ampliación de la fase en que la tormenta alcanza el punto de

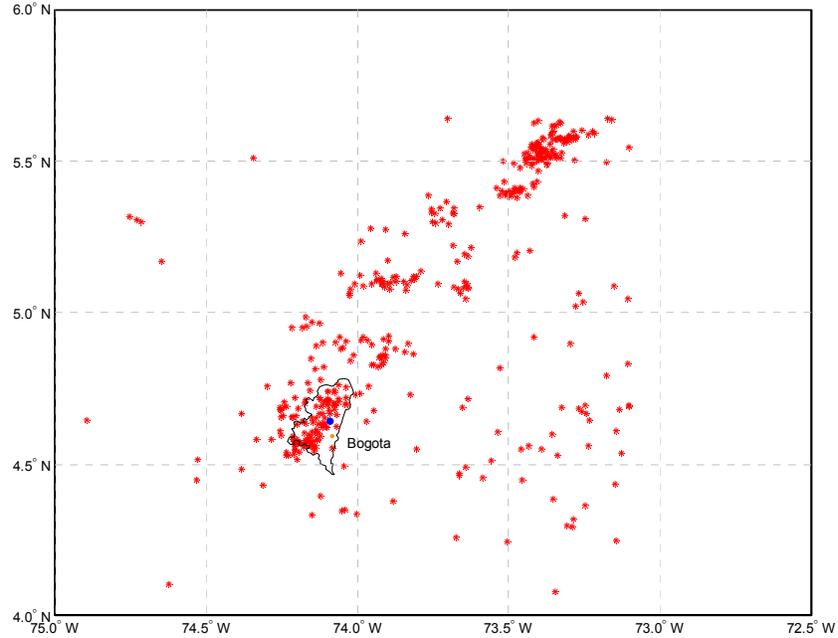


FIGURA 6.21: Detección de strokes nube-tierra realizada por el SID el 17 de noviembre de 2010.

instalación del molino de campo; los puntos pi y pf ilustran los valores iniciales y finales de cada ΔE ; prácticamente la totalidad de los strokes nube-tierra se encuentran asociados con ΔE de polaridad positiva lo que indica que los strokes transfieren carga negativa.

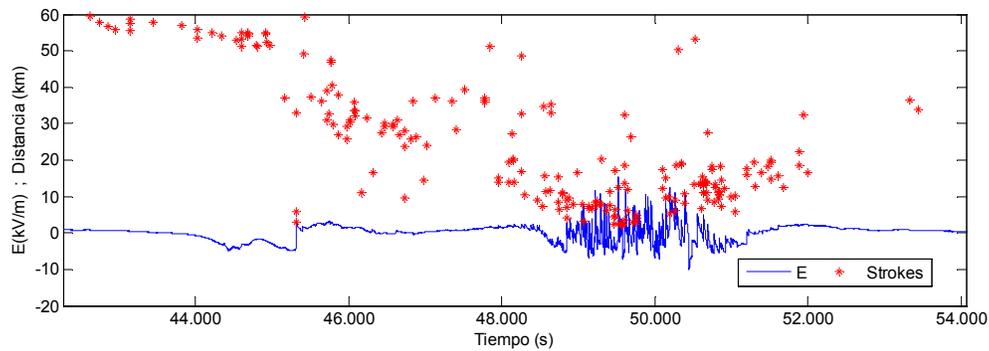


FIGURA 6.22: Medida de campo eléctrico realizada por la estación en Bogotá durante un evento de tormenta el 17 de noviembre de 2010.

La Figura 6.24 muestra la distribución de la amplitud de los ΔE producidos por los *flash-es* nube-tierra durante el evento de tormenta del 17 de noviembre. La distribución obtenida muestra concordancia con otros resultados de estudios con estaciones aisladas como *Jacobson* [36] (1976).

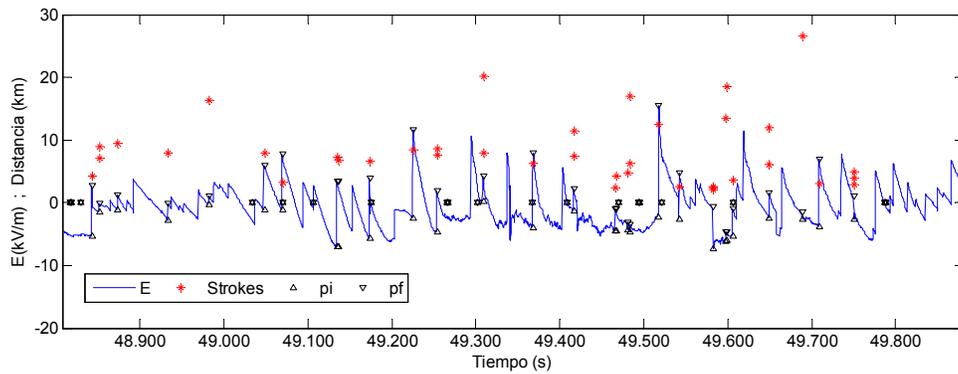


FIGURA 6.23: Comparación de variaciones de campo eléctrico vs detecciones del SID (Bogotá, 17 de noviembre de 2010). Las x rojas muestran la distancia de ocurrencia de cada stroke con respecto al molino de campo mientras la línea continua muestra el valor instantáneo del campo eléctrico.

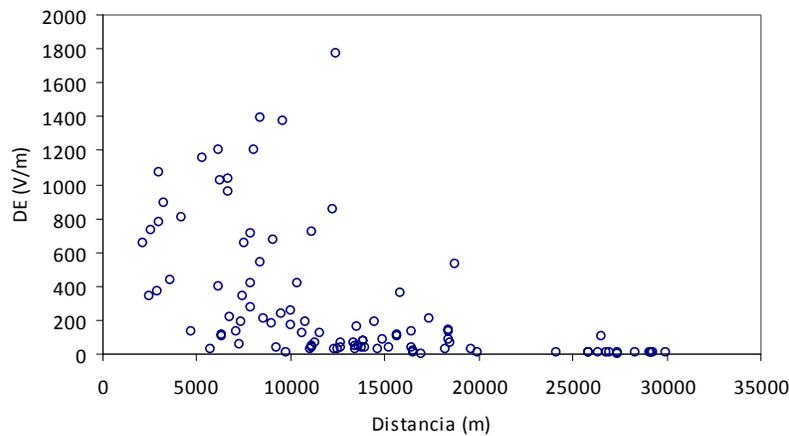


FIGURA 6.24: Variaciones de campo eléctrico en función de la distancia producidos por strokes nube-tierra el día 17 de noviembre de 2010.

En su mayoría los eventos de tormenta relacionados en la Tabla 6.4 presentaron celdas aisladas similar al caso del 17 de noviembre; de igual forma el comportamiento de los ΔE mostró similitud entre los diferentes días. Juntando los datos obtenidos de los diferentes episodios de tormenta se obtiene la distribución de ΔE en función de la distancia ilustrada en la Figura 6.25. La distribución de datos en términos generales mostró concordancia con los resultados de estudios con sensores aislados y con varios episodios de tormenta como *Wormell*[3](1939).

La distribución de los ΔE en función de la distancia para el molino de campo en Bogotá fue ajustada a los modelos de carga puntual y bipolar usando un procedimiento de mínimos cuadrados no lineal basado en la función objetivo descrita por (6.7). Nuevamente

ΔE_{ci} es el cambio de campo eléctrico calculado a partir de los parámetros desconocidos que en éste caso son la altura H (o alturas H_1 y H_2 en el caso del modelo bipolar) y el valor de la carga puntual ΔQ (o cargas ΔQ_1 y ΔQ_2 en el caso del modelo bipolar). ΔE_{mi} es el valor de campo eléctrico medido y N es el número total de cambios de campo eléctrico; para éste caso son 491.

$$C^2 = \sum_{i=1}^N (\Delta E_{ci}(H, \Delta Q) - \Delta E_{mi})^2 \quad (6.7)$$

Los resultados del mejor ajuste son:

- Modelo de carga puntual: $H = 7103$ m (con respecto a la altura del terreno local, 2555 m); $\Delta Q = -15.4$ C.
- Modelo de carga bipolar: $H_1 = 5862$ m, $H_2 = 3761$ m (con respecto a la altura del terreno local, 2555 m); $\Delta Q_1 = -22$ C, $\Delta Q_2 = 6.8$ C.

En la Figura 6.25 se ilustran también las curvas asociadas a los modelos de carga puntual y bipolar ajustados.

Con respecto al nivel del mar, las alturas de las cargas negativa y positiva del modelo bipolar son 8417 y 6316 m respectivamente. Nótese que los anteriores resultados son muy cercanos al modelo bipolar obtenido en Florida en el cual se encontró una carga negativa de -25.07 C a 8976 m y 5.55 C a 5946 m.

El análisis de regresión para el molino de campo en Bogotá es ilustrado en la Figura 6.26. Al igual que en los análisis anteriores la variable de respuesta es $\log(\Delta E)$ (en los gráficos dada en la variable transformada a kV/m) y la variable independiente es la distancia d . El mejor ajuste se logra mediante un polinomio de tercer orden. El intervalo de predicción PI de 95 % se encuentra entre 0.79 y 43.3 kV/m mientras que el intervalo de confianza CI de 95 % se ubica entre 3.5 y 9.76 kV/m con un ancho de 6.26 kV/m.

La Tabla 6.5 muestra en forma comparativa los resultados de los análisis de regresión para el patrón en Florida, el sensor de referencia de terreno plano en Navarra (sensor no. 9) y el sensor ubicado igualmente sobre terreno plano en Bogotá.

La Tabla 6.5 muestra en forma comparativa los resultados de los ajustes de carga para el patrón en Florida, el sensor de referencia de terreno plano en Navarra (sensor no. 9) y el sensor ubicado igualmente sobre terreno plano en Bogotá.

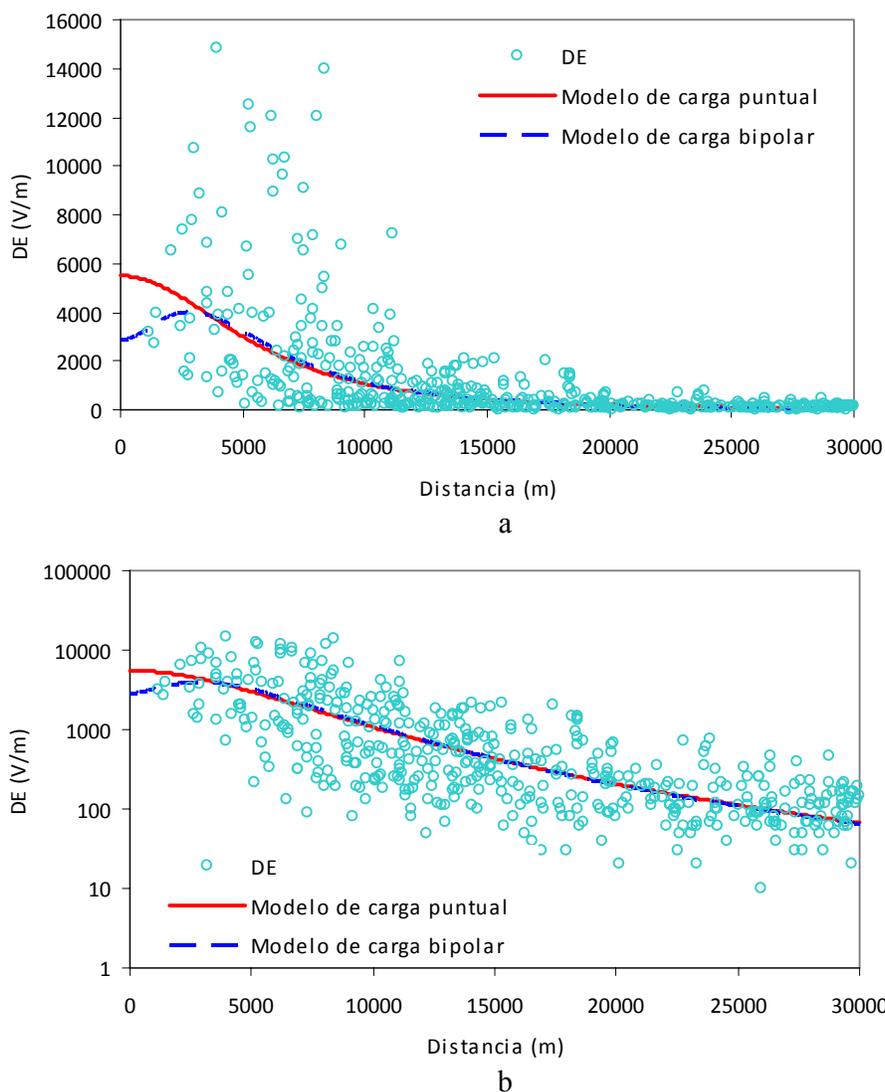


FIGURA 6.25: Distribución ΔE en función de la distancia para los 9 episodios de tormenta entre el 4 y el 28 de noviembre de 2010. a. distribución en escala lineal. b. distribución en escala logarítmica.

CUADRO 6.5: Comparación entre los resultados de ajuste del sensor en Bogotá, el sensor no. 9 en Navarra y el patrón obtenido de los sensores del KSC en Florida. Los valores entre paréntesis indican el ancho del intervalo de confianza para $d = 0$.

Parámetro	Patrón (Florida)	Sensor no. 9 (Navarra)	Bogotá (Colombia)
N	35529	1990	491
ΔE medio ($d=0$)	3.581 kV/m	7.173 kV/m	5.85 kV/m
CI 95 % ($d=0$)	3.35 a 3.78 (0.425) kV/m	5.19 a 9.91 (4.72) kV/m	3.5 a 9.76 (6.26) kV/m
PI 95 % ($d=0$)	0.76 a 16.6 kV/m	0.92 a 55.7 kV/m	0.79 a 43.3 kV/m

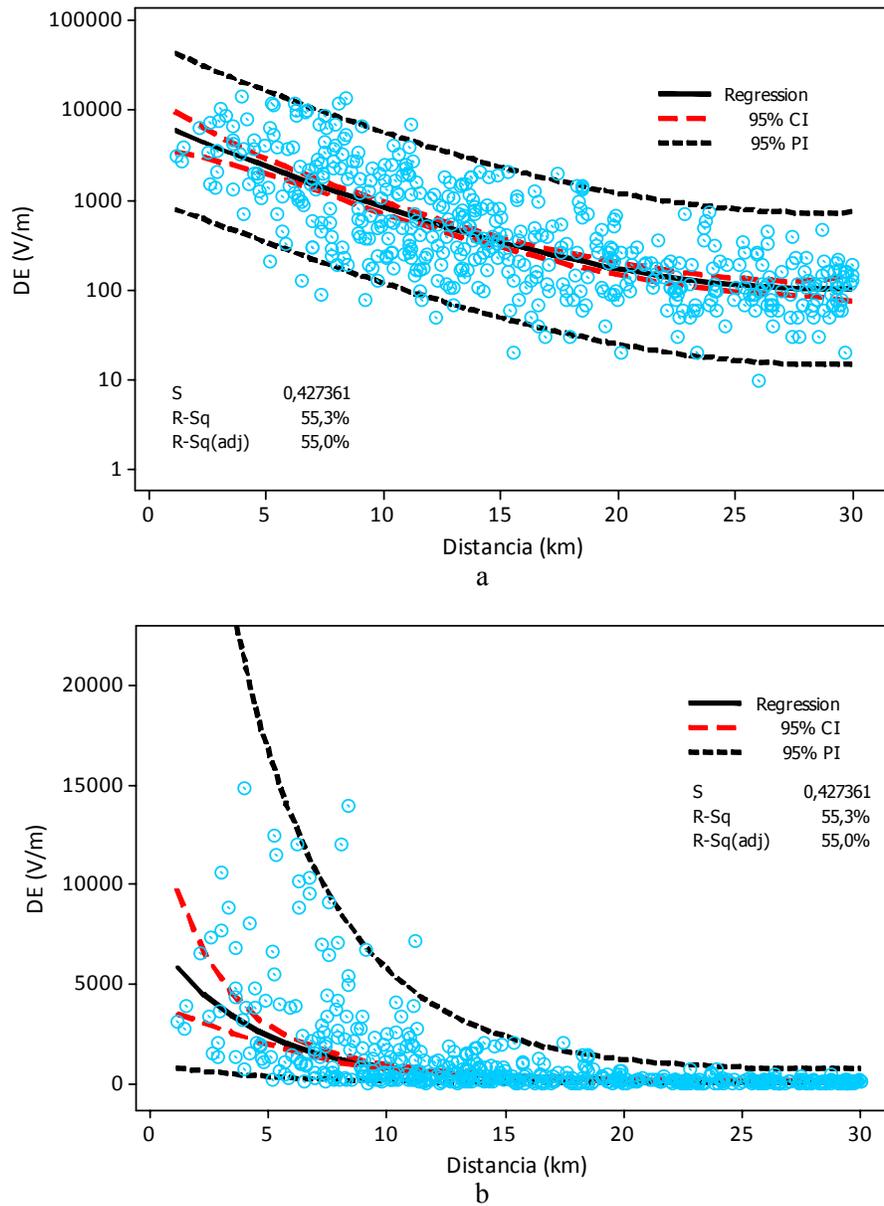


FIGURA 6.26: Análisis de regresión para el molinode campo eléctrico en Bogotá.

CUADRO 6.6: Comparación entre los los resultados de ajuste de modelos de carga para el sensor en Bogotá, el sensor no. 9 en Navarra y el patrón obtenido de los sensores del KSC en Florida.

Ajuste	Patrón (Florida)	Sensor no. 9 (Navarra)	Bogotá (Colombia)
Carga 1 (C)	-25.1	-32.2	-22
Altura 1 (km)	8.89	8.99	8.42
Carga 2 (C)	5.55	-	6.8
Altura 2 (km)	5.95	-	6.32

Predicción de rayos a partir de medidas de campo eléctrico

La predicción de tormentas eléctricas en muchos estudios se basa en la detección de descargas nube-tierra que permiten directamente identificar una celda de tormenta activa [79, 103, 80]. Otros estudios más completos incluyen la actividad de rayos intra-nube los cuales permiten detectar en forma más temprana una posible tormenta eléctrica que pueda producir rayos nube-tierra [81, 82]. La medida de reflectividad suministrada por radares meteorológicos también ha sido incluida en métodos de predicción gracias a la estrecha relación que presenta con los centros de carga eléctrica de la nube [83, 84]. Sin embargo, como mencionan diferentes autores, la medida del campo electrostático es el método más directo de detectar la presencia de la nube de tormenta y predecir la ocurrencia de la descarga nube-tierra [14, 85, 86].

En condiciones de buen tiempo el campo electrostático presenta promedios del orden de 120 V/m. El campo eléctrico del ambiente es directamente afectado por la presencia y movimiento de las cargas eléctricas dentro de nubes de tormenta alcanzando valores, en terreno plano, de hasta 15 kV/m, algunas de las referencias más completas sobre campañas de medida son [2, 3, 36, 107]. Dependiendo de la magnitud de la carga y su localización, el campo eléctrico producido por la nube puede ser detectado en un rango cercano a los 20 km. Adicionalmente, cuando una nube electrificada se acerca al lugar de medida, comúnmente se observa un cambio de polaridad producido por la cercanía del centro de carga negativo en la parte central de la nube [88]. Dado lo anterior, las amplitudes altas de campo eléctrico y los cambios de polaridad son los principales indicadores de la evolución de la tormenta útiles para el desarrollo de metodologías de predicción.

La probabilidad de detección (POD, fracción de eventos observados que son correctamente pronosticados) a partir de umbrales de campo eléctrico fue estudiada recientemente en Florida - USA por *Murphy et al.* [85] donde se obtuvo un POD de 34.4% considerando un umbral de campo eléctrico para la activación de alarmas de 1 kV/m. Como mencionan los autores, el valor bajo del POD es debido probablemente a la distancia relativamente grande entre la carga en el interior de la nube y la medida de campo eléctrico en tierra, lo cual lleva a que no se presenten valores de campo eléctrico muy grandes antes de la ocurrencia del rayo. Sin embargo valores mayores de POD pueden encontrarse en otros lugares donde las cargas en la nube se encuentran típicamente más bajas (ej. en Nuevo Méjico, *Krehbiel et al.* [52], Japón, *Brook et al.* [108]). *Aranguren et al.* [109] obtuvo un POD de 37.5% para tormentas en Cataluña - España, considerando el mismo umbral de campo eléctrico de 1 kV/m. Los resultados en Florida y Cataluña son similares lo cual es un resultado esperado dada la similitud en las condiciones de los dos sitios.

El presente capítulo busca realizar un análisis más amplio sobre los criterios de predicción basados en medidas de campo electrostático; para ello se usaron las medidas realizadas en el KSC-Florida en el verano de 2009 y en Colombia en 2010. Adicionalmente se incluyen los resultados previos obtenidos del estudio en Terrassa, España.

7.1. Análisis

Como punto de partida puede tomarse en método de las dos áreas descrito por *Murphy et al* [79, 103, 81, 82, 83, 84]; el análisis se basa en estudiar la efectividad de las alertas producidas a partir de medidas de campo electrostático en un punto de interés - PI. El área denominada AOC (*Area Of Concern*) es una región que rodea el punto de interés PI en la cual se desean prevenir los riesgos y daños debidos a rayos. En el método de las dos áreas, una segunda región que rodea el AOC se denomina área de alarma - WA (*Warning Area*); las alarmas son emitidas a partir de la información de rayos nube-tierra e intranube en el WA proporcionada por sistemas de localización de rayos. El esquema de protección de las dos áreas es ilustrado en la Figura 7.1.

Para el caso del uso de molinos de campo como sistemas de detección, las alarmas son únicamente iniciadas a partir del análisis de las medidas realizadas en el PI. El equivalente de WA cuando se usa la medida de campo eléctrico está dado por la distancia a la cual se presenta el cambio de polaridad o un determinado umbral de campo eléctrico.

7.2. Verificación de predicciones

La verificación de predicciones (*Forecast verification*) es un área de trabajo muy importante dentro de los métodos estadísticos usados en el estudio de los fenómenos atmosféricos;

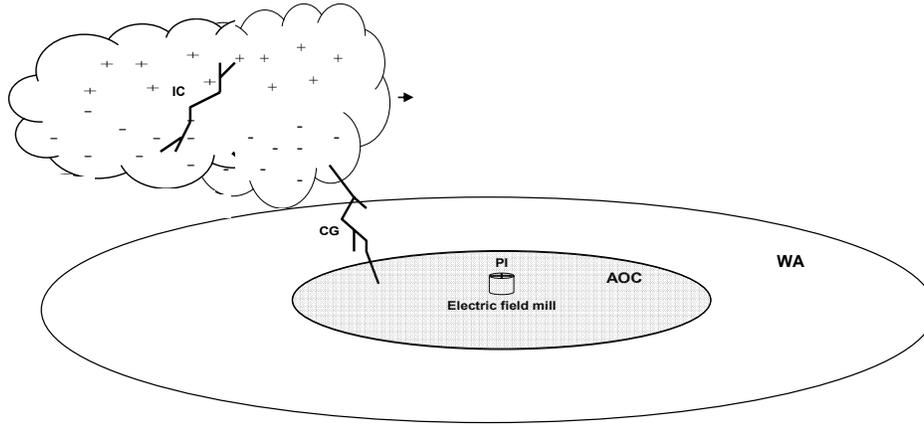


FIGURA 7.1: Método de predicción de rayos basado en la medida del campo electrostático en un punto de interés - PI.

los conceptos generales acerca de ésta temática son ampliamente descritos en [110, 111].

La verificación de predicciones es el proceso de evaluación de calidad de las predicciones hechas por un determinado método. Comúnmente los métodos de pronóstico son evaluados a partir de la observación de los eventos, objeto de la predicción, que realmente ocurren. Los pronósticos pueden considerarse, dentro de un experimento en estadística, como una hipótesis de que ocurra un evento bajo unas condiciones dadas. La verificación por tanto busca, mediante la evaluación de las hipótesis, establecer en términos cualitativos o cuantitativos que tan exitoso resulta el método de predicción. Los objetivos de la verificación de predicciones son principalmente tres: i. Monitorear la calidad de la predicción: es decir establecer que tan precisa es y si su desempeño mejora con el tiempo. ii. Mejorar la predicción y iii. Comparar la calidad de diferentes métodos de pronóstico.

Fenómenos como el rayo suelen traer asociada una predicción de tipo binario con dos estados: “si” o “no” ocurrirá el evento bajo unas condiciones de espacio o tiempo dadas; para predicciones con ésta naturaleza comúnmente se usa el Método de Dicotomía. La verificación de la predicción se basa en la definición de una Tabla de Contingencia 7.1 que resume la frecuencia de eventos “si” o “no” pronosticados y eventos “si” o “no” observados, donde se derivan los siguientes cuatro parámetros:

CUADRO 7.1: Tabla de contingencia

		Eventos observados			Total
		si	no	Total	
Eventos pronosticados	si	EA	FA	Pronosticados si	
	no	FTW	CNW	Pronosticados no	
Total		Observados si	Observados no	Total	

- Alarmas efectivas (*Effective Alarm - EA*): Eventos “si” observados que fueron correctamente “si” pronosticados.
- Fallos de alarma (*Failure To Warn - FTW*): Eventos “si” observados que fueron “no” pronosticados.
- Falsas alarmas (*False Alarm - FA*): Eventos “no” observados que fueron “si” pronosticados.
- Eventos correctamente no pronosticados (*Correct not warn - CNW*): Eventos “no” observados que fueron “no” pronosticados.

Un método de predicción perfecto presentaría únicamente alarmas efectivas y eventos correctamente no pronosticados. Con base en la tabla de dicotomía puede definirse un gran número de parámetros estadísticos que describen el desempeño del método de predicción. La norma [13] describe los principales parámetros asociados con la predicción de rayos, estos son:

- Probabilidad de detección (*Probability Of Detection - POD*): Fracción de eventos observados que son correctamente pronosticados.

$$POD = \frac{EA}{EA + FTW} \quad (7.1)$$

- Tasa de Falsas Alarmas (*False Alarma Ratio - FAR*): Fracción de alarmas generadas que resultan en falsas alarmas.

$$FAR = \frac{FA}{FA + EA} \quad (7.2)$$

- BIAS: Medida que indica la sobrepredicción o subpredicción.

$$BIAS = \frac{EA + FA}{EA + FTW} \quad (7.3)$$

- Índice de acierto crítico (*Critical Success Index - CSI*):

$$CSI = \frac{EA}{EA + FA + FTW} \quad (7.4)$$

Adicionalmente son relevantes los siguientes parámetros de tiempo:

- Tiempo de predicción (*Lead Time - LT*): tiempo transcurrido entre el momento de la activación de la alarma y la ocurrencia de la primera descarga nube-tierra dentro del AOC.
- Duración de la alarma (*Dwell Time - DT*): tiempo en el que una alarma es sostenido, después de dejan de cumplirse los criterios de alarma establecidos.

7.3. Criterios de alarma basados en la medida de campo eléctrico

Con base en las medidas de campo electrostático realizadas con molinos de campo es posible derivar varios criterios de predicción; los siguientes son los dos criterios estudiados en la presente tesis:

- Umbral de campo electrostático.
- Primer cambio de polaridad de positivo a negativo.

Para comprender los dos criterios de alarma es necesario analizar el comportamiento que presenta el campo electrostático a nivel del suelo durante la aproximación de una celda de tormenta al lugar de medición. La Figura 7.2 muestra un ejemplo de una medida de campo electrostático durante el acercamiento de una tormenta activa, los puntos rojos indican la distancia de ocurrencia de rayos nube-tierra, mientras la línea azul muestra la medida instantánea de campo electrostático. Como se puede apreciar, la actividad de rayos inicia a aproximadamente 50 km del lugar de medida y se empieza a acercar a una velocidad cercana a los 40 km/h. Cuando la actividad de rayos se concentra a una distancia entre 10 y 20 km, el campo eléctrico toma un valor de polaridad negativa con una amplitud considerable. Posteriormente la actividad de rayos alcanza la región cercana (5 km a la redonda) del lugar de medida.

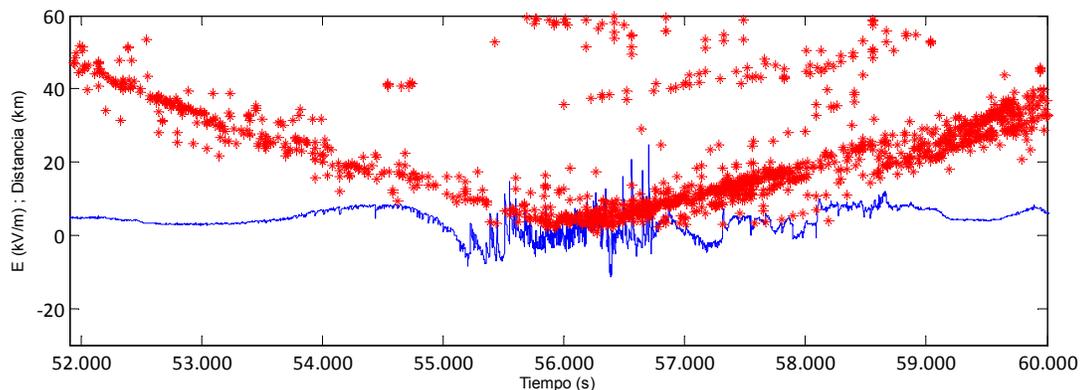


FIGURA 7.2: Campo eléctrico en la estación no. 1 y descargas nube-tierra detectadas por LINET para el evento de 9 de mayo de 2010.

Para el análisis de los dos criterios de alarma se usaron los registros de tormentas obtenidos por la red de 31 molinos de campo en el KSC y CCAFS en Florida, para el verano de 2009 y los registros obtenidos en Bogotá para noviembre de 2010. Adicionalmente se incluyen los resultados del primer análisis realizado para un sensor aislado en Terrassa - Cataluña, con eventos de tormenta medidos durante la época de verano en 2004 y 2006.

7.3.1. Terrassa, verano 2004 y 2006

Aranguren et al. [109] presentaron resultados experimentales sobre siete tormentas de verano entre 2004 y 2006 en Terrassa, España. Los criterios evaluados fueron principalmente el umbral del campo eléctrico y la detección del cambio de polaridad.

Los datos de localización de rayos fueron obtenidos de dos sistemas que operan en la región de estudio: La Red Española de Detección de Rayos (SLDN), compuesta por 15 antenas de LF con técnicas combinadas de detección de la dirección magnética (*magnetic Direction Finding* - MDF) y tiempo de arribo (*Time Of Arrival* - TOA); y la Red Catalana de Localización de Rayos (XDDE), conformada por 3 interferómetros de VHF.

Las medidas de campo electrostático fueron realizadas por un molino de campo instalado en la ciudad de Terrassa, el equipo usado es similar al descrito por *Montanyà et al.* [41, 112]. El equipo fue instalado sobre una edificación en la que no se conoce con exactitud el error de sitio, por tal motivo los resultados son aplicables a ésta instalación en particular.

Con el propósito de observar únicamente las variaciones lentas asociadas con la presencia de la nube de tormenta, los registros de campo eléctrico fueron suavizados, mediante una media móvil con una ventana de 60 s., ésta misma ventana ha sido usada en los trabajos previos [14, 85, 86].

El umbral de campo eléctrico usado para la emisión de una alerta fue variado entre 0.1 y 3 kV/m. Para cada valor de campo eléctrico se calcularon los parámetros descritos en la tabla de dicotomía. La Figura 7.3 muestra el comportamiento general de los diferentes umbrales. En resumen se obtuvo que al aumentar el umbral de campo electrostático, disminuye el número de alarmas generado, se generan menos falsas alarmas y se logra un aumento en el número de aciertos, sin embargo se genera un alto número de fallos de alarma.

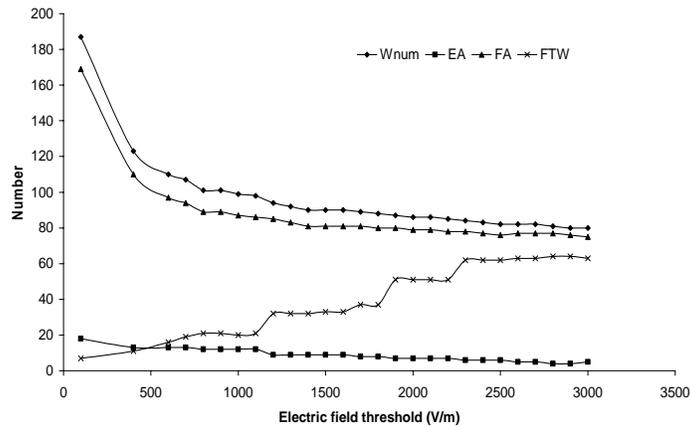


FIGURA 7.3: Comportamiento de los diferentes parámetros en función del umbral de campo eléctrico.

El método de predicción busca alertar sobre el riesgo por rayos; en una forma simplificada éste riesgo se puede suponer que es independiente del número de rayos nube-tierra que ocurran en el Área de Interés (*Area Of Concern* - AOC) después de una activación de alarma. El parámetro POD es calculado a partir de la anterior suposición. La Figura 7.4 muestra el comportamiento del POD y FAR en función del umbral de campo eléctrico; como es de esperarse, el POD disminuye a medida que aumenta el valor del umbral; para el valor de 1 kV/m considerado en la mayoría de los estudios, el POD es 0.375 (o 37.5 %). Por otro lado, el FAR tiende a mantener un valor constante cercano a 0.9 (o 90 %). Si se calcula el BIAS con los anteriores parámetros, se obtiene que el método de predicción tiende a la sobrepredicción, dado el alto número de falsas alarmas.

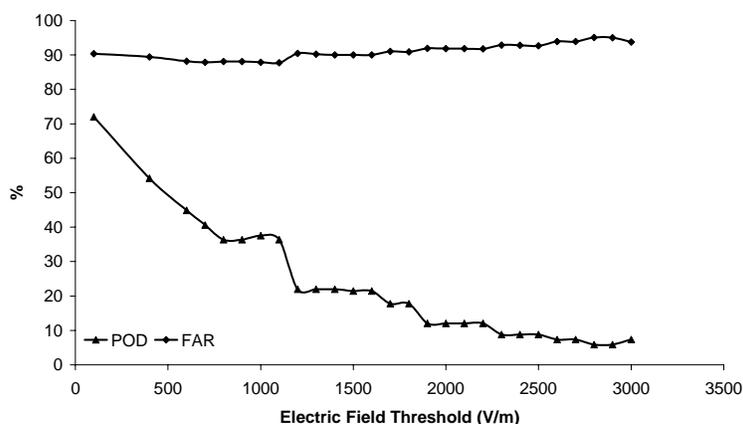


FIGURA 7.4: POD y FAR en función del umbral de campo eléctrico.

El cálculo del POD es independiente del número de rayos nube-tierra en el AOC; no obstante es interesante evaluar el número de rayos que efectivamente se predicen y el número de ellos asociados con fallos de alarma. La Figura 7.5 muestra la relación de rayos pronosticados y no pronosticados en función del valor del umbral de campo eléctrico. En total se presentaron 97 rayos nube-tierra en el AOC durante los eventos de tormenta estudiados. Cuando el umbral es 100 V/m la relación pronosticado/no pronosticado es 13 a 1; cuando el umbral es 2000 V/m la relación pronosticado/no pronosticado es 1 a 1 y para valores mayores el valor de rayos no pronosticados es mayor.

Usando los mismos registros de tormentas del caso anterior, se evaluó el comportamiento del criterio basado en el cambio de polaridad. Como se ilustra en la Figura 7.2, el cambio de polaridad se presenta comúnmente a distancias cercanas a 10 km. En general, el primer cambio de polaridad en los eventos estudiados se presentó cuando la actividad de rayos se encontraba a distancias mayores a 8 km. El campo eléctrico del ambiente exhibe muchos cambios de polaridad durante la evolución de la tormenta, debido a la lluvia, las variaciones producidas por descargas y otros factores que producen cambios en las condiciones de carga de la nube.

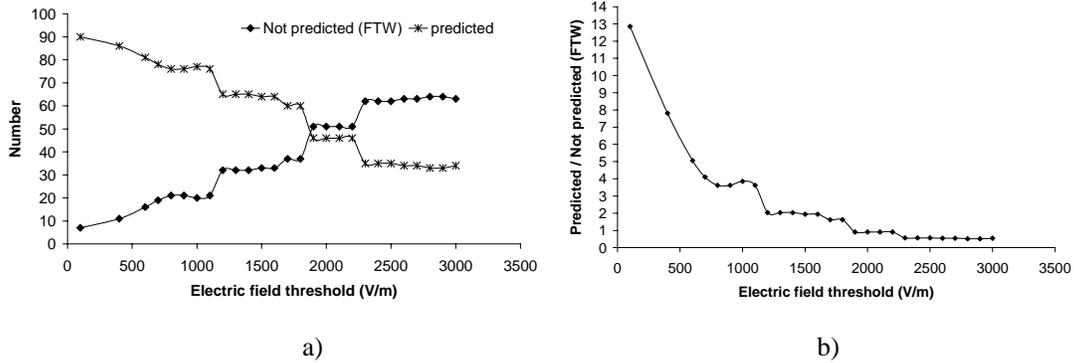


FIGURA 7.5: a) Número de descargas a tierra pronosticadas y no pronosticadas en función del umbral de campo eléctrico. b) Relación de descargas a tierra pronosticadas contra no pronosticadas en función del umbral de campo eléctrico.

La Figura 7.6 muestra los resultados obtenidos para el criterio de cambio de polaridad y los compara con los resultados para el criterio basado en el umbral de campo eléctrico. El cambio de polaridad produjo un poco menos alarmas, 85 contra 99 en el caso del umbral. El número de alarmas efectivas por el contrario fue mayor, 16 contra 12 en el caso del umbral. El POD obtenido para el cambio de polaridad fue 0.47 (o 47 %), el cual es mayor al 0.375 (o 37.5 %) obtenido para el caso del umbral, cuando se considera un valor 1 kV/m que es valor utilizado en otros estudios [85, 86]. El FAR obtenido para el cambio de polaridad fue 0.78 (o 78 %), valor inferior al FAR de 0.87 (o 87 %) para el caso del umbral de 1 kV/m.

En la Figura 7.6 puede observarse adicionalmente el porcentaje de rayos nube-tierra en el AOC que son correctamente pronosticados; en éste caso, el umbral de campo eléctrico tiende a presentar un porcentaje levemente mayor.

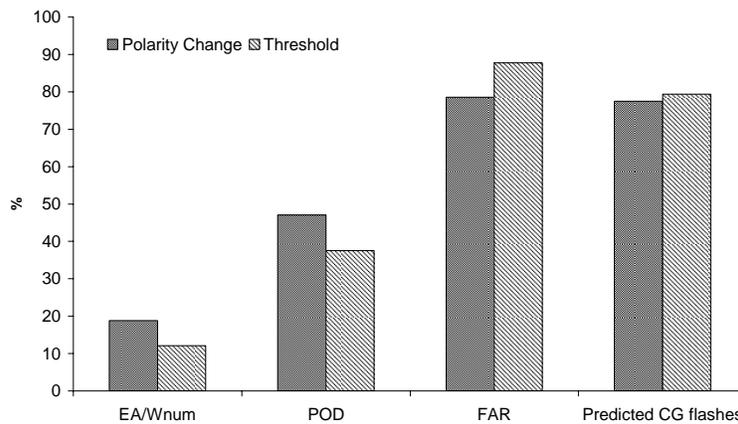


FIGURA 7.6: Comparación de parámetros de eficiencia para los criterios de generación de alarmas por umbral de campo eléctrico y cambios de polaridad

7.3.2. Florida, verano de 2009

Para éste caso se usaron los mismos registros de campo eléctrico descritos en los capítulos 4 y 5. Los eventos de tormenta son los descritos en la Tabla 5.2. Como sistema de localización de rayos se usó el CGLSS.

El caso de los sensores en Florida es interesante dado que los equipos se encuentran instalados en condiciones casi ideales; adicionalmente, el número de sensores permite obtener una cantidad de datos mucho mayor a la esperada para una estación aislada, lo que conlleva a obtener estadísticas más confiables.

Los registros de los 31 molinos de campo fueron suavizados mediante la media móvil con una ventana de tiempo de 60 s. Similar al caso anterior, para el análisis se consideró un umbral de campo eléctrico entre 200 y 3000 V/m con pasos de 100 V/m.

El procedimiento usado fue el mismo descrito en el numeral anterior, aplicado a todos los sensores en Florida. Se consideró un AOC de 5 km de radio y un *Dwell Time* de 30 min. La Figura 7.7 muestra el comportamiento del POD y el FAR presentado en el sensor no. 8; cómo es de esperarse, el POD tiene valores altos para valores bajos de umbral (POD de 100 % para 200 V/m de umbral) y se reduce a medida que éste aumenta (llegando a un POD de 6 % para 3000 V/m de umbral); el FAR presenta igualmente una reducción a medida que aumenta el umbral, con valores cercanos a 80 % para el umbral de 200 V/m y alrededor de 50 % cuando el umbral es 3000 V/m.

En general, todos los sensores presentaron tendencias similares; lo que es lógico dado que las condiciones de calibración y las tormentas eléctricas al que se encontraron expuestos son las mismas.

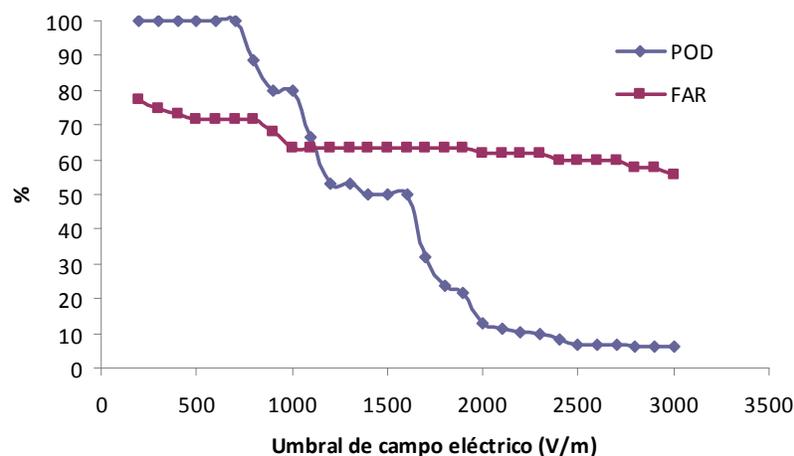


FIGURA 7.7: POD y FAR en función del campo eléctrico para el sensor no. 8

La Figura 7.8 muestra el número de rayos involucrados en alarmas efectivas y fallos de alarma para los diferentes umbrales; con respecto al sensor no. 8. El 100 % de los rayos nube-tierra ocurridos en el AOC (234) están asociados con alarmas efectivas cuando el umbral es 200 V/m; a medida que aumenta el umbral empiezan a presentarse fallos de alarma; cuando el umbral es 3000 V/m aproximadamente el 54 % de los rayos están asociados con fallos.

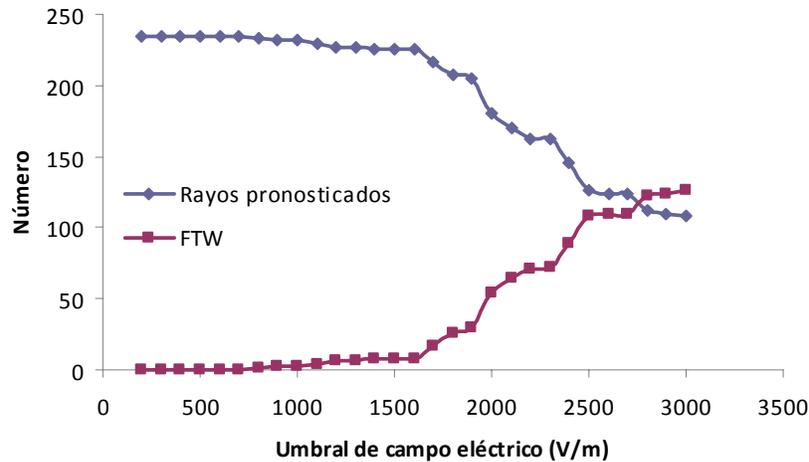


FIGURA 7.8: Rayos pronosticados y fallos de alarma en función del umbral de campo eléctrico para el sensor no. 8.

La Figura 7.9 muestra el comportamiento del *Lead-Time* promedio para todos los eventos de tormenta registrados por el sensor no. 8. Para umbrales bajos se obtienen tiempos de predicción cercanos a 15 min, mientras que para umbrales cercanos a 3000 V/m el tiempo es casi 0.

Teniendo en cuenta que los 31 molinos de campo tienen características de calibración similares y que adicionalmente están ubicados en la misma región y por lo tanto están expuestos al mismo tipo de tormentas, es posible combinar los resultados obtenidos por todos los sensores para obtener un evaluación general acerca del desempeño del método de predicción basado en éstos equipos. La Tabla 7.2 muestra en resumen los resultados combinados obtenidos para cada umbral de campo eléctrico.

La Figura 7.10 muestra el comportamiento del total de alarmas encendidas por los 31 sensores en los 9 episodios de tormenta estudiados. El número total de alarmas (W) para el umbral más bajo es de 1035; a medida que aumenta el umbral el número total de alarmas se reduce, se reduce el número de falsas alarmas (FA), mientras que el número de alarmas efectivas (EA) presenta una leve reducción.

Los anteriores parámetros conllevan a obtener los valores de POD y FAR mostrados en al Figura 7.11.

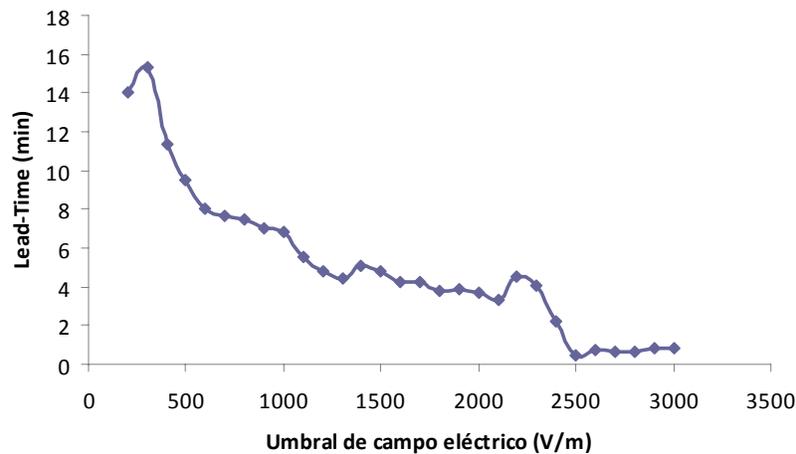
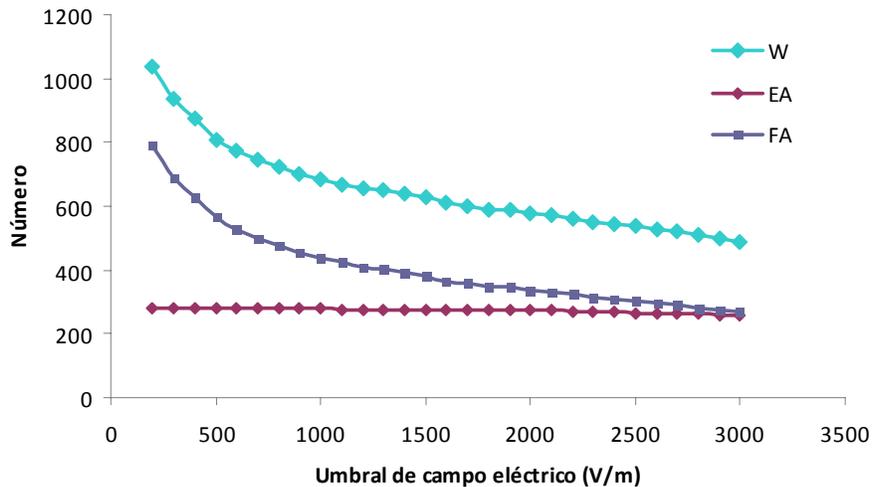
FIGURA 7.9: *Lead-Time* en función del campo eléctrico para el sensor no. 8.

FIGURA 7.10: Número de alarmas, alarmas efectivas y falsas en función del umbral de campo eléctrico, para el total de alarmas producidas por los 31 molinos de campo.

Nótese como la anterior curva presenta una relación con el umbral de campo eléctrico mucho más definida que la mostrada en la Figura 7.7; la principal razón radica en que para éste caso se cuenta con 1035 casos de emisión de alarma y 7503 rayos nube-tierra dentro de las áreas AOC de los 31 molinos de campo; mientras que para el sensor no. 8 apenas se contaba con 35 casos de alarma y 234 rayos nube-tierra en el AOC.

CUADRO 7.2: Evaluación de los parámetros de predicción en función del umbral de campo eléctrico. $FAOC_{EA}$ corresponde con el número de rayos nube-tierra dentro del AOC que son pronosticados.

Umbral (V/m)	W	$FAOC_{EA}$	FTW	EA	FA	LT (min)	POD	FAR
200	1035	7457	46	279	789	11.52	85.8	76.2
300	937	7455	48	279	691	11.07	85.3	73.7
400	875	7453	50	279	629	9.79	84.8	71.8
500	810	7433	58	279	564	9.9	82.8	69.6
600	774	7427	70	279	528	9.32	79.9	68.2
700	744	7411	76	279	498	9.17	78.6	66.9
800	723	7445	92	280	476	8.93	75.3	65.8
900	699	7398	105	278	454	8.71	72.6	64.9
1000	684	7382	121	278	439	8.24	69.7	64.2
1100	669	7362	141	277	425	7.99	66.3	63.5
1200	656	7335	168	277	412	7.49	62.2	62.8
1300	648	7309	194	277	404	7.23	58.8	62.3
1400	639	7203	300	277	395	6.88	48.0	61.8
1500	628	7180	323	277	384	6.61	46.2	61.1
1600	609	7092	411	276	366	6.23	40.2	60.1
1700	602	6956	547	276	359	5.91	33.5	59.6
1800	589	6875	628	275	347	5.6	30.4	58.9
1900	586	6791	712	273	346	5.22	27.7	59.0
2000	578	6678	825	273	338	5.03	24.9	58.5
2100	571	6598	905	273	331	4.9	23.2	58.0
2200	562	6451	1052	269	326	4.7	20.4	58.0
2300	549	6363	1140	268	314	4.49	19.0	57.2
2400	542	6263	1240	267	308	4.19	17.7	56.8
2500	536	6002	1501	265	304	4.02	15.0	56.7
2600	525	5835	1668	263	295	3.72	13.6	56.2
2700	520	5764	1739	263	290	3.55	13.1	55.8
2800	509	5535	1968	262	280	3.46	11.7	55.0
2900	498	5350	2153	257	274	3.37	10.7	55.0
3000	490	5241	2262	256	267	3.07	10.2	54.5

La Figura 7.12 muestra el comportamiento de los fallos de alarma y los rayos pronosticados en función del umbral de campo eléctrico. Cuando el umbral es 200 V/m, el 0.6 % del total de rayos en el AOC resulta en fallos de alarma; cuando el umbral es 3000 V/m, el número de fallos de alarma aumenta a 30 %.

Los tiempo de predicción promediados para cada umbral tienen el comportamiento mostrado en la Figura 7.13. Como se puede apreciar, los valores promedio tienen una reducción significativa con respecto a los valores mostrados en la Figura 7.9.

Para el caso de la emisión de alarmas mediante la detección del cambio de polaridad, se consideraron igualmente los registros de los 31 molinos de campo, para los 9 episodios de tormenta. En éste caso se observa que el número total de alarmas se reduce a 482, de las cuales 324 resultan en alarmas efectivas. En algunos casos pudo observarse que el *Lead-Time* asociado con el primer cambio de polaridad alcanzaba valores de tiempo mayores al *Dwell-*

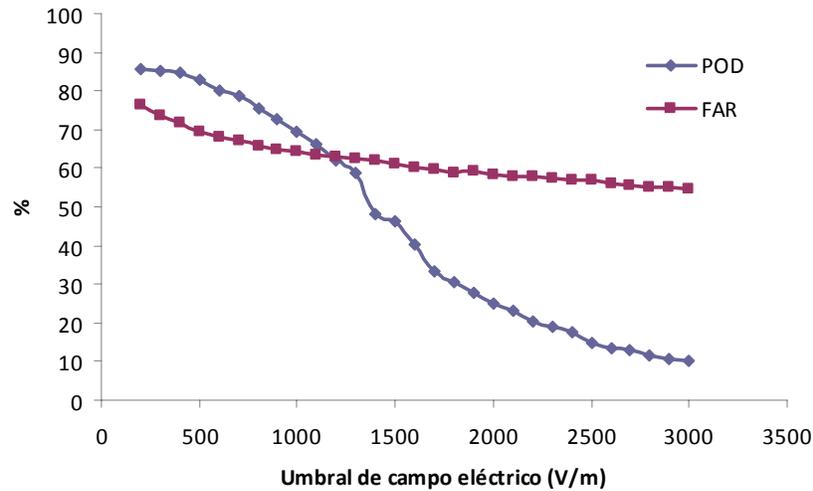


FIGURA 7.11: POD y FAR para el total de alarmas producidas por los 31 molinos de campo.

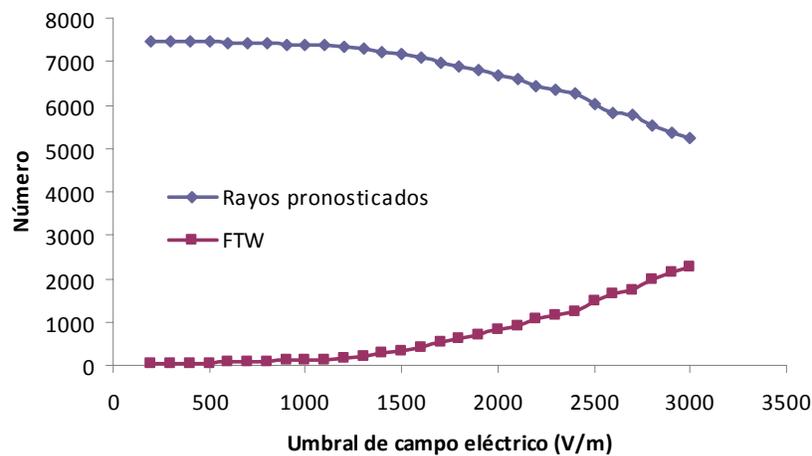
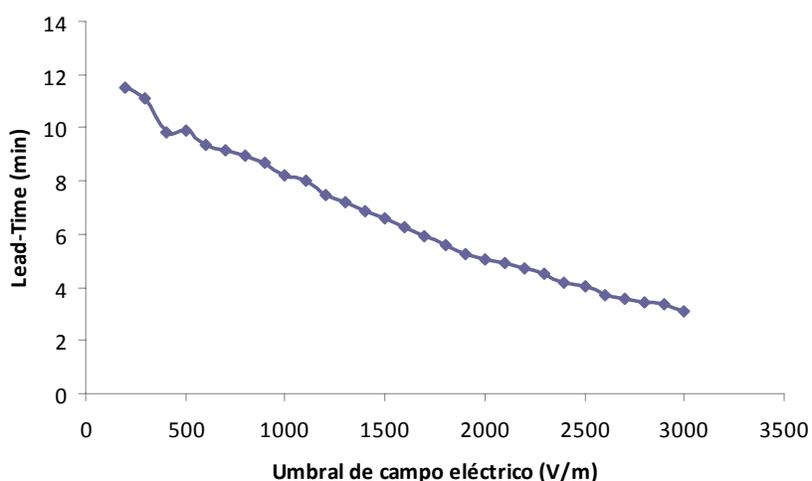


FIGURA 7.12: Rayos pronosticados y fallos de alarma en función del umbral de campo eléctrico.

Time de 30 minutos; por lo que se reportaba una falsa alarma, seguida de un fallo; éstos casos no son muy comunes, no obstante presentan varios reportes de fallos de alarma que afectan el calculo final. La Tabla 7.3 muestra los resultados.

De los anteriores valores se obtiene un $POD = 37.4\%$ y un $FAR = 32.8\%$. El valor bajo de POD es debido principalmente a la ocurrencia de fallos de alarma a causa de los largos tiempos de predicción; podría pensarse que es conveniente usar un valor mayor de *Dwell-Time*; sin embargo los tiempos mayores a 30 minutos son valores no coherentes y sugieren que el sensor muy probablemente está interactuando con varias celdas o con tormentas que no se mueven directamente hacia el punto de interés.

FIGURA 7.13: *Lead-Time* en función del campo eléctrico.

CUADRO 7.3: Tabla de contingencia

		Eventos observados			
		si	no		Total
Eventos pronosticados	si	324	158		482
	no	543	—		—
Total		867	—		—

7.3.3. Bogotá, noviembre de 2010

Para la evaluación del criterio basado en el umbral de campo eléctrico para el caso del molino de campo en Bogotá, se utilizaron los episodios de tormenta descritos en la Tabla 6.4. En éste caso, las distancias de ocurrencia de los rayos nube-tierra con respecto al sensor fueron calculadas usando los datos proporcionados por el SID (Capítulo 4).

El campo eléctrico medido a una tasa de 5 muestras por segundo fue suavizado usando una media móvil con una ventana de tiempo de 60 s, similar a como lo presenta *Murphy et al* [85].

Para la evaluación del criterio se construyó un programa que reproducía la emisión de alarmas con base en un umbral determinado, en donde el umbral fue variado entre 0 y 6 kV/m. En éste caso el rango de variación del umbral fue mayor, debido a que el sensor se encuentra ubicado a 2600 msnm y durante un evento de tormenta puede hallarse más cerca del centro de carga de la nube que un sensor a nivel del mar.

Igual que para los casos anteriores se evaluaron los principales parámetros de verificación de predicciones para cada umbral. La Figura 7.14 muestra el comportamiento de dichos

parámetros.

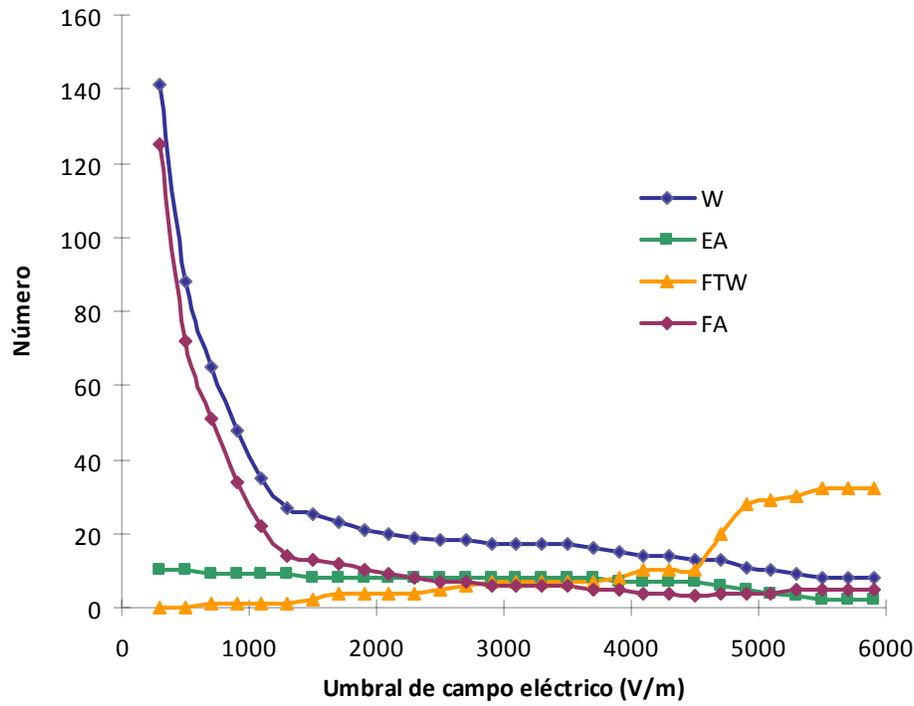


FIGURA 7.14: Número de alarmas, alarmas efectivas y falsas en función del umbral de campo eléctrico, para el total de alarmas producidas por los 31 molinos de campo.

El comportamiento del POD y el FAR se describe en la Figura 7.15; como es de esperarse el POD es 1 cuando el umbral de campo eléctrico usado es cercano a 0, dado que en éste valor el número de alarmas encendidas es muy alto y para cualquier evento siempre se va a contar con una alarma activada. A medida que aumenta el umbral de campo eléctrico, el POD se reduce hasta llegar a un valor cercano a cero para umbrales superiores a 5700 V/m.

El resultado obtenido para el FAR es lógico; para un umbral de campo eléctrico muy bajo, cercano a cero, el número de alarmas encendidas es muy alto, no obstante la gran mayoría de estas alarmas resultan ser falsas. A medida que aumenta el umbral de campo eléctrico el número de falsas alarmas se reduce, reduciendo proporcionalmente el parámetro FAR.

Valores altos de umbrales de alarma, superiores a 4500 V/m, muestran un cambio en la tendencia del FAR, en donde éste empieza a incrementar nuevamente; el anterior resultado puede ser debido principalmente al bajo número de alarmas que se presentaron para estos niveles de umbral.

En total se detectaron 69 rayos nube-tierra dentro del AOC de 5 km de radio alrededor del sensor. Los 69 rayos se distribuyeron entre alarmas efectivas y fallos de alarma, según

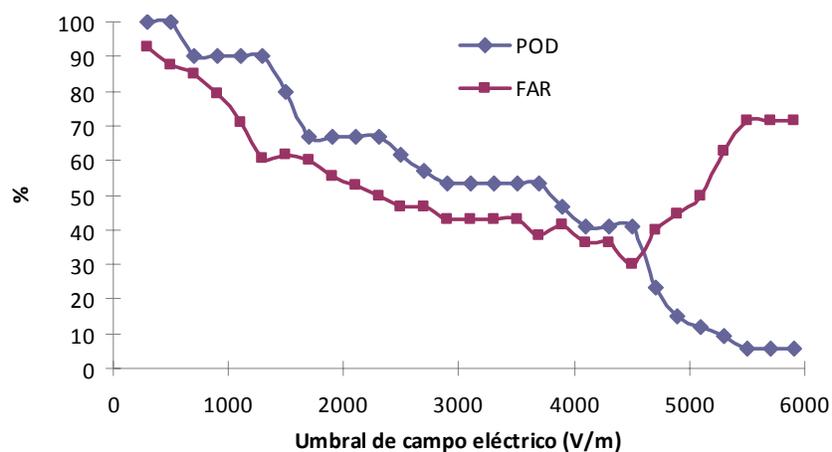


FIGURA 7.15: POD y FAR para el total de alarmas producidas por el molino de campo en Bogotá.

como lo muestra la Figura 7.16. Para umbrales de campo eléctrico inferiores a 500 V/m el 100 % de los rayos nube-tierra dentro del AOC se relacionaron con alarmas efectivas. Por el contrario, cuando el umbral de campo eléctrico es mayor a 5500 V/m, el 46 % de los rayos corresponden con fallos de alarma.

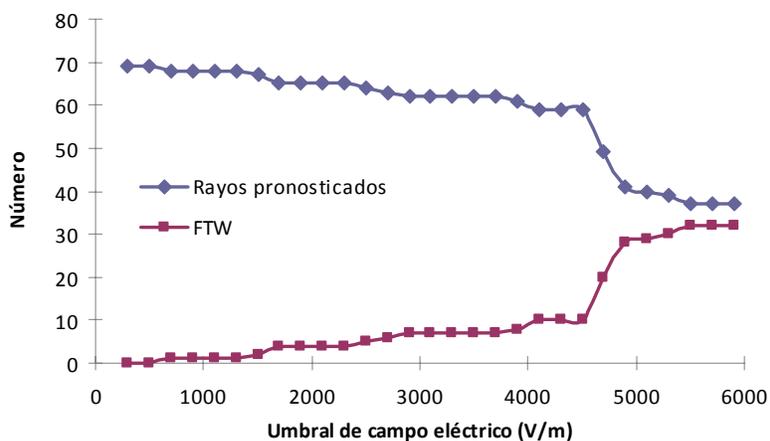
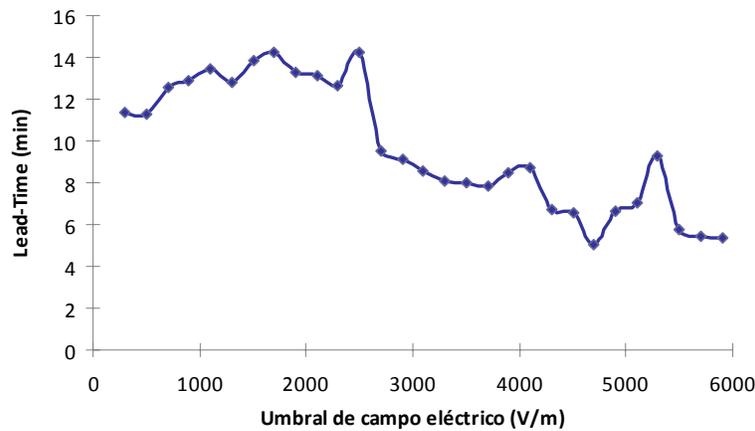


FIGURA 7.16: Rayos pronosticados y fallos de alarma en función del umbral de campo eléctrico.

El tiempo de predicción presenta valores que van entre los 5 y 14 minutos (Figura 7.17). Cuando se usan umbrales de campo eléctrico bajos, el *Lead-Time* tiende a presentar sus valores más altos, mientras que a valores altos de campo eléctrico el *Lead-Time* tiende a presentar los valores más bajos. El anterior resultado es lógico dado que entre menor sea el valor del umbral de campo eléctrico, la alarma se va a encender en un etapa más temprana de la electrificación de la nube o a una distancia mayor.

FIGURA 7.17: *Lead-Time* en función del campo eléctrico.

En el capítulo 6 se encontró que la distribución de ΔE contra distancia, para el sensor en Bogotá, se ajusta a un modelo de carga bipolar con el centro negativo principal ubicado a 8.42 km de altura con respecto al nivel del mar (5862 m sobre el terreno local) y con una magnitud de -22 C. para el caso de Florida se obtuvo que la distribución patrón se ajusta a un modelo con la carga negativa ubicada a 8.89 km de altura y con una magnitud de -25,1 C. Nótese que tanto el sensor en Bogotá como los sensores en Florida, tienen distribuciones que se ajustan a modelos de carga similares; por lo tanto, puede concluirse que la diferencia en el comportamiento de los parámetros de verificación de predicciones mostrados en las Figuras 7.15 y 7.16, es debida principalmente a la mayor altura de instalación del sensor en Bogotá.

Para el caso del criterio basado en la detección del cambio de polaridad, se obtuvieron los resultados resumidos en la Tabla 7.4. El total de alarmas encendidas es de 20, 9 efectivas, 3 fallos de alarma, 11 falsas con un tiempo de predicción promedio de 12,5 min. El POD general de las tormentas analizadas es de 75 % y el FAR es de 0.55 %.

CUADRO 7.4: Tabla de contingencia

		Eventos observados		
		si	no	Total
Eventos pronosticados	si	9	11	20
	no	3	—	—
Total		12	—	—

Discusión de resultados y Conclusiones

Los anteriores capítulos presentan el análisis de medidas de campo electrostático en condiciones de tormenta, realizadas en tres lugares diferentes y a diferentes latitudes como son Navarra - España (42°N a 44°N), Florida - EEUU (28°N a 29°N) y Cundinamarca - Colombia (4°N a 5°N). El propósito de éste tipo de experimentos, realizados desde 1914 [1], ha sido principalmente estudiar la estructura eléctrica de la nube de tormenta y la caracterización de la carga asociada con descargas intranube y nube-tierra. La presente tesis usa los mismos principios de medida y procedimientos similares de análisis de datos, sin embargo el propósito principal no es caracterizar la carga eléctrica, sino estudiar el desempeño de los sensores de campo electrostático con el ánimo de poder dimensionar el efecto de diversos factores de incertidumbre como la topografía, la gran dispersión que presentan los cambios de campo eléctrico ΔE asociados al rayo en función de la distancia o el error debido al sitio de instalación, y de allí, poder construir curvas de operación o curvas características, que permitan usar sensores de campo electrostático instalados en condiciones reales, para la implementación de sistemas de alerta de tormentas.

8.1. Principales aportes sobre la técnica de medida

La recopilación de los diferentes experimentos y desarrollos publicados desde 1908, acerca de la medida de campo electrostático durante episodios de tormenta, permite rescatar una serie de experiencias que evidencian la dificultad y la incertidumbre. De tal revisión pueden extraerse los siguientes problemas de medida comunes:

- El rango de medida: Las diferentes publicaciones muestran la gran variabilidad presentada por los cambios bruscos producidos por rayos a diferentes distancias. Investigadores como Wilson [1, 2], Schonland [28, 29, 30] y Wormell [3] mostraron un afán por desarrollar diferentes tipos de dispositivos que puedan alternarse para medir tormentas cercanas o lejanas, dado que un sólo instrumento no estaba en capacidad de medir en todo el rango de distancias. De igual forma, los primeros experimentos con múltiples estaciones, como el realizado por Reynolds [4], evidencian una gran dificultad para controlar las ganancias que deben aplicarse a todas las estaciones de medida para registrar un mismo evento desde diferentes distancias. Como conclusión se encuentra que es indispensable que los sensores de campo electrostático usen dispositivos de digitalización de alta resolución, para poder ser caracterizados e implementados como sistemas de alerta de tormentas.
- La medida de la distancia: Prácticamente todas las investigaciones realizadas desde 1916 hasta nuestro días, muestran que la distancia es una variable indispensable para poder obtener soluciones de carga; dado lo anterior se han usado desde sistemas de estimación de distancia basados en la diferencia de tiempos entre la toma de los registros y el trueno, hasta redes de detección total de rayos. Para ésta tesis en particular, la construcción de curvas de operación para una estación de medida específica depende de la determinación de la distancia. Como conclusión parcial se obtiene que, para propósitos operativos, es indispensable contar con un sistema de localización de rayos confiable, en la misma región de cobertura de un molino de campo usado en aplicaciones como sistemas de alarma.
- Lluvia intensa y tormentas cercanas: Inicialmente Wormell en 1939 [3] desarrolla el primer instrumento de medida invertido, el cual hace viable reducir las distorsiones asociadas con medidas de campo electrostático principalmente en condiciones de lluvia. Ésta modificación le permitió a Wormell obtener una mayor cantidad de medidas de cambios de campo eléctrico, comparado con las investigaciones previas y construir una distribución más completa del comportamiento de ésta variable en función de la distancia. Dado que el estudio operacional planteado en ésta tesis se basa en la construcción de distribuciones confiables de las variaciones de campo eléctrico en función de la distancia, puede concluirse que es indispensable usar dispositivos invertidos para propósitos de calibración.
- Discriminación de rayos intranube y nube-tierra: Desde los primeros experimentos se ha buscado identificar los eventos asociados con descargas nube-tierra dado que pueden ser analizados mediante un modelo de carga menos complejo. Inicialmente se realizó mediante inspección visual (e.j. Schonland, 1927), posteriormente se usaron fotografías de los canales (e.j. Jacobson y Krider, 1976 [36]) y finalmente se usan sistemas de localización de rayos que estén en capacidad de realizar una discriminación confiable (e.j. Murphy, 1996 [10]; Montanya, 2004 [42]). Dado lo anterior, además de contar con un sistema de localización de rayos confiable, es necesario que dicho sistema realice también una discriminación confiable del tipo de descargas registradas.

En resumen, la revisión de tipo operacional de los diversos experimentos muestra que deben cumplirse las siguientes condiciones para que un sensor de campo electrostático pueda ser caracterizado, ajustado e implementado en aplicaciones como un sistema de alerta de tormentas:

- Debe tener una resolución de digitalización alta (mínimo 14 bits) o un sistema de autoescala.
- Debe ser invertido.
- Debe contarse con un sistema de localización de rayos de alta eficiencia y confiable en la discriminación del tipo de descarga.

Los sistemas experimentales usados en la presente tesis cumplen con los requisitos mínimos mencionados anteriormente:

- Se usó información proveniente de 31 molinos de campo en Florida, en donde los sensores son invertidos y usan una resolución de digitalización de 14 bits. Dos sistemas confiables de localización de rayos fueron utilizados en éste estudio, CGLSS y LDAR.
- En Navarra se usaron sensores invertidos de tres tipos diferentes de fabricantes, con una resolución de digitalización de 16 bits. La localización y discriminación de rayos fue realizada por LINET, que es en la actualidad el sistema de detección total de rayos más eficiente y confiable que existe para grandes extensiones.
- En Colombia se usaron sensores de campo electrostático diseñados, construidos e instalados por el autor de la tesis. Su configuración es invertida y la resolución de digitalización es 14 bits. El sistema de localización de rayos usado es el SID, que es una red de detección de descargas nube-tierra.

Con respecto al desarrollo tecnológico de sensores de campo electrostático en Colombia, se resaltan los siguientes aspectos:

- Se diseñó un dispositivo de medida basado en los conceptos generales del funcionamiento de los molinos de campo eléctrico típicos; sin embargo se desarrolló un principio de medida original e ingenioso para la generación de una señal asimétrica que proporciona la información de amplitud y polaridad del campo eléctrico incidente. Para ello se usó una configuración de elementos mecánicos (rotor y estator), en donde sus dimensiones fueron ajustadas especialmente para controlar las variables eléctricas que dan lugar a la señal asimétrica.

En 1950, Malan y Schonland [9] presentaron un diseño en el que un arreglo mecánico especial hacía una pequeña modificación en la señal cada determinados ciclos y permitía identificar la polaridad. El diseño presentado en ésta tesis puede decirse que funciona

con un principio mejorado, respecto al diseño de Malan y Schonland, en el que no se requiere ningún arreglo adicional sino que mediante un cálculo apropiado de los componentes mecánicos, usando una configuración de ventanas de inducción, se obtiene una señal asimétrica continua y estable.

Las principales ventajas del nuevo diseño se reflejan en el uso de menos componentes electrónicos comparado con los diseños comunes; por lo que se aumenta la confiabilidad del equipo y se reducen los requerimientos de control.

- Las características propias de la señal asimétrica permitieron desarrollar un método de filtrado por ventana en el que se eliminan con facilidad todas las componentes de alta frecuencia y las perturbaciones de frecuencia industrial (60 Hz).
- Tareas como la determinación de la amplitud y polaridad de la señal, así como el filtrado, se hace mediante hardware en los diseños convencionales de molinos de campo. En el diseño realizado, dichas tareas se hacen mediante software.

8.2. Principales aportes sobre los aspectos operacionales

- Se analizaron más de 200000 cambios de campo eléctrico en Florida, de los cuales se escogieron 35529 apropiados para crear una distribución estadística que puede ser considerada como un patrón de calibración. De acuerdo con la revisión bibliográfica, ésta tesis presenta la muestra más grande de medidas de cambios de campo eléctrico para una estación aislada.
- Los cambios de campo eléctrico escogidos para el patrón de calibración fueron seleccionados mediante el uso del procedimiento de mínimos cuadrados no-lineal comúnmente usado para obtener soluciones de carga a partir de medidas simultáneas; en éste caso se usaron criterios de optimización más permisivos, ya que el propósito no era hacer estimaciones precisas de carga, sino conocer la distribución de medidas esperada para un sensor aislado. En lo posible se evito sesgar la distribución con criterios muy selectivos.

Mediante la evaluación de las soluciones proporcionadas por el método de optimización y el uso de las detecciones de VHF realizadas por LDAR, se identificaron todos los eventos que presentaban una configuración de carga compleja, es decir, aquellos casos que no eran correctamente representados mediante un modelo de carga puntual o bipolar.

- La presencia de eventos con estructuras complejas de carga pudo evidenciarse en las distribuciones de ΔE en función de la distancia; lo que impedía crear una distribución característica del equipo (e.j. Figura 5.8).

- Los registros del LDAR permitieron observar que dichas distribuciones complejas estaban dadas por eventos nube-tierra con una gran componente intranube y mucha propagación horizontal (e.j. 5.13).
- Mediante una reconstrucción en tiempo y espacio de los episodios de tormenta en los que se observaron distribuciones de carga complejas (e.j. Figuras 5.14 y 5.15), se observó que los eventos que presentaban buen ajuste con respecto al modelo de carga puntual o bipolar se daban durante la etapa de aproximación de la nube de tormenta, mientras que los eventos con distribuciones complejas de carga se daban después que la tormenta alcanzaba el punto de medida y empezaba a alejarse.

El anterior comportamiento está muy probablemente relacionado con descargas que toman grandes cantidades de carga en regiones extendidas horizontalmente, dentro de las regiones estratiformes que comúnmente son observadas siguiendo el frente de desplazamiento de celdas convectivas [5].

Dado lo anterior se puede concluir que para efectos de calibración sólo deben considerarse las variaciones de campo eléctrico producidas por rayos nube-tierra durante la etapa de aproximación.

- A partir de los anteriores hallazgos se plantearon los criterios para seleccionar los eventos que debían conformar la distribución patrón. La Figura 5.21 es un ejemplo de cómo mejora la distribución de ΔE en función de la distancia mediante una selección apropiada de los eventos. Las distribuciones obtenidas después del filtrado muestran muy buena correspondencia con la distribución esperada teóricamente al considerar la distribución estadística de los parámetros de carga y altura.
- El análisis de regresión para una distribución depurada muestra que el valor medio para la distancia $d = 0$, para los sensores en Florida es de aproximadamente 3 kV/m, con un intervalo de confianza (95 %) para $d = 0$ de aproximadamente 2200 V/m. Los anteriores resultados muestran que el valor medio esperado para $d = 0$, con una probabilidad de 95 % tiene un rango de variación de 2200 V/m. Los anteriores valores reflejan una incertidumbre alta a la hora de definir un modelo matemático para la representación de la distribución.

El intervalo de confianza de 95 % muestra un incremento considerable en amplitud para distancias menores a 5 km y mayores a 22 km. Con base en lo anterior se puede concluir que el rango entre 5 y 22 km es el recomendado para realizar el ajuste.

- Dado que los sensores tienen el mismo modo de instalación, se encuentran en la misma región y presentan distribuciones de ΔE en función de la distancia muy cercanas; es

posible combinar los datos de las 31 estaciones de medida para ser considerados como la distribución de una única estación. Ésta nueva distribución con 35529 datos permitió conformar finalmente el patrón de medida. Dos características hacen al patrón único y aplicable para propósitos de calibración:

- La distribución patrón presenta un intervalo de confianza aproximadamente 10 veces más angosto que el presentado por un único sensor. La distribución patrón presenta una variación del valor medio de 425 V/m para $d = 0$, dentro del intervalo de confianza de 95 %, mientras que la misma variación para una única estación es de aproximadamente 3200 V/m.
 - Los ΔE presentan una distribución homogénea con la distancia; mientras una estación aislada presenta mayor cantidad de datos a medida que aumenta la distancia.
- La siguiente tabla resume las características del patrón obtenido:

CUADRO 8.1: Resumen de modelos matemático y físicos para la distribución patrón de ΔE .

Modelo	Parámetros / valores
Modelo matemático	$\Delta E = 10^{3.554+0.0256 \cdot D - 0.00248 \cdot D^2 + 0.000061 \cdot D^3}$; D en km
$VAR(\log(\Delta E))$	0.341
$Stdev(\log(\Delta E))$	0.584
Intervalo de confianza IC	3.35 a 3.78 (0.425) kV/m (para $d=0$)
Intervalo de predicción IP	0.76 a 16.6 kV/m (para $d=0$)
Modelo de carga puntual	$\Delta Q = -20.73$ C, $H = 10681$ m
Modelo de carga bipolar	$\Delta Q_1 = -25.07$ C, $H_1 = 8976$ m, $\Delta Q_2 = 5.55$ C, $H_2 = 5946$ m

- A pesar de que la distribución patrón está basada en tormentas de verano en Florida, ésta puede ser usada en otras áreas geográficas con una climatología similar, en relación con la altura y la magnitud típica de la carga removida por descargas nube-tierra (e.j. regiones subtropicales y la mayoría de las tormentas en latitudes medias).
- Los resultados obtenidos de registros en Bogotá - Colombia, muestran que al menos la altura de la carga removida por descargas nube tierra en esa región es similar a la obtenida para las tormentas en Florida. La misma conclusión puede obtenerse de los resultados obtenidos en Navarra.
- De otro lado, los molinos de campo electrostático instalados en Navarra permitieron hacer una evaluación teórica y experimental del efecto de la topografía en la respuesta de los sensores. Los once sensores de la red se encuentran muy separados de modo que relativamente muy pocos eventos de rayos nube-tierra pueden ser registrados por más

de dos sensores a la vez; no obstante se encuentran lo suficientemente cerca como para ser influenciados por la misma tormenta.

Considerando que la nube de tormenta mantiene durante su madurez el comportamiento medio de la altura y magnitud de las cargas removidas por los rayos nube tierra, es posible plantear en Navarra un escenario de patronamiento a gran escala de sensores ubicados en terreno plano y en montaña.

- Al realizar un análisis teórico basado en simulaciones de elementos finitos, en las cuales se considera la topografía, se obtiene que el efecto topográfico se ve reflejado en un cambio en la proporción con que los ΔE se reducen a medida que aumenta la distancia. Al comparar en la simulación el caso de terreno plano y un caso con topografía, se encuentra que un sensor ubicado en montaña presenta una reducción de los ΔE en función de la distancia mucho más pequeña, lo que hace que rayos a distancias considerables produzcan ΔE grandes; en cambio, un sensor en terreno plano presenta una reducción más notoria de los ΔE con la distancia, de forma tal que rayos a 20 km presentan ΔE muy pequeños (un orden de magnitud más bajos).
- Si se establece la relación $\Delta E_{montaña}/\Delta E_{terrenoplano}$, se obtiene que dicha relación tiende a aumentar con la distancia. La anterior relación puede considerarse como una medida del efecto topográfico.
- Para el estudio fueron considerados 33 eventos de tormenta, entre marzo y octubre de 2010, detectados por uno o más sensores. Tomando como referencia los resultados obtenidos en Florida, se realizó un filtrado de los eventos que posiblemente estaban relacionados con distribuciones complejas de carga. Como resultado se obtuvieron distribuciones para ΔE en función de la distancia con un número de datos que varía entre 303 para la estación 11 y 4504 para la estación 1.
- El método de análisis se basó en la comparación entre las distribuciones de datos obtenidas para una referencia de terreno plano y un sensor ubicado en terreno montañoso. Como referencia de terreno plano se usaron los sensores 8 y 9 ubicados en una planicie a aproximadamente 400 msnm y como punto de prueba se usó el sensor número 1 ubicado en una montaña a 1107 msnm.
- Un resultado interesante se obtiene al comparar las distribuciones del sensor de referencia de terreno plano en Navarra y la distribución patrón obtenida en Florida. Las dos distribuciones al ser analizadas considerando su comportamiento Log-normal y al realizarse un análisis de regresión, se obtienen líneas de regresión paralelas para el comportamiento del ΔE en función de la distancia. La carga media de la distribución en

Florida es -25,07 C mientras en Navarra (sensor 9) es 41,7 C. La diferencia entre los dos sensores radica principalmente en que en Navarra hay errores de sitio considerables, al ubicar los equipos sobre estructuras.

El anterior resultado aporta las bases para concluir que, a pesar de que un sensor en una región plana se instale sobre una edificación, la distribución de sus medidas tiende a presentar el mismo comportamiento que el patrón. Aparentemente la diferencia en las magnitudes de carga son la medida del factor de amplificación dado por las condiciones de instalación.

- Para comprobar experimentalmente el comportamiento observado en las simulaciones, se tomo un evento en el que la tormenta pasa inicialmente cerca al sensor de referencia de terreno plano y posteriormente se desplaza hasta el sensor en montaña. Se realizó una nueva simulación considerando el perfil real del terreno recorrido por la tormenta y se evaluó la relación $\Delta E_{montaña}/\Delta E_{terrenoplano}$ teórica.

Con base en las distribuciones obtenidas experimentalmente para ese episodio de tormenta y realizando regresiones, se obtuvo la relación $\Delta E_{montaña}/\Delta E_{terrenoplano}$ comparando ambos sensores.

- Los resultados experimentales y teóricos fueron coherentes; por lo que se comprueba el efecto que la topografía produce en la forma como se comportan los ΔE con la distancia.

Puede concluirse entonces que el efecto topográfico, para un sensor ubicado en terreno montañoso, puede estimarse mediante el análisis de su propia distribución de datos y su comparación con un patrón dado.

- Adicionalmente se observa que los resultados teóricos y experimentales son coherentes en el rango de distancias entre 6 y 21 km. Los errores a distancias cortas pueden tener explicación en que los modelos de carga puntual o bipolar pierden validez a éstas distancias, adicionalmente a distancias cortas se cuenta con un número mucho menor de datos lo que conduce a regresiones menos precisas. A grandes distancias, mayores a 20 km, el principal factor de error es que las medidas hechas bajo condiciones de terreno plano tienden a valores cercanos a cero. De lo anterior se concluye que en general debe usarse un rango entre 5 y 20 km para realizar un análisis de efecto topográfico.
- Similar al caso del sensor no. 9 en Navarra, una estación de medida en Bogotá - Colombia se encuentra ubicada en terreno plano (sobre la sabana de Bogotá), lo que permitió obtener una distribución de referencia y compararla con los casos de Florida y Navarra. La gran diferencia de éste equipo es que se encuentra ubicado a 2600 msnm.

En la construcción de la distribución de ΔE vs distancia se analizaron 9 episodios de tormentas ocurridos a finales de 2010, con un total de 491 datos válidos. Como resultado se obtiene una distribución que se ajusta a un modelo bipolar de carga con alturas de 5,86 y 3,76 km y cargas de -22 C y 6.8 C respectivamente. Si se hace la corrección por la altura a la que se encuentra el sensor, se obtienen alturas de 8.46 y 6.36 km. Los valores obtenidos son muy cercanos a las alturas de 8.98 y 5.95 km obtenidos en Florida.

- De los anteriores resultados se concluye que, a pesar de que un sensor en una región plana se instale sobre una edificación y que la región se encuentre a una altura considerable sobre el nivel del mar, la distribución de sus medidas tiende a presentar el mismo comportamiento que el patrón.
- Los análisis realizados en los tres lugares permiten presentar la siguiente tabla que resume la distribución patrón y las referencias de terreno plano. Los parámetros dados en la tabla pueden ser usados para ajustar otros sensores en las regiones donde se encuentran los equipos de referencia que han sido estudiados.

CUADRO 8.2: Comparación entre los resultados de ajuste del sensor en Bogotá, el sensor no. 9 en Navarra y el patrón obtenido de los sensores del KSC en Florida. Los valores entre paréntesis indican el ancho del intervalo de confianza para $d = 0$.

Parámetro	Patrón (Florida)	Sensor no. 9 (Navarra)	Bogotá (Colombia)
N	35529	1990	491
ΔE medio ($d=0$)	3.581 kV/m	7.173 kV/m	5.85 kV/m
IC 95 % ($d=0$)	3.35 a 3.78 (0.425) kV/m	5.19 a 9.91 (4.72) kV/m	3.5 a 9.76 (6.26) kV/m
IP 95 % ($d=0$)	0.76 a 16.6 kV/m	0.92 a 55.7 kV/m	0.79 a 43.3 kV/m

- Adicionalmente, los estudios realizados permitieron aportar mediciones y estimaciones acerca de los parámetros de carga asociados a los rayos nube-tierra en las tres regiones de estudio. Los valores de carga en Navarra y Bogotá, son ambiguos ya que dependen del error de sitio; no obstante los valores de altura son parámetros muy confiables que se derivan directamente de la proporción en que se reducen los ΔE con la distancia, comportamiento que es independiente de la carga involucrada.
- El capítulo séptimo presentó el estudio de los criterios de alarma basados en medidas de campo electrostático, tomando como lugares de prueba a Florida (veranos de 2009), Terrassa - Cataluña (veranos de 2006 y 2006) y Bogotá (noviembre de 2010).
- En Terrassa se consideraron siete episodios de tormenta. El POD obtenido para el criterio basado en el umbral de campo eléctrico de 1 kV/m es de 37.5 %, mientras que el criterio basado en el cambio de polaridad presentó un POD de 47 %. Lo anterior indica que el método tiene aún un gran componente de fallos de alarma. Para mejorar dicho

CUADRO 8.3: Valores de carga eléctrica y altura derivados de medidas en diferentes lugares del mundo

Lugar	Carga [C]	Altura [km]	Investigador
Inglaterra	-11.5 a -43	7	Wilson (1916)
Inglaterra	-20	2	Wilson (1920)
Sudáfrica	-15	3	Schonland (1928)
Inglaterra	-10 a -40	4.5 a 5	Wormell (1939)
Nuevo Mexico	-24	4 a 7	Workman (1942)
Sudáfrica	-4 a -40	2.5 a 8.7	Barnard (1951)
Sudáfrica	—	4 a 8.5	Malan (1951)
Japón	-6 a -55	6 a 8	Tamura (1954)
Nuevo Mexico	-5 a -20	4.3 a 7.2	Reynolds (1955)
Japón	-50 a -150	4 a 8	Hatekeyama (1958)
Nuevo Mexico	-5 a -60	3 a 8	Brook (1962)
Hong Kong	-25	4	Wnag (1963)
Japón	-20	3.5 a 5.5	Takeuti (1966)
Australia	-17	3	Mackerras (1968)
Nuevo Mexico	-30 a -48	4.5 a 6	Krehbiel (1974)
Florida	-10 a -40	6 a 9.5	Jacobson (1976)
Nuevo Mexico	-47	5.5	Krehbiel (1979)
Florida	-5 a -33	5 a 10	Maier (1986)
Florida	-7 a -49	8	Koshak (1989)
Florida	-9 a -48.4	3.5 a 16.6	Krider (1989)
Florida	—	8	Murphy (1996)
Cataluña	-4.5 a 45 (-9.7)	6.7	Montanyà (2004)
Florida	-25.1, 5.55	8.98, 5.95 (bipolar)	Aranguren (2011)
Navarra (España)	—	9.19	Aranguren (2011)
Bogotá (Colombia)	—	8.42, 6.32 (bipolar)	Aranguren (2011)

desempeño podría usarse un umbral de campo eléctrico menor, siguiendo el comportamiento de la Figura 7.4; sin embargo el número de alarmas encendidas y de falsas alarmas aumentaría.

- En términos generales, el criterio basado en el cambio de polaridad mostró mejor desempeño comparado con el criterio basado en el umbral; como se aprecia en la Figura 7.6, el POD es mayor, el FAR es menor y la relación de rayos pronosticados contra fallos de alarma es mayor.
- Para un umbral de 1 kV/m en Florida, *Murphy et al.* [85] había encontrado un POD de 34.4% para dos de los 31 sensores en Florida; al realizar el análisis individual de cada sensor, se encuentran diferencias importantes entre los valores de POD; la principal razón está en que el número de alarmas y el número de rayos nube-tierra dentro de las AOC cambia de un sensor a otro. No obstante, si se considera que los sensores se encuentran en la misma región y tienen características casi idénticas de calibración; es posible combinar los datos de los 31 sensores para realizar un análisis estadístico general

con una muestra más representativa.

- Usando los registros de los 31 molinos de campo en Florida pudo obtenerse una cantidad de datos mucho mayor que el caso de Terrassa, lo que permitió obtener resultados más confiables con tendencias más marcadas. El POD y el FAR (Figura 7.11) muestran una relación más definida con el umbral de campo eléctrico. Para el umbral de 1 kV/m el POD es 69.7 % y el FAR 64.2 %; éstos resultados con más confiables y mejores que los obtenidos para una estación aislada (POD=34.4 % y FAR=89 %).
- Un análisis similar al realizado en Terrassa se adelantó con registros de nueve episodios de tormenta en Bogotá, durante noviembre de 2010. Como primer resultado se obtiene que el rango de variación de los umbrales de campo eléctrico debe ser mayor; la principal razón es que el sensor en Bogotá se encuentra ubicado a 2600 msnm y durante un episodio de tormenta se encuentra relativamente más cerca de los centros de carga de la nube. Mientras para los sensores en Florida y Terrassa se usó un rango de 3 kV/m, en Bogotá fue necesario usar un umbral de 6 kV/m.
- Si se usara un umbral de 1.2 kV/m en Bogotá, el POD sería de 90 % y el FAR de 60.1 %; éste parece ser el umbral que mejor equilibra el método de predicción en términos de POD y FAR
- En términos generales, el sensor en Bogotá presentó un desempeño semejante a lo encontrado en Florida; la principal diferencia está en que todos los parámetros de verificación de predicción se encuentran desplazados hacia umbrales de campo eléctrico mayores, debido a la altura de instalación del equipo.
- Con respecto a los valores altos de FAR encontrados en todos los casos, es pertinente recalcar que en éste análisis se consideró como una falsa alarma el caso en el que no ocurriera una descarga nube-tierra dentro del AOC después de una activación de alarma; no obstante, el hecho de que no ocurra la descarga no necesariamente implica que no haya habido riesgo por la presencia de una nube electrificada.
- Es importante para futuros trabajos perfeccionar los criterios para definir los casos de alarmas efectivas y falsas alarmas; para ello es posible usar métodos de verificación de predicciones basados en análisis de dicotomía por categorías, en las que se pueda analizar no solamente si “sí” o “no” ocurre la descargas dentro del área de interés, sino otros factores como por ejemplo el estado de madurez de la tormenta o los *lightning rates* que permiten medir la su intensidad.

8.3. Conclusiones

A partir de la revisión bibliográfica se lograron establecer las características operativas mínimas que debe cumplir un sensor de campo electrostático y el tipo de información requerida para poder construir las curvas de operación de éste tipo de sensores. Puede concluirse que todos los instrumentos usados en la presente tesis cumplen con dichos requerimientos mínimos.

Los instrumentos diseñados, contruidos e implementados en Colombia cumplen también con los requerimientos mínimos de operación, de tal forma que los resultados obtenidos de dichos instrumentos pueden ser comparados con los obtenidos de los sistemas en España y Estados Unidos.

El análisis de datos provenientes de un gran número de sensores y episodios de tormenta en diferentes lugares permitió concluir que las distribuciones de ΔE contra distancia son suficientes para conocer el patrón de comportamiento de un sensor en específico y desarrollar a partir de allí metodologías de calibración.

La gran cantidad de sensores y datos usados para tormentas en el Centro Espacial Kennedy, permitieron construir el patrón de comportamiento de los ΔE con mayor número de datos hasta el momento (35529), con valores de incertidumbre muy bajos, lo que permite concluir que dicha distribución puede ser considerada como referencia o patrón de calibración.

La tesis permitió hacer una abstracción del efecto de la topografía en los patrones de comportamiento de los molinos de campo, validada experimental y teóricamente. Se concluye que dicho efecto topográfico puede ser obtenido mediante la reconstrucción de la distribución estadística de los ΔE en función de la distancia y su comparación con referencias de terreno plano.

Los resultados obtenidos para el sensor instalado en Bogotá permitieron desarrollar una primera distribución patrón en Colombia. Las principales características de dicha distribución es que se hace para zona tropical y en condiciones de terreno plano pero a una altura considerable sobre el nivel del mar; lo que la convierte en la principal referencia a ser usada para sensores instalados en Colombia.

Patrones comportamiento de los sensores del KSC/CCAFS

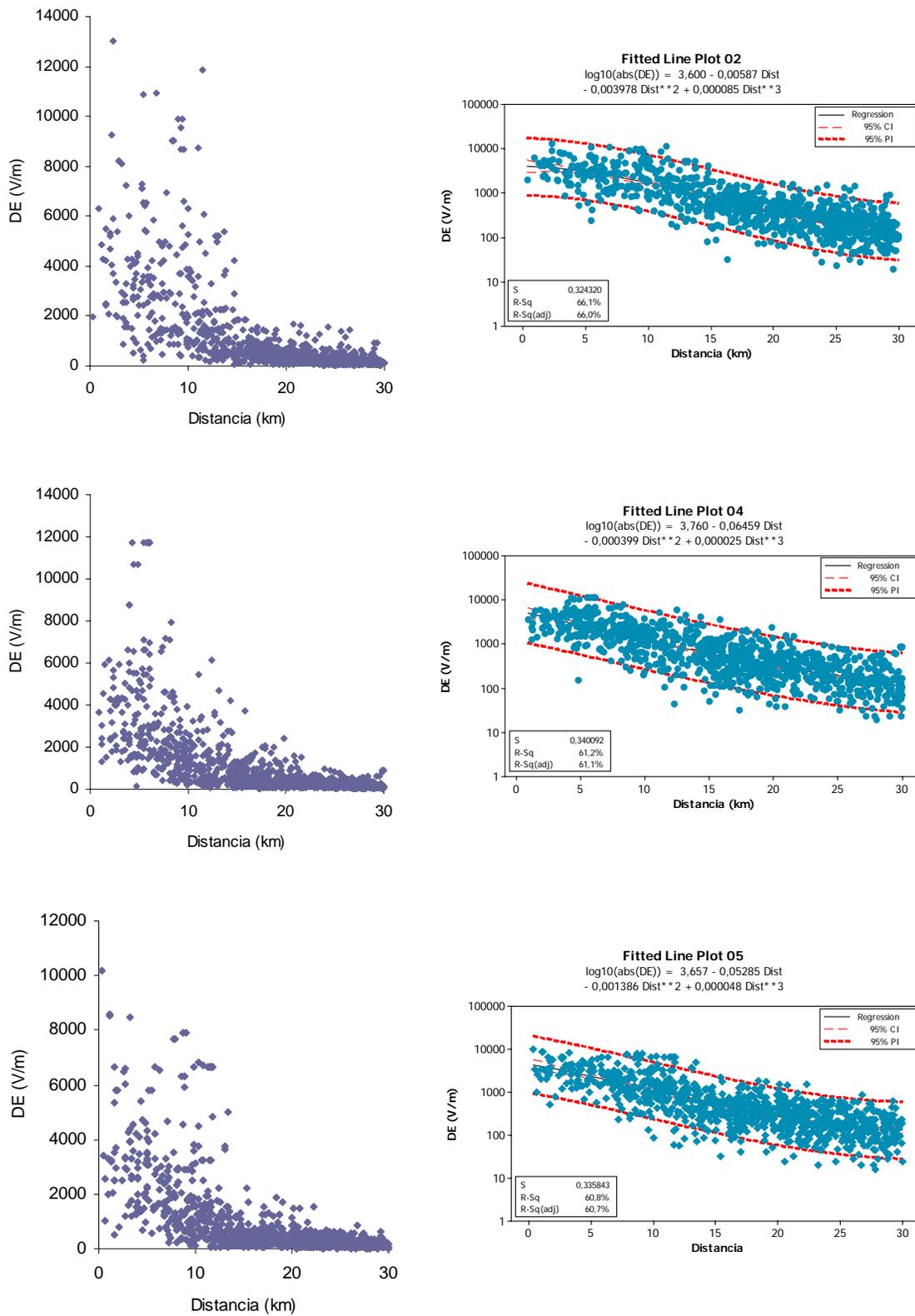


FIGURA A.1: Molinos de campo 2 a 5.

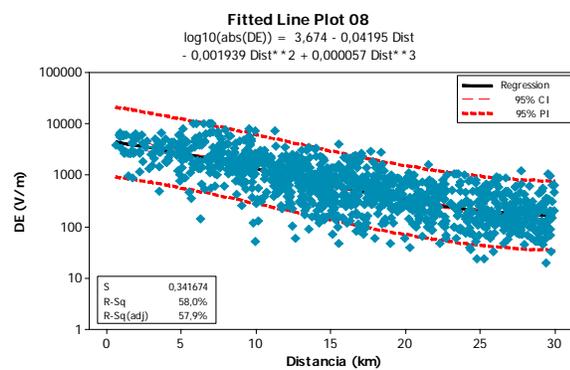
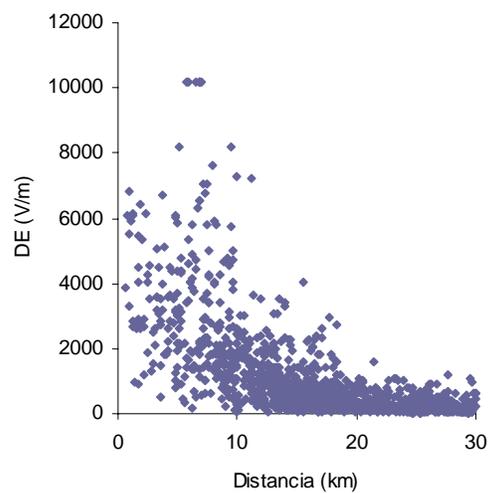
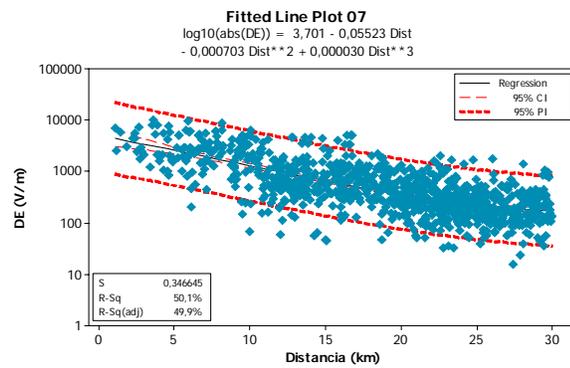
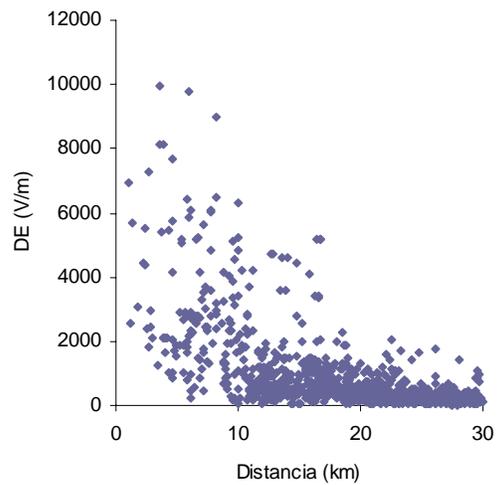
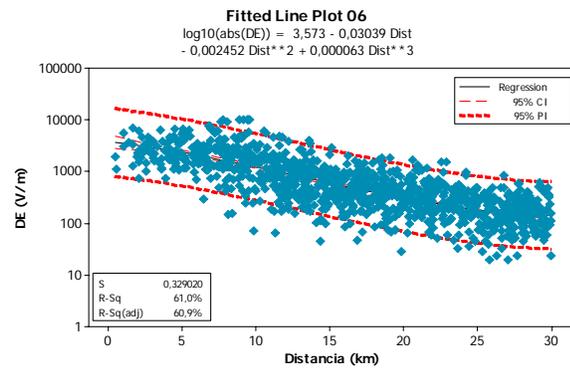
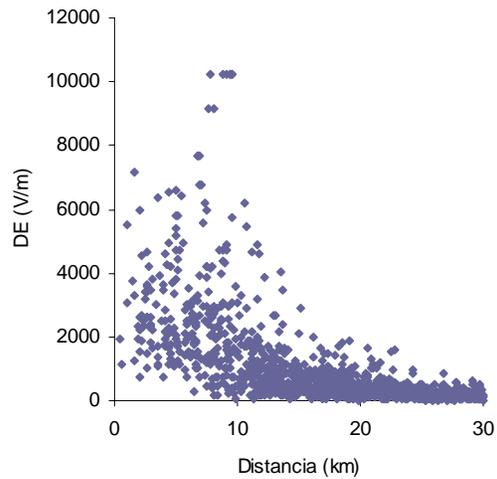


FIGURA A.2: Molinos de campo 6 a 8.

Bibliografía

- [1] Wilson C. T. R. On some determinations of the sing and magnitude of electric discharges in lightning flashes. *Proc. Roy. Soc.*, (A92):555–574, 1916.
- [2] Wilson C. T. R. Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorm. *Philos. Trans. A.*, (221):73–117, 1920.
- [3] Wormell T.W. The effects of thunderstorms and lightning discharges on the earth's electric field. *Proc. Roy. Soc.*, (A238):249–303, 1939.
- [4] Reynolds S.E. and H.W. Neill. The distribution and discharge of thunderstorm charge centres. *Proc. Meteor.*, (12):1–12, 1955.
- [5] MacGorman D. T. Rust W. D. *The Electrical Nature of Storms*. Oxford University Press, New York, 1998.
- [6] Rakov V. Uman M. *Lightning. Physics and effects*. Cambridge University Press, 2005.
- [7] Solomon R. Adamo C. Baker M. A lightning initiation mechanism: application to a thunderstorm electrification model. *C. R. Physique*, 3:1325–1333, 2002.
- [8] Koshak W. Krider E. Analysis of lightning field changes during active florida thunderstorm. *Journal of Geophysical Research*, 94(D1):1165–1186, January 1989.
- [9] Malan D.J. Schonland B.F.J. An electrostatic fluxmeter of short response-time for use in studies of transient field changes. *Proc. Phys. Soc.*, (B63):402–408, 1950.
- [10] Murphy M. Krider E. Maier M. Lightning charge analyses in small convection and precipitation electrification (cape) experiment storm. *Journal of Geophysical Research*, 101(D23), 1996.
- [11] *Meteorological-CCAFS-81900-Launch Pad Lightning Warning System (LPLWS)*. NOAA, 2002.

-
- [12] IEC62305. *Protection against lightning*. International Electrotechnical Commission, 2010.
- [13] EN50536. *Protection against lightning - Thunderstorm warning systems*. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010.
- [14] ACRP Report 8. *Lightning-Warning Systems for Use by Airports*. Airport Cooperative Research Program, Federal Aviation Administration, USA, 2008.
- [15] NOAA 's National Weather Service. Office of climate, water, and weather services.
- [16] Copper M. A. *Lightning injuries*. Wilderness Medicine, fifth ed. Auerbach, Mosby, 2007.
- [17] Holle R.L. Annual rates of lightning fatalities by country. *International Lightning Detection Conference*, April, 2008.
- [18] Copper M.A. Ab Kadir M. and Gomes C. An overview of the global statistics of lightning fatalities. *International Conference on Lightning protection*, Cagliari, Italy, 2010.
- [19] Casos de muertes y lesiones por rayos en colombia reportados durante el 2010. *www.scite.unal.edu.co*, 2010.
- [20] Andrews C. Copper M.A., Holle R. Distribution of lightning injuries mechanisms. *International Conference on Lightning protection*, Cagliari, Italy, 2010.
- [21] Holle R. Brooks H. Lengyel M., Copper M.A. The role of multidisciplinary teams and public education in decreasing lightning casualties worldwide. *International Conference on Lightning protection*, Cagliari, Italy, 2010.
- [22] Evans D. J. A review of underground fuel storage events and putting risk into perspective with other areas of the energy supply chain. *Geological Society*, London, Special Publications, 2009.
- [23] Alfred B. Chen et al. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 113, A08306, doi:10.1029/2008JA013101,, 2008.
- [24] Montanyà J. van der Velde O. Soula S. Neubert T. Bech J. Mika A. Analysis of lightning associated with a sprite displaced from its parent positive cloud to ground lightning flash. *Geophysical Union General Assembly, Viena (Austria)*, 2007.
- [25] Soula S. van der Velde O. Montanyà J. Mika A. Haldoupis C. Neubert T Ganot M Labbouz. L. Analysis of thunderstorm systems and lightning activity associated with sprites observed during the eurosprite campaigns: 2- case studies. *Int. Conf. on Atmp. Electricity, Beijing (China)*, 20047.

-
- [26] Krider E. P. *Benjamin Franklin and the First Lightning Conductors*. International Commission on History of Meteorology, 2004.
- [27] Labaree L. W. et al. *The Papers of Benjamin Franklin*, volume 35. Yale University Press, New Haven, 1999.
- [28] Schonland B.F.J. and M.A Craib. The electric fields of south african thunderstorms. *Proc. Roy. Soc.*, (A114):229–243, 1927.
- [29] Schonland B.F.J. The polarity of thunderclouds. *Proc. Roy. Soc.*, (A118):233–251, 1928.
- [30] Schonland B.F.J. The interchange of electricity between thunderclouds and the earth. *Proc. Roy. Soc.*, (A118):252–262, 1928.
- [31] Workman E.J. R.E. Holzer G.T. Pelsor. The electrical structure of thunderstorms. *NASA Tech. Note*, (864):47, 1942.
- [32] Takeuti T. Studies on thunderstorm electricity. ii. ground discharge. *J. Geomagn. Geoelec.*, (18):13–22, 1966.
- [33] Ogawa T. and M. Brook. Charge distribution in thunderstorm clouds. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, (95):513–525, 1969.
- [34] Krehbiel P. Brook M. McCrory R. Lightning ground stroke charge location from multi-station electrostatic field change measurements. *Proc. Fifth Intern. Conf. Atmospheric Electricity*, Gramisch-Partenkirchen, Germany, 1974.
- [35] Krehbiel P. Brook M. McCrory R. An analysis of the charge structure of lightning discharges to ground. *Journal of Geophysical Research*, 84:2432–2456, 1979.
- [36] Jacobson E.A. Krider E.P. Electrostatic field changes produced by florida lightning. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 33:103–117, 1976.
- [37] Maier L.M. Krider E.P. The charges that are deposited by cloud-to-ground lightning in florida. *Journal of Geophysical Research*, 91:13271–13289, 1986.
- [38] Krider E. P. Electric field changes and cloud electrical structure. *Journal of Geophysical Research*, 94(D11), 1989.
- [39] Nisbet J. Barnard T. Forbes G. Krider E. Lhermitte R. Lennon C. A case study of the thunderstorm research international project storm of july 11, 1978. 1. analysis of the data base. *Journal of Geophysical Research*, 94(D5), 1990.
- [40] Murphy M. The electrification of florida thunderstorm. *PhD. Thesis, Department of Atmospheric Sciences, University of Arizona*, 1996.
- [41] Montaña J. *Estudio de la Carga Eléctrica asociada al Rayo: Caracterización de las tormentas en Cataluña*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Enginyeria Elèctrica, Terrasa, 2004.

-
- [42] Montanyà J. Soula S. Murphy M. March V. Aranguren D. Solà G. Romero D. Estimation of charge neutralized by negative cloud-to-ground flashes in catalonia thunderstorm. *Journal of Electrostatics*, (67), 2009.
- [43] Barnard V. The approximate mean height of the thundercloud charges taking part in a flash to ground. *J. Geophys. Res.*, (56):33–35, 1951.
- [44] Tamura Y. Investigations on the electrical structure of thunderstorms. *Recent Advances in Atmospheric Electricity*, Pergamon Press, pages 269–276, 1958.
- [45] Hatekeyama H. The distribution of the sudden change of electric field on the earth's surface due to lightning discharge, recent advances in atmospheric electricity. *Pergamon Press*, pages 289–298, 1958.
- [46] Uman Martin. A. *The Lightning Discharge*. Academic Press. Orlando, Florida, 1987.
- [47] Moore C. B. Vonegut B. *The thundercloud*. in: *Lightning Vol. I, Physics of Lightning*. Ed. by R. H. Golde.
- [48] Magono J. *Thunderstorms*. New York: Elsevier, 1980.
- [49] Illingworth A.J. Charge separation in thunderstorms. *Journal of Geophysical Research*, 90:6026–32, 1985.
- [50] Williams E. R. Large scale charge separation in thunderclouds. *Journal of Geophysical Research*, 90, 1985.
- [51] Latham J. The electrification of thunderstorms. *Q. J. R. Meteor. Soc.*, 107:277–98, 1981.
- [52] Krehbiel P.R. *The electrical structure of thunderstorms*. In: *The Earth's Electrical Environment*. Ed. by E.P. Krider and R.G. Roble. Washington, DC. National Academy Press., 1986.
- [53] Vonnegut B. Possible mechanism for the formation of thunderstorm electricity. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 34:378–81, 1953.
- [54] Chauzy S. Space charge layers created by coroneae at ground level below thunderclouds: measurements and modeling. *Journal of geophysical research*, 87, 1982.
- [55] Chauzy S Soula S. General interpretation of surface electric field variations between lightning flashes. *Journal of Geophysical Research*, 92, 1987.
- [56] Chauzy S. Médale J. Prieur S. Soula S. Multilevel measurements of electric fields underneath a thundercloud. 1. a new system and the associated data processing. *Journal of Geophysical Research*, 96.
- [57] Soula S. Transfer of electrical space charge from corona between ground and thundercloud: Measurements and modeling. *Journal of geophysical research*, 99, 1994.

-
- [58] Chauzy S. Soula S. Contribution of the ground corona ions to the convective charging mechanism. *Journal of Atmospheric Research*, 51:279–300.
- [59] Elster J. Geitel H. Über eine methode, die elektrische natur der atmosphärischen niederschläge zubestimmen. *Meteor. Z.*, 5:95–100, 1888.
- [60] Latham J. Mason B. J. Electric charging of hail pellets in a polarizing electric field. *Proc. Roy. Soc. London*, 26:387–401, 1962.
- [61] Paluch I. R. Salor J. D. Thunderstorm electrification by the inductive charging mechanism. i. particle charges and electric fields. *J. Atmos. Sci.*, 30:1166–73, 1973.
- [62] Paluch I. R. Salor J. D. Thunderstorm electrification by the inductive charging mechanism. ii. possible effects of updraft on the charge separation process. *J. Atmos. Sci.*, 30:1174–77, 1973.
- [63] Chiu C. S. Numerical study of cloud electrification in an axisymmetric, time-dependant cloud model. *J. Geophys. Res.*, 83:5025–49, 1978.
- [64] Aufdermaur A. N. Johnson D. A. Charge separation due to rimming in an electric field. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 98:369–82, 1972.
- [65] Workman E. J. Reynolds S. E. Electrical phenomena occurring during the freezing of dilute aqueous solutions and their possible relationship to thunderstorm electricity. *Phys. Rev.*, 78:254–59, 1950.
- [66] Reynolds S. E. Thunderstorm-precipitation growth and electrical-charge generation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 34:117–23, 1953.
- [67] Reynolds S. E. Brook M. Gourley M. F. Thunderstorm charge separation. *J. Meteor.*, 14:426–36, 1957.
- [68] Jayaratne E. R. Saunders C. P. R. Hallett J. Laboratory studies of the charging of soft hail during ice cristal interaction. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 109:609–30, 1983.
- [69] Takahashi T. Rimming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, 35:1536–48, 1978.
- [70] Gaskell W. Illingworth A. J. Charge transfer accompanying individual collisions between ice particles and its role in thunderstorm electrification. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106:841–54, 1980.
- [71] Johns R. Doswell C. Severe local storms forecast. *Wea. Forecast*, 7:588–612, 1992.
- [72] Williams E. The electrification of severe storms. *Massachusetts Institute of Technology*, 2000.
- [73] Maddox. R. A. Mesoscale convective complexes. *Bull. Amer. Meteor. SOc.*, 61:1374–87, 1980.

-
- [74] Mazur V. Rust D. Lightning propagation and flash density in squall lines as determined with radar. *Journal of geophysical research*, 88:1495–1502, 1983.
- [75] Schuur T. et al. Electrical and kinematic structure of the stratiform precipitation region trailing in oklahoma squall line. *Journal of atmospheric sciences*, 48:825–41, 1991.
- [76] Rutledge S. et al. The down under doppler and electricity experiment (dundee): Overview and preliminary results. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73:3–16, 1992.
- [77] Orville R. Spencer D. Global lightning flash frequency. *Mon. Wea. Rev.*, 110:934–43, 1979.
- [78] NLSI. National lightning safety institute. <http://www.lightningsafety.com/>.
- [79] Murphy M.J. Cummins K.L. Early detection and warning of cloud-to-ground lightning at a point of interest. *2nd Symposium on Environmental Applications, Amer. Meteorol. Soc.*, pages 172–177, 2000.
- [80] Holle R.L. Murphy M.J. Lopez R.E. Distances and times between cloud-to-ground flashes in a storm. *International Conference on Lightning and Static Electricity, Blackpool, England*, 2003.
- [81] Murphy M.J. Demetriades N.W.S. Cummins K.L. The value of cloud lightning in probabilistic thunderstorm warning. *16th Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, Amer. Meteorol. Soc.*, pages 134–139, 2002.
- [82] Murphy M.J. Demetriades N.W.S. The role of total lightning in thunderstorm nowcasting. *International Lightning Detection Conference*, 2006.
- [83] Murphy M.J. Holle R.L. A warning method for the risk of cloud-to-ground lightning based on total lightning and radar information. *International Conference on Lightning and Static Electricity*, 2005.
- [84] Murphy M.J. Holle R.L. Warnings of cloud-to-ground lightning hazard based on combinations of lightning detection and radar information. *International Lightning Detection Conference*, 2006.
- [85] Murphy M.J. Holle R.L. Demetriades N.W.S. Cloud-to-ground lightning warnings using total lightning mapping and electric field mill observations. *Third Conference on Meteorological Applications of Lightning Data, Amer. Meteorol. Soc.*, 2008.
- [86] Murphy M.J. Holle R.L. Demetriades N.W.S. Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations. *International Lightning Detection Conference*, 2008.
- [87] Solomon R. Baker M. Lightning flash rate and type in convective storms. *Journal of Geophysical Research*, 103:14041–14057, 1998.

-
- [88] Williams E. R. The tripole structure of thunderstorms. *Journal of Geophysical Research*, 94, 1989.
- [89] Berger K. E. Vogelsanger. Photographische blitzuntersuchungen der jahre 1955-1965 auf dem monte san salvatore. *Bull. Schweiz. Elektrotech.*, Ver. 57:599–620, 1966.
- [90] William H. Press. William T. Vetterling. Saul A. Teukolsky. Brian P. Flannery. *Numerical Recipes in Fortran 77, The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 1992.
- [91] Wilson C. T. R. On the measurement of the atmospheric electric potential gradient and the earth-air current. *Proc. Roy. Soc.*, (A80):537–547, 1908.
- [92] Gunn R. Principles of a new portable electrometer. *Phys. Rev.*, (40):307–312, 1932.
- [93] Secker P. E. The use of field mill instruments for charge density and voltage measurements. *Static Electrification. Inst. Phys. Conf. Series*, 27:173, 1975.
- [94] P. E. Secker and J.Ñ. Chubb. Instrumentation for electrostatic measurements. *J. Electrostatics*, 16:1–19, 1984.
- [95] Chubb J. N. The calibration of electrostatic field meters and the interpretation of their observations. *Electrostatics '87. Inst. Phys. Conf. Series*, 85:261–266, 1987.
- [96] Chubb J. N. Two new designs of “field mill” type field meters not requiring earthing of rotating chopper. *IEEE transactions on industry applications*, 26(6):1178–1181, 1990.
- [97] Lane-Smith D.R. A new design of sing-discriminating field mill. *Journal of Atmospheric and*, 29, 1967.
- [98] Johns M. Kreielsheimer K. The form factor of end-on field mills. *Journal of*, 29, 1967.
- [99] Collocott S.J. A novel method for deriving the reference signal in electric field mills. *Journal of Electrostatics*, 9:389–391, 1981.
- [100] Parks T.W. Burrus C.S. *Digital Filter Design*. Wiley, New York, 1987.
- [101] Aranguren D. Estudio de las tormentas eléctricas a través del campo eléctrico ambiental. Master’s thesis, Universidad Nacional de Colombia, 2006.
- [102] Krider E. P. Musser J. A. Maxwell currents under thunderstorms. *Journal of Geophysical Research*, 87:11,171–1,176, 1982.
- [103] Murphy M.J. Demetriades N.W.S. Cummins K.L. Probabilistic early warning of cloud-to-ground lightning at an airport. *16th Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, Amer. Meteorol. Soc.*, pages 126–131, 2002.

-
- [104] Meng Q. Jean-Yves L. Yao W. Ma Y. Weitao L. Zhu X. Zhang Y. Zhao J. Study of thunderstorm characteristic with safir lightning and electric field meter observations in beijing areas. *19th International Lightning Detection Conference and 1st International Lightning Meteorology Conference - 2006 ILDC/ILMC, Tucson, Arizona, USA, 24th - 27th April 2006.*
- [105] Deaver L. Krider E. Electric fields and current densities under small florida thunderstorms. *Journal of Geophysical Research*, 96(D12), 1991.
- [106] Krider P. E. Blakeslee R. J. The electric currents produced by thunderclouds. *Journal of Electrostatics*, 16:369–378, 1985.
- [107] Malan D.J. Schonland B.F.J. The distribution of electricity in thunderstorms. *Proc. Roy. Soc.*, (A209):158–177, 1951.
- [108] Brook M. Nakano M. Krehbiel P. Takeuti T. The electrical structure of the hokuriku winter thunderstorms. *J. Geophys. Res.*, 87:1207–1215, 1982.
- [109] Aranguren D. Montaña J. Solà G. Romero D. March V. Torres H. On the lightning hazard warning using electrostatic field: analysis of summer thunderstorms in spain. *Journal of Electrostatics*, (67):507–512, 2009.
- [110] Jolliffe I.T. Stephenson D.B. *Forecast Verification. A Practitioner's Guide in Atmospheric Science.* Wiley and Sons Ltd, 2003.
- [111] Wilks D.S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, volume 2nd Edition. Elsevier, 2005.
- [112] Montanyà J. Rodriguez P. Bergas J. Illa A. Hermoso B. Candela I. A new electrostatic field measurement method. the coherent-notch field mill. *Journal of Electrostatics*, (65), 2007.
- [113] Appleton E. V. Watson-Watt R. A. Herd J. F. The interchange of electricity between thunderclouds and the earth. *Proc. Roy. Soc.*, (A111):654–677, 1926.
- [114] Simpson G. C. On the electricity of rain and its origins in thunderstorm. *Philos. Trans. A.*, (209):379–413, 1909.
- [115] Cooray V. *The Lightning Flash.* 34. IEE Power and Energy Series, 2003.
- [116] Cooray V. *Lightning Protection.* 34. IEE Power and Energy Series 58, 2010.
- [117] Golde R. H. *Lightning: Physics of Lightning*, volume 1. Academic Press. New york, 1977.
- [118] Torres H. *El Rayo. Mitos, Leyendas, Ciencia y Tecnología.* Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá, 2 edition, 2002.

-
- [119] Aranguren D. *Registro del Campo Eléctrico Ambiental en la Superficie Terrestre*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 2004.
- [120] Aranguren D. Rondón D. Pérez E. Younes C. Torres H. Red de medición de actividad eléctrica atmosférica para bogotá. conceptos. *III Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica SICEL 2005*, Noviembre Bogotá D.C., Colombia, 2005.
- [121] Barreto L. Torres H. The lightning parameters and its spatial and temporal dependence. *Work Document CIGRE*, 1996.
- [122] Aranguren D. Aponte J. Romero J. Guevara M. Torres H. Baquero G. Pérez E. Rondón D. Design, construction and calibration of two e-field machines used to measure tropical thundercloud e-field on the ground and aloft. *VIII International Symposium on Lightning Protection, São Paulo, Brazil*, pages 184–189, 21st-25th November 2005.
- [123] Aranguren D. Delgadillo A. Vargas M. Pérez E. Torres H. Estimation of lightning electrostatic parameters based on atmospheric electric field measurements and genetic algorithms. *19th International Lightning Detection Conference and 1st International Lightning Meteorology Conference - 2006 ILDC/ILMC, Tucson, Arizona, USA*, 24th-27th April 2006.
- [124] Gordillo G. *Diseño y Construcción de un equipo para medir el Campo Eléctrico Atmosférico en la Superficie Terrestre*. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Física, Bogotá, 1976.
- [125] Romero J. Guevara M. *Construcción de un medidor de campo eléctrico llevado por globo*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 2005.
- [126] Bellodi M. Kawano M. Barreto R. Bianchi R. Tonidandel F. Romano M. Moure E. Dos Santos R. The electrical-meteorological monitoring conditions in são bernardo do campo, são paulo state: System in development. *VIII International Symposium on Lightning Protection, São Paulo, Brazil*, pages 164–168, 21st-25th November 2005.
- [127] Martínez J. Rojas S. *Introducción a la informática evolutiva: Un nuevo enfoque para resolver problemas de ingeniería*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 1999.
- [128] Delgadillo A. Madrid S. Velez J. *Ampliación de UNGenético: una librería en C++ de algoritmos genéticos con codificación híbrida*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 2004.
- [129] Delgadillo A. Madrid S. Velez J. *UNGenético 2.0 manual*. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 2004.
- [130] Suárez D. Trujillo E. *Medición del campo eléctrico de la tierra al nivel del suelo*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 1995.

- [131] Torres H. Lafont M. Pinilla J. *Índice de confiabilidad de líneas de transmisión*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1987.
- [132] Holle R. Krider P. Suspension of a university of arizona football game due to lightning. *19th International Lightning Detection Conference and 1st International Lightning Meteorology Conference - 2006 ILDC/ILMC, Tucson, Arizona, USA, 26th-27th, April, 2006*.
- [133] MacGorman D. Apostolakopoulos I. Nierow A. Crame J. Demetriades N. Krehbiel P. Improved timeliness of thunderstorm detection from mapping a larger fraction of lightning flashes. *19th International Lightning Detection Conference and 1st International Lightning Meteorology Conference - 2006 ILDC/ILMC, Tucson, Arizona, USA, 24th-27th April 2006*.
- [134] Wilson N. Breed D. Saxen T. Demetriades N. The utility of total lightning in convective nowcasting. *19th International Lightning Detection Conference and 1st International Lightning Meteorology Conference - 2006 ILDC/ILMC, Tucson, Arizona, USA, 24th - 27th April 2006*.
- [135] Bothwell P. Advances in the prediction of cloud-to-ground events at the storm prediction center. *19th International Lightning Detection Conference and 1st International Lightning Meteorology Conference - 2006 ILDC/ILMC, Tucson, Arizona, USA, 24th - 27th April 2006*.
- [136] Lambert W. Wheeler M. Roeder W. Lightning probability forecasts at kennedy space center / cape canaveral air force station, florida. *19th International Lightning Detection Conference and 1st International Lightning Meteorology Conference - 2006 ILDC/ILMC, Tucson, Arizona, USA, 24th - 27th April 2006*.
- [137] Vargas M. *Nuevo modelo integral del canal de la descarga eléctrica atmosférica y su enlace con estructuras en tierra*. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Bogotá, 2006.
- [138] Aranguren D. Younes C. Torres H. Medición de tormentas eléctricas. *Congreso Internacional sobre Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico - ALTAE 2007, Cuernavaca - Mexico, 2007*.
- [139] Winn W. Moore C. Electric field measurements in thunderclouds using instrumented rockets. *Journal of geophysical research*, 76:5003–17, 1971.
- [140] Winn W. P. Aircraf measurements of electric field: Self-calibration. *Journal of geophysical research*, 98:7351–365, 1993.
- [141] Rust D. Moore C. Electrical conditions near the bases of thunderclouds over new mexico. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 100:450–68.
- [142] Fishman. G. et al. Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin. *Science*, 264:1313– 1316, 1994.

-
- [143] Cummer S. Lyons W. Implications of lightning charge moment changes for sprite initiation. *Journal of Geophysical Research*, 110, 2005.
- [144] Smith D. Lopez L. Lin R. Barrington-Leigh C. Terrestrial gamma-ray flashes observed up to 20 mev. *Science*, 307:1085–1088, 2005.
- [145] Lyons W. A. Sprite observations above the u.s. high plains in relation to their parent thunderstorm systems. *Journal of Geophysical Research*, 101:29,641–29,652, 1996.
- [146] Lehtinen N. Inan U. Bell T. Effects of thunderstorm driven runaway electrons in the conjugate hemisphere: Purple sprites, ionization enhancements, and gamma rays. *Journal of Geophysical Research*, 106:28,841– 28,856, 2001.
- [147] Cummer S. Yuhu Z. Wenyi H. Smith D. Lopez L. Stanley M. Measurements and implications of the relationship between lightning and terrestrial gamma ray flashes. *Geophysical Research Letters*, 32, 2005.
- [148] Montaña J. Romero D. Pineda N. Hermoso J. R. Solà G. Martínez D. First steps on the eagle nest instrumented tower in spain. *28 th International Conference on Lightning Protection*, 2006.
- [149] Solà G. Montaña J. Romero D. March V. The 2007 objectives of the eagle nest tower. *Second International Symposium on Lightning Physics and Effects*, 2007.
- [150] Parkinson W. C. Some observations of atmospheric-electric potential gradient on mountain peaks in the peruvian andes near huancayo, peru. *Terr. Mag. Atmos. Electr.*, 1928.