

# **CARACTERIZACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS A TIERRA EN LA REGIÓN CARIBE COLOMBIANA**



**ING. JORGE IVAN SILVA ORTEGA**

**UNIVERSIDAD DEL NORTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRONICA  
2013**

# **CARACTERIZACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS A TIERRA EN LA REGIÓN CARIBE COLOMBIANA**



**ING. JORGE IVAN SILVA ORTEGA**

Trabajo presentado como requisito parcial para obtener el título de  
Magíster en Ingeniería Eléctrica

**DIRECTOR: Ph.D. JOHNY MONTAÑA C.**

**UNIVERSIDAD DEL NORTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRONICA  
2013**

## DEDICATORIA

*A Dios por brindarme la fuerza de perseverancia todo el tiempo y permitirme culminar los objetivos propuestos.*

*A mi director de tesis y profesor, Ph.D. Johny Montaña C, quien me ha brindado la orientación durante el desarrollo de la maestría, me ha apoyado a que esta obra se culmine de manera satisfactoria y con el cual me encuentro muy agradecido y orgulloso de haber trabajado con él.*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	<b>4</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>7</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>12</b>
<b>INTRODUCCION</b> .....	<b>13</b>
<b>CAPITULO 1: PARAMETROS CARACTERISTICOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS A TIERRA</b> .....	<b>16</b>
1.1 RESEÑA HISTÓRICA.....	16
1.2 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....	20
1.2.1 Descargas entre nubes y tierra .....	21
1.2.2 Descargas internubes .....	24
1.2.3 Descargas intranubes.....	25
1.2.4 Descargas entre nube y la ionosfera.....	26
1.3 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS A TIERRA.....	27
1.3.1 Nivel Cerámico.....	28
1.3.2 Densidad de descargas a tierra (DDT).....	34
1.3.2.1 Relación DDT y NC.....	35
1.3.2.2 Selección de áreas para el análisis de la densidad de descargas a tierra.....	36
1.3.2.3 Ground Flash Density (GFD) Vs. Ground Stroke Density (GSD) .....	38
1.3.2.4 Densidad de Descargas a Tierra (DDT) y la variación latitudinal .....	39
1.3.3 Polaridad de la descarga a tierra .....	40
1.3.4 Multiplicidad de la descarga a tierra .....	42
1.3.5 Magnitud de la descarga a tierra.....	43
1.3.5.1 Modelo de propagación de corriente .....	45
1.3.5.1.1 Modelo de Norinder .....	45
1.3.5.1.2 Modelo de Bruce & Golde.....	46
1.3.5.1.3 Modelo de Dennis & Pierce .....	47
1.3.5.2 Modelo de generación de corriente.....	47
1.3.5.2.1 Modelo Wagner.....	47
1.3.5.2.2 Modelo Cooray y colaboradores.....	48
1.4. SISTEMAS DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS INDIRECTOS .....	48
1.4.1 Contadores de eventos.....	48
1.4.2 Sistema DF.....	49
1.4.2.1 Sistema LLP .....	50
1.4.2.2 Sistema TOA.....	50
1.4.2.2.1 Sistema LPATS.....	51

1.4.2.2.2. Sistema LINET.....	51
1.4.2.3. Sistema basado en mapeo de imágenes.....	53
1.5. SISTEMAS DE DETECCIÓN DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DIRECTOS.....	54
<b>CAPITULO 2: METODOLOGÍA .....</b>	<b>57</b>
2.1. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA DE LA RED KERAUNOS.....	58
2.1.1. Descripción de cómo es adquirida la información de la red KERAUNOS.....	58
2.1.2. Manejo de la información mediante el uso MATLAB.....	60
2.1.2.1. Organización de la información en bases de datos.....	60
2.1.2.2. Descripción del programa organizador de bases de datos (MATTIE).....	62
2.1.3. Análisis estadístico.....	64
2.2. INFORMACIÓN REGISTRADA.....	67
2.2.1. Cámara CCD con lente autoiris.....	67
2.2.2. Registro de la información.....	68
2.2.3. Validación de la red KERAUNOS.....	69
<b>CAPITULO 3: CARACTERIZACIÓN DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS A TIERRA .....</b>	<b>70</b>
3.1. ANÁLISIS DE LA ACTIVIDAD ATMOSFÉRICA GENERAL DE LA REGIÓN CARIBE COLOMBIANA EN FUNCIÓN DEL TOTAL DE EVENTOS REGISTRADOS.....	71
3.1.1. Relación de eventos atmosféricos.....	71
3.1.2. Análisis promedio mensual de eventos atmosféricos.....	74
3.1.4. Análisis total de eventos atmosféricos.....	78
3.1.5. Conclusiones y comentarios de la información analizada.....	79
3.2. POLARIDAD DE LA DESCARGA.....	81
3.2.1. Análisis de polaridad por strokes.....	82
3.2.2. Análisis de polaridad por flashes.....	84
3.3. RELACIÓN DE STROKES.....	85
3.4. AMPLITUD DE LA CORRIENTE.....	88
3.4.1. Comparación de amplitudes para polaridad positiva.....	89
3.4.1.1. Análisis de corriente considerando corrientes por cada <i>stroke</i> .....	89
3.4.1.2. Análisis de corriente considerando corrientes por cada <i>flash</i> .....	91
3.4.2. Comparación de amplitudes para polaridad negativa.....	93
3.4.2.1. Análisis de corriente considerando corrientes por cada <i>stroke</i> .....	93
3.4.2.2. Análisis de corriente considerando corrientes por cada <i>flash</i> .....	95
3.4.3. Comparación de amplitudes únicamente según la magnitud.....	97
3.4.3.1. Análisis de corriente considerando corrientes por cada <i>stroke</i> .....	97
3.4.3.2. Análisis de corriente considerando corrientes por cada <i>flash</i> .....	99
3.5. DENSIDAD DE DESCARGAS A TIERRA (DDT).....	101

3.6.	ERROR EN LA MEDICIÓN .....	106
3.6.1.	<i>Análisis del error de medición respecto al total de eventos registrados.....</i>	<i>106</i>
3.6.2.	<i>Análisis del error de medición respecto a la corriente de flashes (kA).....</i>	<i>107</i>
3.7.	EFICIENCIA DEL SISTEMA BASADO EN INFORMACIÓN REGISTRADA.....	107
<b>CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>112</b>
<b>APÉNDICE A: GLOSARIO DE TERMINOS .....</b>		<b>117</b>
<b>APÉNDICE B: ERRORES DE MEDICIÓN RESPECTO A LA MAGNITUD DE LA CORRIENTE.....</b>		<b>118</b>
<b>APÉNDICE C: MAPA COLOMBIANO VS. ERROR EN DETECCIÓN DE LINET .....</b>		<b>125</b>
<b>APÉNDICE D: BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>126</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Categoría del rayo según Berger [1].....	22
Figura 2. Ilustración de descarga atmosférica. ....	23
Figura 3. Modelos estructurales de nubes de tormenta. ....	24
Figura 4. Ilustración de descarga atmosférica internube. ....	25
Figura 5. Ilustración de descarga atmosférica intranubes. ....	25
Figura 6. Ilustración de eventos asociados con TLE entre nube e ionosfera [20]. ....	27
Figura 7. Probabilidad de que un observador escuche truenos Vs. Rango de distancia [3] . .....	29
Figura 8. Mapa Mundo de niveles Cerámico [27]. ....	30
Figura 9. Número de días de tormentas en varias regiones a nivel mundial [28].....	31
Figura 10. Mapa de niveles Cerámicos en Colombia [3].....	32
Figura 11. Mapa mundial que representa la densidad de descarga a tierra . ....	34
Figura 12. Imagen de caso de análisis para la estimación de un área de DDT. ....	36
Figura 13. Análisis de DDT en Áreas desde 48km x 48km hasta Áreas de 3km x 3 km. ..	37
Figura 14. Numero de descargas de polaridad positiva y negativa en la zona sur del departamento de Cundinamarca (1997) [3].....	40
Figura 15. Relación porcentual de polaridad positiva y negativa para Colombia entre 1997 - 2001 .....	41
Figura 16. Multiplicidad promedio de descargas positivas y negativas de acuerdo a los resultados obtenido por Younes para Colombia. ....	42
Figura 17. Rango de probabilidad de ocurrencia de strokes registrados que se ajustan a la distribución de probabilidad de Mousa (1989) [34], [40].....	44
Figura 18. Esquema de medición a partir de TOA [47]. ....	50
Figura 19. Imagen de sensor de detección de descargas basado en tecnología LINET. ..	52
Figura 20. Puntos de localización de sensores de la red Keraunos. ....	52
Figura 21. Vista global analizada por el satélite LIS alrededor de la órbita del planeta Tierra durante un periodo de 24 horas [52]. ....	53
Figura 22. Puntos de localización de sensores de la red KERAUNOS en Colombia. ....	57
Figura 23. Formato de presentación de datos de la red KERAUNOS. ....	58
Figura 24. Ejemplo de cómo es almacenada la Información diaria en formato .mat .....	61
Figura 25. Ejemplo de cómo es almacenada la Información diaria en formato .mat .....	61

Figura 26. Acciones que desarrolla el programa MATTIE en los archivos consolidados en la base de datos. <i>a. Información base del archivo analizado. b. Categorización por áreas y/o regiones. C. Proceso de filtrado dependiendo de varias condiciones.</i> .....	63
Figura 27. Presentación del menú inicial para el análisis estadístico. ....	65
Figura 28. Resultados estadísticos de los datos analizados mediante el programa LIT....	66
Figura 29. Ejemplo de los análisis estadísticos presentados por el programa LIT a) Análisis de los datos de acuerdo a la polaridad de la descarga b) Análisis de los datos de acuerdo al rango de horas AM o PM en que ocurren los eventos. ....	66
Figura 30. Elementos del sistema de monitoreo de descarga. a) Cámara WATEC 902H b) Lente para variación de autoiris. ....	67
Figura 31. Imagen obtenida del sistema de monitoreo mediante UFO CAPTURE y el sistema CCD.....	69
Figura 32. Análisis de comportamiento del total de eventos registrados. ....	71
Figura 33. Comparación día a día del total de eventos Vs. total de eventos Nube–tierra registrados. ....	72
Figura 34. Análisis de dispersión diario del comportamiento de las descargas atmosféricas Nube – Tierra. ....	73
Figura 35. Promedio de descargas atmosféricas registradas en la región Caribe Colombiana en promedio para un día. ....	75
Figura 36. Relación de descargas nube-tierra por días respecto al total de eventos registrados. <i>a. Mes de Octubre de 2011. b. Mes de Noviembre de 2011. c. Mes de Diciembre de 2011. d. Mes de Enero de 2012. e. Mes de Febrero de 2012. f. Mes de Marzo de 2012.</i> .....	76
Figura 37. Relación de descargas nube-tierra por días respecto al total de eventos registrados. <i>a. Mes de Abril de 2012. b. Mes de Mayo de 2012. c. Mes de Junio de 2012. d. Mes de Julio de 2012. e. Mes de Agosto de 2012. f. Mes de Septiembre de 2012.</i> .....	77
Figura 38. Relación total de las descargas atmosféricas mensuales registradas en la región Caribe Colombiana. ....	78
Figura 39. Análisis comparativo de eventos nube-tierra registrados respecto a un día promedio y según el total de eventos registrados en un mes.....	79
Figura 40. Comparación del error relativo registrado entre el porcentaje de eventos de un día promedio Vs. El total de eventos registrados para un mes de análisis. ....	80
Figura 41. Porcentaje de strokes con polaridad positiva y negativa para la Región Caribe Colombiana entre Octubre de 2011 a Septiembre de 2012. ....	82



Figura 42. Porcentaje de polaridad positiva y negativa por meses para la Región Caribe Colombiana entre Octubre de 2011 a Septiembre de 2012. ....	83
Figura 43. Porcentaje de “ <i>flashes</i> ” o eventos con polaridad positiva y negativa para la Región Caribe Colombiana entre Octubre de 2011 a Septiembre de 2012. ....	84
Figura 44. Porcentaje de flashes con polaridad positiva y negativa por meses para la Región Caribe Colombiana entre Octubre de 2011 a Septiembre de 2012. ....	85
Figura 45. Relación porcentual durante los meses analizados del total de eventos con un solo stroke como corriente de retorno. ....	86
Figura 46. Eventos registrados con más de un stroke dentro del canal de descarga. ....	86
Figura 47. Distribución acumulada de strokes entre el periodo de análisis (01 de Octubre de 2011 – 30 Septiembre de 2012). ....	87
Figura 48. Relación de total de Flashes Vs. total de Strokes entre Octubre de 2011 y Septiembre de 2012. ....	87
Figura 49. Distribución estadística de strokes positivos registrados respecto a su magnitud. ....	90
Figura 50. Curva de distribución acumulada de strokes respecto a su magnitud. ....	90
Figura 51. Distribución estadística de flashes positivos registrados respecto a su magnitud. ....	92
Figura 52. Curva de distribución acumulada de flashes respecto a su magnitud. ....	92
Figura 53. Distribución estadística de strokes negativos registrados respecto a su magnitud. ....	94
Figura 54. Curva de distribución acumulada de strokes respecto a su magnitud. ....	94
Figura 55. Distribución estadística de flashes negativos registrados respecto a su magnitud. ....	96
Figura 56. Curva de distribución acumulada de flashes respecto a su magnitud. ....	96
Figura 57. Distribución estadística de strokes registrados respecto a su magnitud. ....	98
Figura 58. Curva de distribución acumulada de strokes respecto a su magnitud. ....	98
Figura 59. Distribución estadística de flashes registrados respecto a su magnitud. ....	100
Figura 60. Curva de distribución acumulada de flashes respecto a su magnitud. ....	100
Figura 61. Región seleccionada para determinar la densidad de descargas a tierra. ....	101
Figura 62. Gráfico de nivel sobrepuesto sobre la región Caribe. a) Grafico de nivel sobre la región Caribe b) Grafico de contornos. ....	103
Figura 63. Relación del total de rayos registrados en áreas de 10 x 10 km respecto a la altura [58]. ....	105
Figura 64. Porcentaje acumulado de eventos respecto al error de 2D medido. ....	106

Figura 65. Relación de corriente kA Vs. Error de medición (m) para el mes de Mayo de 2012. ....	107
Figura 66. Imagen registrada por sistema de vigilancia Imagen obtenida del sistema de monitoreo mediante UFO CAPTURE y el sistema CCD. ....	109
Figura 67. Imagen registrada por sistema de vigilancia Imagen obtenida del sistema de monitoreo mediante UFO CAPTURE y el sistema CCD. ....	109
Figura 68. Localización errónea usando tres sensores para detectar descargas atmosféricas usando el método de intersección hiperbólica [58].....	110
Figura 69. Detección de eventos utilizando intersecciones circulares. a) Medición con tres sensores. b) Medición con cuatro sensores .....	111
Figura 70. Relación porcentual de strokes registrados para la región Caribe Colombiana .....	112
Figura 71. Distribución acumulada de corrientes para descargas a tierra con polaridad positiva, negativa y absoluta.....	113
Figura 72. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Octubre de 2011 .....	118
Figura 73. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Noviembre de 2011 .....	119
Figura 74. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Diciembre de 2011 .....	119
Figura 75. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Enero de 2012 .....	120
Figura 76. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Febrero de 2012 .....	120
Figura 77. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Marzo de 2012 .....	121
Figura 78. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Abril de 2012 .....	121
Figura 79. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Mayo de 2012 .....	122
Figura 80. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Junio de 2012 .....	122
Figura 81. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Julio de 2012 .....	123

Figura 82. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Agosto de 2012. .... 123

Figura 83. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Septiembre de 2012 ..... 124

Figura 84. Comportamiento del Error 2D de LINET en Colombia ..... 125

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Posibles condiciones de Polaridad de las descargas nube tierra [1].....	22
Tabla 2. Parámetros de las contantes que relaciona el nivel Cerámico con la DDT en diferentes regiones del mundo [1], [8], [15], [33].....	35
Tabla 3. Valores probabilísticos del 50% y 95% de corriente en ciudades de Colombia [16] .....	44
Tabla 4. Descripción de datos obtenido. ....	59
Tabla 5. Información de referencia tomada para formato de datos utilizado.....	59
Tabla 6. Promedio del total de eventos de descargas atmosféricas registradas en la región Caribe Colombiana. ....	74
Tabla 7. Total de eventos mensuales de descargas atmosféricas registradas en la región Caribe.....	78
Tabla 8. Resumen estadístico de las magnitudes de corriente por stroke .....	89
Tabla 9. Resumen estadístico de las magnitudes de corriente por flashes. ....	91
Tabla 10. Resumen estadístico de las magnitudes de corriente por stroke. ....	93
Tabla 11. Resumen estadístico de las magnitudes de corriente por flashes. ....	95
Tabla 12. Resumen estadístico de las magnitudes de corriente por stroke. ....	97
Tabla 13. Resumen estadístico de las magnitudes de corriente por flashes. ....	99
Tabla 14. Rango de referencia geográfica tomada para el estudio de la región Caribe Colombiana .....	101
Tabla 15. Puntos máximos registrados de Densidad de descarga a tierra en áreas .....	102
Tabla 16. Comparación de densidad de descargas a tierra para las principales ciudades de la región Caribe y Norte de Santander. ....	104
Tabla 17. Total de eventos registrados con cámara WATEC 902H .....	108
Tabla 18. Valor medio de la corriente registrada en kA .....	113
Tabla 19. Valores máximos y mínimos registrados para Strokes .....	114

---

## INTRODUCCION

El proceso de descargas atmosféricas es considerado por científicos e investigadores como un fenómeno natural que presenta la tierra y sus propiedades varían en dependencia del fenómeno climático que se presenta y está sujeto a momentos específicos en el año, variaciones climáticas, altitud, entre otros [1]. La aleatoriedad de las descargas ha llevado al hombre a tratar de medir su comportamiento y poder estimar sus parámetros. [2]

Los estudios estadísticos realizados en referencia a los temas de apantallamiento y descargas atmosféricas han sido pilares esenciales en los diseños y proyectos de ingeniería eléctrica e ingeniería civil para la preservación de los mismos a nivel mundial. Cada zona y/o territorio en general se encuentra categorizado con un nivel de descargas eléctricas atmosféricas o rayos; a este fenómeno se le atribuyen un grado de probabilidad asociado que puede provocar salidas de equipos eléctricos en el sistema interconectado nacional. Esto incluye salidas de operación de líneas de transmisión, de igual forma pone en riesgo instalaciones, vidas humanas y animales.

Durante los inicios del sistema eléctrico interconectado colombiano, se tomaron los mapas de niveles de descargas eléctricas atmosféricas en Colombia con base en los resultados obtenidos en países europeos y Norte América. Sin embargo, cabe resaltar que Colombia se encuentra ubicada en la zona tropical del planeta y limitante con la línea del ecuador, en donde se ha demostrado que existe una mayor actividad eléctrica atmosférica en relación con los países de latitudes altas fuera de los trópicos [3].

La red de medición de descargas atmosféricas RECMA inició mediciones de este fenómeno en el año 1996 bajo la coordinación de la empresa ISA [3]. En 1998, se conformó una alianza entre las empresas del sector eléctrico (ISA, EEB, EEPPM) junto con la Universidad Nacional de Colombia con el objeto de planear una evaluación continua de los parámetros del rayo y bajo la hipótesis de la variación espacial y temporal de las descargas eléctricas atmosféricas [3], [4]. Hasta el año 2011, no se contaba con un

equipo de medición para descargas atmosféricas instalado en la costa norte colombiana que permitiera mayor exactitud en la región Caribe y sus zonas costeras<sup>1</sup>.

La nueva red de medición de descargas atmosféricas (KERAUNOS<sup>2</sup>) instaló recientemente una antena en la ciudad de Barranquilla con el objeto de precisar el comportamiento de las descargas atmosféricas en la costa norte Colombiana. Bajo esta premisa se ha creado la necesidad de presentar la caracterización de las descargas eléctricas en la costa norte colombiana y determinar la densidad de descargas a tierra por kilómetro cuadrado durante un año (DDT) vigente en la región Caribe, la amplitud promedio de una descarga atmosférica directa, la polaridad de las descargas, entre otros parámetros suministrados por el sistema de medición utilizado [1], [5].

El sistema de medición utilizado por la red de detección de descargas es el sistema LINET (*Lightning Detection Network*) el cual utiliza sensores que funcionan a muy baja frecuencia a fin de determinar mediante el conjunto de sensores que funcionan a través de una estimación basado en tiempos de arribo (*TOA: Time of arrival*) para la localización de la posición de ocurrencia del evento, los cuales pueden ser descargas nube tierra o entre nubes [6].

El presente documento se encuentra dividido en cuatro capítulos, los cuales se encuentran orientados a definir, interpretar y, presentar el comportamiento de los parámetros de las descargas atmosféricas a tierra medidas por el sistema LINET. Es por lo anterior que este documento se encuentra integrado de la siguiente forma:

- *Capítulo 1: “caracterización de las descargas atmosféricas a tierra”* hace referencia a la fundamentación teoría relacionada con los parámetros de las descargas atmosféricas a tierra y su relevancia en la caracterización de las mismas, al igual que se presenta información disponible en Colombia respecto a las descargas atmosféricas a tierra. En esta sección se presentan los conceptos que caracterizan a una descarga atmosférica, sus parámetros relevantes, su comportamiento en las diferentes zonas del globo terrestre al igual que los parámetros más utilizados para caracterizar las descargas.

<sup>1</sup> Esta fecha coincide con la instalación de la primera antena de Barranquilla para la medición de descargas atmosféricas utilizando la red LINET, la cual se encuentra funcionando actualmente en Colombia. <http://keraunos.co/>

<sup>2</sup>KERAUNOS: Empresa que tiene implementado la red LINET en Colombia. <http://keraunos.co/>

- El *Capítulo 2*, corresponde al capítulo de metodología donde se exponen los procedimientos realizados y los análisis considerados para la obtención de los resultados que están asociados al análisis de la información obtenida de la red LINET para caracterizar las descargas atmosféricas a tierra.
- *Capítulo 3*: “Resultados de la caracterización de las descargas atmosféricas en la región Caribe Colombiana”, se realiza la evaluación de los parámetros de las descargas atmosféricas y su respectivo análisis, así como el comportamiento temporal de cada uno de estos. Este capítulo resume el comportamiento de las descargas atmosféricas durante el periodo de observación a través de LINET y presenta la densidad de descargas a tierra (DDT) para la región Caribe Colombiana tomando como periodo de observación el total de eventos ocurridos durante un año de observación de manera continua.
- El *capítulo 4* presenta las conclusiones y recomendaciones generadas durante el desarrollo de la investigación al igual que los futuros proyectos que pueden dar continuidad al desarrollo de este tema de investigación que requiere de un mayor periodo de visión para efectuar la validación adecuada de los resultados obtenidos.

---

# CAPITULO 1: PARAMETROS CARACTERISTICOS DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS A TIERRA

Los múltiples procesos de investigación que se han realizado a través del tiempo partiendo desde los estudios realizados por Benjamín Franklin a mediados del siglo XVIII hasta los recientes estudios que se están ejecutando a la fecha, requieren de una amplia expansión en los conceptos y análisis con el objetivo de poder descifrar su comportamiento y predecir de manera estadística su comportamiento aleatorio [1], [7].

Un caso en específico y deseado por los investigadores de este fenómeno y esta línea de investigación radica en poder determinar espacial y temporalmente el concepto macrofísico del circuito eléctrico global [8], [9].

El presente capítulo inicia con una reseña histórica (Sección 1,1) que resume el objetivo del estudio de las descargas atmosféricas como una investigación que ha sido realizada desde los inicios de la civilización humana. Seguidamente la Sección 1.2, presenta la definición de una descarga atmosférica, sus categorías (si ocurren entre la nube y la tierra o entre las nubes). La sección 1.3, presenta los parámetros característicos de las descargas atmosféricas a tierra las cuales son el objeto de estudio de la investigación.

## 1.1 Reseña histórica.

Para los sistemas eléctricos, las descargas atmosféricas a tierra son eventos asociados a su probabilidad de ocurrencia dentro de un área o zona determinada, capaces de generar perturbaciones y salidas de operación en los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica al igual que producir daños en instalaciones de uso final de la energía [1]. La afirmación anterior es un fenómeno considerado a nivel global y se estima que alrededor del globo terráqueo se presentan unas 2000 tormentas activas en un momento en específico, los cuales son capaces de generar alrededor de 100 descargas por segundo en un instante [7]. Esto se traduce en que los edificios, estructuras, sistemas y procesos deben contemplar dentro de sus diseños mecanismos de protección contra descargas atmosféricas que sean capaces de tolerar estos eventos y disiparlos en el menor tiempo posible [10].



El estudio de las descargas atmosféricas y en general de los rayos no es un tema que dio su origen en la modernidad, incluso ha sido estudiado por las civilizaciones antiguas como representación de sus dioses y deidades dándole siempre un referente místico. Este es el caso de las culturas babilónicas, griegas, chinas e indias quienes atribuían al rayo como elementos asociados con la lluvia y los cambios climáticos [11]. Del mismo modo sucedió con las antiguas culturas que poblaron América entre las cuales se destacan las interpretaciones de los mayas, aztecas, Incas y culturas precolombinas quienes de igual modo hacían referencia al rayo como una deidad [1]. Estas similitudes convergen en que hasta el momento las descargas atmosféricas eran un fenómeno inexplicable para el hombre y que estaba fuera de su alcance para efectuar una interpretación que fuese capaz de predecir e interpretar su comportamiento.

Los primeros conceptos modernos del rayo y las descargas atmosféricas dieron inicio a principios del año 1700, en donde se planteaba que los relámpagos y los truenos podían estar relacionados con la luz y el sonido. Esta fue la primera publicación formal hasta que en el año 1729, Stephen Gray descubrió que la electricidad podía ser transportada a grandes distancias por medio de contactos o materiales entre cuerpos conductores [1].

Muchas de las teorías contempladas hasta mediados del siglo XVIII, contemplaban la atracción y la generación por fricción como el fenómeno eléctrico fundamental y el proceso de repulsión como el efecto secundario y mecánico. Los siguientes trabajos trajeron consigo la conformación base de la fundamentación y estructuración conceptual de la electricidad y experimentos como la Jaula de Faraday en compañía del experimento de François D'Alibard permitieron el desarrollo de teorías y postulados posteriores como es el caso de la Ley de Faraday [8].

La presente propuesta se fundamenta en las teorías desarrolladas por Nikola Tesla durante su periodo de investigación en donde descubre la transmisión sin hilos en su laboratorio de alta tensión y equipos sensibles para medición de campos eléctricos. Durante su experimento descubrió el fenómeno del impulso tipo rayo el cual es una forma de onda que crece hasta un pico y luego decrece antes de repetir el ciclo total. Adicionalmente afirmó que el aire podía ser utilizado como medio para la transmisión de potencia eléctrica sin hilos mediante el principio de la resonancia [1], [8].

---

El concepto introducido de tierra conductiva e ionosfera conductiva desarrollado por Tesla, alimenta las investigaciones de los fenómenos de descargas atmosféricas y fortalece la alimentación de los parámetros del rayo, al igual que los avances investigativos de la telefuerza permiten el desarrollo y fortalecimiento de nuevas teorías y avances científicos entorno a este tema [1].

A continuación se destacan las siguientes investigaciones frente a estos fenómenos:

- Durante la segunda guerra mundial TESLA propuso el concepto de la telefuerza al departamento de defensa de los Estados Unidos, en donde afirmó que un motor de un aeroplano podría ser fundido a 250 millas [7].
- En 1952 se realizó el primer experimento que corroboró la frecuencia de operación del rayo, el cual se cataloga como una onda de muy baja frecuencia y oscilante entre los 10 Hz [8].
- Durante la década de los años setenta, se destacan las mediciones de campo eléctrico vertical realizadas por Fisher y Uman. Al igual que en 1988 se desarrollaron estudios referente a los Strokes mediante la medición de campo eléctrico vertical [1].
- Suiza a través de la firma PTT y el sistema de medición LPATS, el cual posee seis canales receptores en las ciudades de Bern, Basel, St-Gallen, St Moritz, Brig y Rolle, empieza a registrar datos de localización de rayos y amplitudes de campo desde 1989 y formas de ondas de campo eléctrico desde 1990 [1].
- En 1993, el departamento de defensa de los Estados Unidos anunció el inicio de la construcción de una estación experimental de investigación en Ganoka, Alaska. Esta estación conocida como HAARP (*High Frequency Active auroral research program*) involucra varias universidades de los Estados Unidos (Alaska, Massachusetts, Stamford, Penn State, Tulsa, Clemson, Maryland, Cornell, UCLA y MIT) con el objeto de estudiar las propiedades resonantes de la tierra y de la atmósfera. HAARP ha sido diseñada como campo experimental para patentes mejoradas realizadas por TESLA [1], [12].

- Entre 1995 y 1996 el grupo de investigación de la Universidad Nacional de Colombia con su grupo de investigación PAAS trabajó en cooperación con el instituto tecnológico de Massachusetts de los estados unidos, en donde se realizaron mediciones de resonancia Schumann en Rod Island, y posteriormente fueron contrastados con el sistema localizados de rayos de Estados Unidos (NLDS) y la RECMA [4], [1].
- La Universidad Nacional con su programa PAAS-UN cuenta con un sistema de medición de rayos en Colombia a través de la RECMA quien facilita la información de las descargas atmosféricas presentadas en el país. Esta red se creó en 1988 en alianza con las empresas del sector eléctrico Colombiano (ISA, EEB, EPPM). A partir de su creación han sido pioneros en el desarrollo de recomendaciones y estudios a nivel nacional, basado en su sistema de medición [4], [7], [8].
- Bajo el liderazgo del grupo PAAS-UN se han creado en Colombia las siguientes normas relacionadas con descargas atmosféricas. NTC4552: Protección contra rayos. NTC61000: Compatibilidad electromagnética. NTC5000: Calidad de la energía [8].
- Recientemente se instaló una nueva red de localización de descargas atmosféricas la cual se conoce como el proyecto Keraunos, el cual es una red de detección y predicción de rayos en Colombia. Empezó a realizar mediciones a partir del 20 de Septiembre de 2011 y cuenta con 10 sensores instalados alrededor del país dando garantía de cubrimiento del 40% del territorio nacional [5].
- En la actualidad el uso de equipos sensibles, tales como sistemas de cómputo, sistemas de comunicaciones y de control han generado una dependencia en el desarrollo de la sociedad orientado hacia los procesos de automatización y auto coordinación, y sumado a esto el uso de mayores equipos de protección que permitan la confiabilidad y continuidad del suministro de energía [7]. De acuerdo a lo anterior, los rayos en Estados Unidos representan un 57% de las causas de fallas en sistemas de transmisión de energía. En Japón, los rayos causaron en promedio el 65% de las salidas de operación de líneas de transmisión entre los años de 1966 y 1988 [7]. En Dinamarca se tiene como referente un 57% de

---

incidencia de rayos como causantes de salidas de operación de líneas de transmisión [8].

## 1.2 Descargas atmosféricas

Una descarga atmosférica o “*lightning*” es un fenómeno meteorológico natural basado en una descarga eléctrica generado por un pulso electromagnético al interior de un condensador natural y que se propaga a través de un material dieléctrico como el aire para el caso de las descargas atmosféricas naturales, en este caso entre la superficie de la tierra y la electrosfera [13].

Una descarga atmosférica puede estar categorizada en dependencia de su ocurrencia y procedencia, su polaridad, el número de descargas que presenta [14]. En el idioma inglés suelen presentarse diversas categorizaciones para una descarga atmosférica como es el caso de “*lightning*” que traduce para este caso el concepto general de descarga **atmosférica** como se mencionó anteriormente [13]. Sin embargo, se presentan también las siguientes terminologías que dan lugar a los conceptos particulares que involucran los parámetros característicos de una descarga tales como: “*lightning flash*” que en español significa **relámpago** y hace referencia al haz de luz que puede que no esté asociado a un impacto en tierra sino que simplemente puede estar asociado hace referencia a una descarga generada entre las nubes [13].

El término “*lightning flash*” que en español traduce **rayo**, implica una descarga atmosférica que involucra un objeto en tierra es decir un impacto a la superficie de la tierra [14]. El concepto de “*flash*” hace referencia a la presencia del evento registrado indistintamente de las propiedades eléctricas presentadas en la descarga. Un rayo implica la presencia de una corriente que lo caracteriza y cada descarga atmosférica puede tener en su tiempo de ocurrencia la presencia de más de una corriente dentro de su canal ionizado [15]. El paso de una corriente o “*stroke*” en inglés puede ser utilizado para categorizar los tipos de descargas atmosféricas ocurridas [16], [6].

Los parámetros de estudio de las descargas atmosféricas han ido perfeccionándose con el tiempo con el objetivo de tener una mayor precisión en la interpretación de los datos donde se contemplaba como primer concepto el conteo de los relámpagos observados en

un área indistintamente si se tenía la percepción del trueno<sup>3</sup>. Posteriormente se contempló el conteo de eventos categorizándolos en dependencia de su espacio de ocurrencia y las propiedades definidas para su categorización, los cuales aún según los autores modernos continúan siendo quince los parámetros más representativos para su clasificación [1].

A continuación se presenta una categorización de las descargas atmosféricas que contempla los fenómenos en función del espacio en el que se presentaron dentro de las capas atmosféricas de la tierra. Los cuales se clasifican en: descargas entre nubes y tierra, descargas dentro de una misma nube ó intranubes, descargas entre una nube y otra nube ó internubes y descargas entre una nube y la ionosfera [3], [10], [11].

### 1.2.1 Descargas entre nubes y tierra

Dentro de esta categorización de descargas atmosféricas se integran los fenómenos que implican contactos entre los actuantes nube y la superficie de la tierra a través de los cuales se presenta la descarga [1]. Las investigaciones actuales convergen en una clasificación en función de la dirección del movimiento y la polaridad de la descarga. A continuación se resumen las cuatro categorías que Berger (1978) propone para clasificar las descargas que implican contactos entre nubes y tierras [1], [8]:

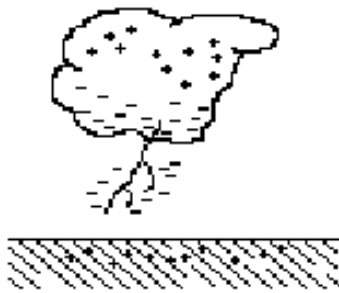
- **Categoría 1:** Descarga descendente (Nube – Tierra), con polaridad negativa en la nube y polaridad positiva en tierra.
- **Categoría 2:** Descarga ascendente (Tierra – Nube), con polaridad negativa en la nube y polaridad positiva en tierra.
- **Categoría 3:** Descarga descendente (Nube – Tierra), con polaridad positiva en la nube y polaridad negativa en tierra.
- **Categoría 4:** Descarga ascendente (Tierra – Nube), con polaridad positiva en la nube y polaridad negativa en tierra.

<sup>3</sup> Trueno: Definición establecida en el glosario de términos. Apéndice A.

La tabla 1 resume cada categoría en dependencia de las categorías señaladas anteriormente. La figura 1 presenta una clasificación grafica de este fenómeno.

**Tabla 1. Posibles condiciones de Polaridad de las descargas nube tierra [1].**

Dirección del movimiento de la descarga	Polaridad		Categoría según Berger
	Nube	Tierra	
Ascendente (Tierra – Nube)	Negativa	Positiva	2
	Positiva	Negativa	4
Descendente (Nube – Tierra)	Negativa	Positiva	1
	Positiva	Negativa	3



**a.** Categoría 1.



**b.** Categoría 2



**c.** Categoría 3



**d.** Categoría 4

**Figura 1. Categoría del rayo según Berger<sup>4</sup> [1].**

<sup>4</sup> Ilustración tomada de: H. Torres Sánchez, El rayo: Mitos, leyendas, ciencia y tecnología, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2002

Las descargas atmosféricas nube–tierra son el fenómeno conocido comúnmente como rayo, son las causantes de las pérdidas más frecuentes de los sistemas eléctricos y la base de estudio de esta investigación. Las descargas nube a tierra se producen cuando la carga eléctrica se desplaza entre una nube y el suelo o viceversa. Cada desplazamiento produce una descarga que dura una fracción de segundos [9], [12]. A veces se presentan varias descargas para poder equilibrar la carga eléctrica presentada “*strokes*”, lo que parece un parpadeo dentro del rayo. Usualmente la descarga principal suele combinarse con otras descargas menores que van a parar al aire o al interior de una nube dependiendo del evento que se presente [3], [17].

Los rayos categorizados como descendentes o nube – tierra son los más estudiados y sobre estos parten las teorías de apantallamiento frente al fenómeno de descargas atmosféricas [8], [10]. A nivel global de estos dos casos poseen un 90% de probabilidad de ocurrencia, las descargas de nubes negativas a tierra el cual corresponde a la categoría 1 [1]. Sin embargo, en la zona central andina de Colombia durante ciertos periodos del año se ha demostrado con análisis experimentales que las descargas atmosféricas pueden tener un comportamiento del 100% de descargas de nubes positivas a tierra negativa [1]. Dependiendo del sentido de las ramificaciones, se puede identificar físicamente el origen de la descarga. La figura 1 señala el caso en una descarga que parte desde la tierra y finaliza en las nubes, esto se puede verificar observando la dirección de las ramificaciones. La figura 2 presenta ambos casos.



**a. Descarga ascendente**



**b. Descarga descendente**

**Figura 2. Ilustración de descarga atmosférica.<sup>5</sup>**

<sup>5</sup> Fuente: Fotografía tomada de la siguiente fuente: <http://icaroyelviento.blogspot.com/2009/07/tipos-de-rayos-2.html>

Las descargas ascendentes (Categorías 2 y 4) son poco comunes y suelen presentarse en sitios con altitudes muy elevadas, en cercanía a los polos y en los mares. Actualmente hay un estudio poco preciso por la poca presencia de estos eventos [1], [16], [18].

### 1.2.2 Descargas internubes

Las descargas internubes o entre nubes, son producidas por diferenciales de cargas producidos entre diferentes nubes. Debido a la atracción de polaridades diferentes de las mismas. Estas descargas pueden ser visibles a kilómetros de distancia y poseen la propiedad de generar altos niveles de resonancia. El fenómeno de descargas entre nubes se fundamenta en los modelos estructurales de una nube, el cual establece que una porción puede estar cargada de manera positiva o negativa mientras que otra parte tendrá la polaridad contraria. Por lo tanto, la interacción entre dos nubes con polaridades contrarias generará una descarga entre las nubes interactuantes.

Este modelo es conocido como el modelo de la estructura bipolar propuesto por primera vez en 1985 por los físicos alemanes Julius Elster y Hans Geitel sin embargo fue refutado posteriormente por los resultados experimentales de Wilson Simpson el cual demostró que la nube se comporta como un dipolo negativo y que posee tres regiones, una región inferior con carga positiva, una región intermedia con carga negativa y una región superior con carga positiva [1].

La figura 3 presenta la estructura bipolar inicial (a) y la estructura tripolar establecida Wilson. La figura 4 ilustra un ejemplo de una descarga entre nubes.

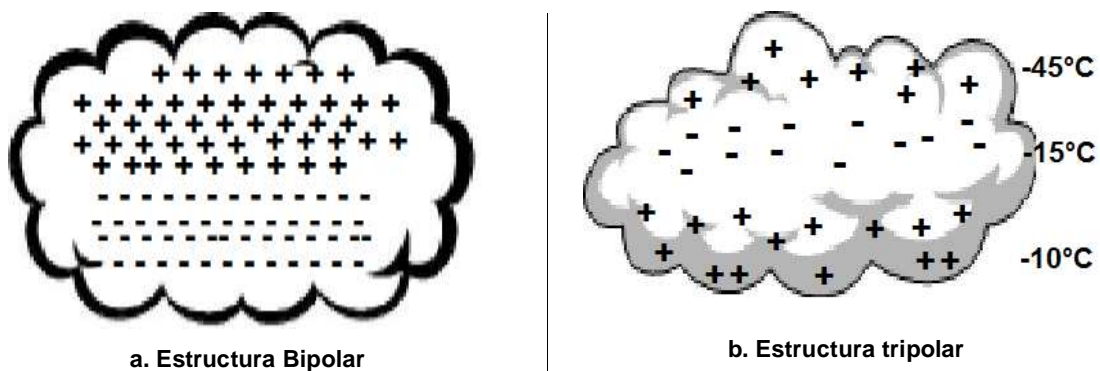


Figura 3. Modelos estructurales de nubes de tormenta.





Figura 4. Ilustración de descarga atmosférica internube. <sup>6</sup>

### 1.2.3 Descargas intranubes

Las descargas intranubes o dentro de la misma nube es un fenómeno frecuente de descarga atmosférica provocado por los centros de cargas acumulados (diferencia de polaridad) dentro de la misma nube. La figura 5 representa un ejemplo de este fenómeno.



Figura 5. Ilustración de descarga atmosférica intranubes. <sup>7</sup>

---

<sup>6</sup> Fuente: [http://en.academic.ru/pictures/enwiki/67/Cloud\\_to\\_cloud\\_lightning\\_strike.jpg](http://en.academic.ru/pictures/enwiki/67/Cloud_to_cloud_lightning_strike.jpg)

### 1.2.4 Descargas entre nube y la ionosfera

La presencia de descargas que salen hacia la ionosfera fue descubierta a principios de los años 90 y validada en el año 1989 a través de cámaras de alta velocidad. Existen una serie de fenómenos definidos como eventos de iluminación transitoria o TLE por sus siglas en ingles “Transient Luminous Events”, como el conjunto de eventos que surgen hacia la parte exterior de las capas terrestres entre los cuales se encuentran ubicados los “Sprites” o duendes rojos, los “blue Jets”, los “Elves” o Elfos, y las descargas ascendentes o *Upward Superbolt*<sup>8</sup> [19].

Los “Sprites”, se producen entre los 70 y 100 kilómetros de altura a partir de una diferencia de potencial generada entre la nube y la ionosfera. El color rojo es producido por un desequilibrio de electrones generado en esta capa de la atmosfera y su aparición se relaciona con nubes de tormenta activa. Estos fenómenos no emiten una luz muy brillante por lo que suelen ser vistas en horario nocturno con la ayuda de cámaras de alta sensibilidad [20], [19].

Los “Blue Jets” no sobrepasan la estratosfera y suelen estar asociados con descargas nube tierra registradas en un instante. Este tipo de evento suele durar la mitad de un segundo [20].

Las descargas ascendentes o *Upward Superbolt* se encuentran en estudio y se cuenta con poca información al respecto. Son descargas que no alcanzan a llegar a la estratósfera pero que tienen una mayor duración que un evento de descargar al aire convencional. De igual forma están asociados a posibles acumulaciones de carga [19], [20].

Un último evento son los “Elves<sup>9</sup>” o Elfos que es un haz luminoso y está asociado con la presencia de pulsos electromagnéticos que ascienden a la atmosfera y en la actualidad los estudios realizados no lo relacionan directamente con descargas atmosféricas [20]. La figura 6 presenta una imagen de los TLE mencionados anteriormente.

---

<sup>7</sup> Fotografía tomada de la siguiente fuente <http://icaroyelviento.blogspot.com/2009/07/tipos-de-rayos-2.html>

<sup>8</sup> Información tomada del reporte entregado por la NASA centro espacial Keneddy, del proyecto SBIR fase II, “Sensor System to Monitor Cloud – to – Stratosphere Electrical Discharges”

<sup>9</sup> NATIONAL SEVERE STORMS LABORATORY (NOAA), «NATIONAL SEVERE STORMS LABORATORY (NOAA),» NOAA, 11 May 2012. [En línea]. Available: <http://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/lightning/types/>. [Último acceso: 11 May 2013].

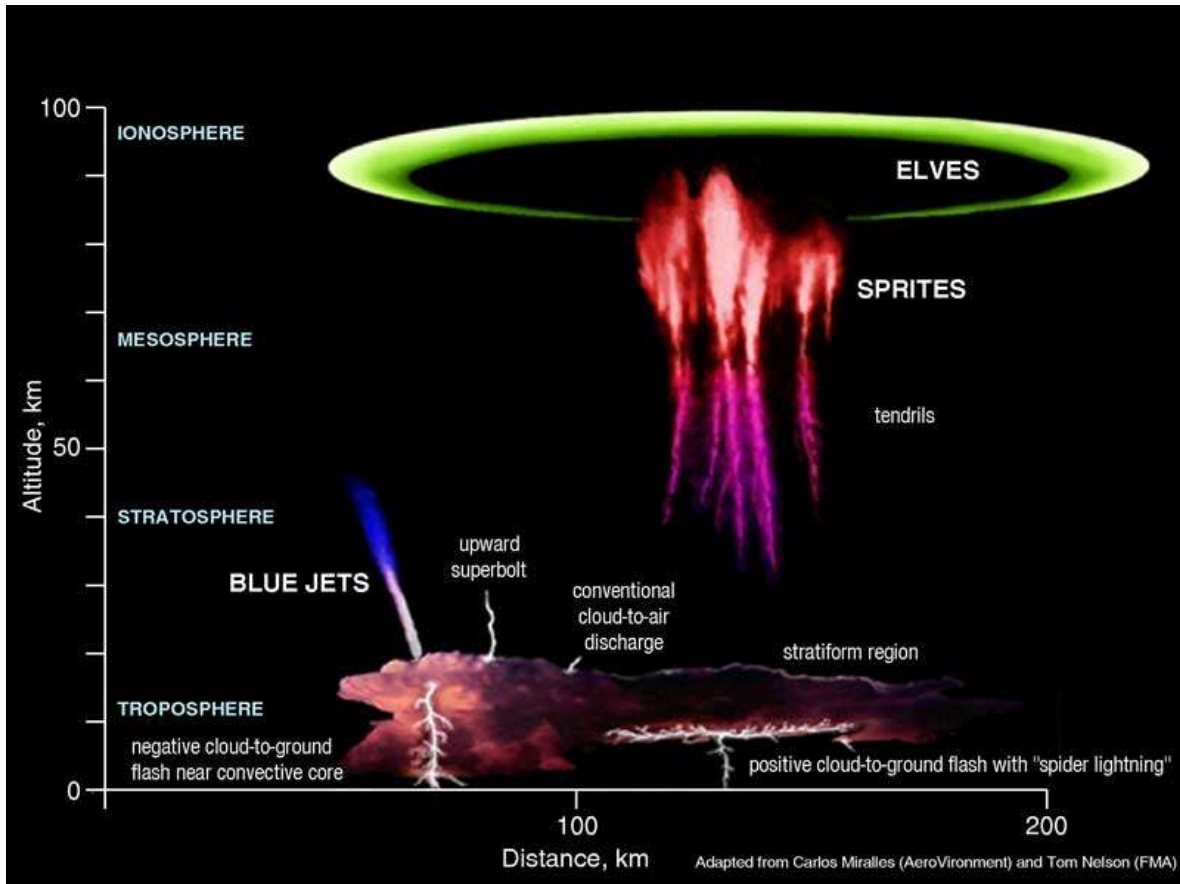


Figura 6. Ilustración de eventos asociados con TLE entre nube e ionosfera <sup>10</sup> [20].

### 1.3 Parámetros característicos de las descargas atmosféricas a tierra.

La presente sección describe los parámetros característicos más utilizados en el área de ingeniería para la estimación del fenómeno de descargas atmosféricas a tierra<sup>11</sup> conforme a lo establecido en la norma IEC 62305<sup>12</sup>, el *Working Group* 33.01 de CIGRE y la norma técnica de protección contra rayos de Colombia [8], [21], [22]. Estos parámetros han sido categorizados de manera subsecuente en tres grupos asociados de la siguiente manera:

<sup>10</sup>Fuente de la imagen: <http://ific.uv.es/rei/Sabias/sabiasrayo.htm> Imagen tomada de Internet y original de (Lyons et al., 2000), American Geophysical Union. [http://www.nssl.noaa.gov/primer/lightning/ltg\\_tle.html](http://www.nssl.noaa.gov/primer/lightning/ltg_tle.html)

<sup>11</sup> Se hace referencia a los parámetros de descargas atmosféricas a tierra a los establecidos en las categorías 1 y 3 mencionados en la sección anterior y que son el objeto de estudio para los sistemas de apantallamiento en el área de ingeniería eléctrica.

<sup>12</sup> Referentes utilizados: [80], [81]

Parámetros de incidencia, amplitud de la corriente de la descarga de retorno del rayo y la forma del impulso de la corriente del rayo [3] , [8] , [15], [21].

Los parámetros de incidencia consideran la probabilidad de ocurrencia de las descargas atmosféricas, la presencia de múltiples descargas en un mismo evento y la incidencia de edificaciones y estructuras de gran altura. Estos parámetros se resumen en: nivel cerámico (NC), densidad de descargas a tierra (DDT), polaridad de la descarga atmosférica a tierra y multiplicidad [4], [1], [8], [15].

La amplitud de la corriente es asociada dentro del segundo grupo, en donde se resalta la máxima amplitud presentada en el evento como propiedad característica de la descarga registrada. El tercer grupo está asociado con el estudio de la forma de onda del evento registrado y considera la rata de ascenso de la corriente con la que se presenta la descarga atmosférica [15], [23].

### 1.3.1 Nivel Cerámico

El nivel Cerámico (NC) es una medición a partir de la observación con el objetivo inicial de determinar el estado del clima. Fue utilizado por la cultura babilónica para predecir el clima mediante el conteo de truenos [24]. Este tipo de medición fue posteriormente adoptada por europeos en donde se realizaron caracterizaciones atmosféricas anuales de acuerdo con los datos previamente tomados, teniendo como resultado calendarios de truenos, los cuales se basaban en los registros históricos en un periodo determinado del año [1].

De acuerdo con el IMC<sup>13</sup>, se estableció una medición para el nivel Cerámico basado en la siguiente afirmación: “Con el fin de obtener resultados que admitan un comparación, es recomendable que se admitan solo los días de tormenta en los cuales se presenten tanto trueno oído como relámpago observado”<sup>14</sup>, a esta afirmación se le nombró el día con trueno oído.

De esta manera se definieron tres tipos de observación de tormentas [1]:

<sup>13</sup> International Meteorological Committee

<sup>14</sup> La versión en inglés dice así: “In order to obtain results which admit of comparison, it is recommended to enumerate only Days of thunderstorm, only days on which both thunder and lightning are observed should be counted as days of thunderstorm”.

- **T**: Mediante este símbolo se establecen los días en los cuales un trueno distante es oído.
- **<**: Se indica con esta simbología se indica un relámpago distante o difuso.
- **T<**: Mediante esta combinación de símbolos se indican las observaciones de truenos y relámpagos.

El nivel Ceráunico se define como el número promedio de días al año en los que se presentan tormentas eléctricas. En la práctica se mide como el número de días al año en los que se escuchan descargas atmosféricas. Este es utilizado como referencias para diseños previos. Sin embargo, para los procesos de diseño de apantallamiento se recomienda información más concreta del área [1], [13], [15].

A continuación se ilustra en la figura 7, la probabilidad de que un observador escuche truenos respecto a la descarga eléctrica atmosférica según la variación *StringFellow* (1977)

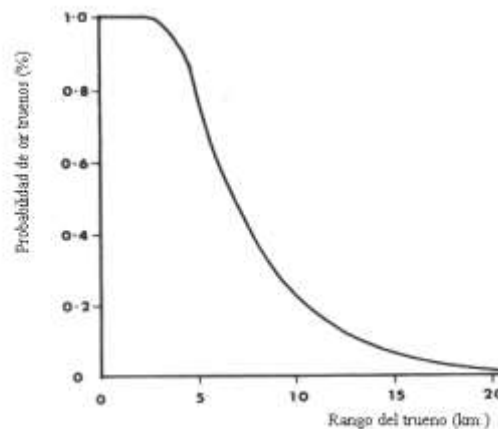


Figura 7. Probabilidad de que un observador escuche truenos Vs. Rango de distancia [3] .

La elaboración de mapas se desarrolló a partir del término Isoceraunicas<sup>15</sup> que significan igual número de truenos y es una línea o isograma de igual frecuencia de días tormentosos. De esta manera se logra realizar una comparación cuantitativa de la ocurrencia de tormentas entre regiones de un país y así caracterizar las zonas durante las diferentes épocas del año. Este criterio es aplicable a todos los lugares alrededor del mundo. La figura 8 relaciona un gráfico a partir de líneas isocerauneas del mapa mundo [25], [26].

<sup>15</sup> Igual número de truenos y relámpagos en un área.

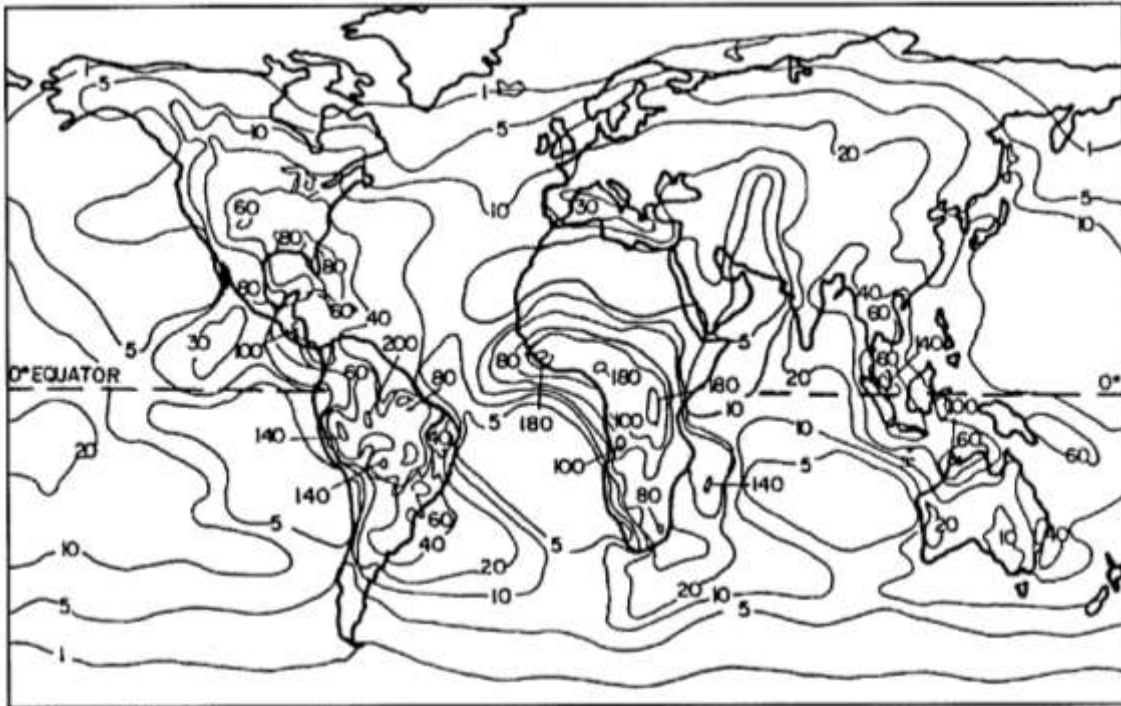


Figura 8. Mapa Mundo de niveles Ceráunico [27].<sup>16</sup>

Este parámetro ha sido de gran utilidad a nivel internacional para la caracterización de una tormenta focalizado en el diseño de sistemas de protección para los sistemas de transmisión de energía y sigue siendo útil en países que no cuentan con un gran desarrollo respecto al tema. En el caso Colombiano el nivel Ceráunico es aún un valor de referencia debido a que en Colombia aún falta validar gran parte de la investigación desarrollada alrededor del tema [3].

Una de las dificultades de implementar el nivel Ceráunico radica en identificar la incidencia real de descargas eléctricas atmosféricas debido a que este factor incluye cualquier evento registrado sean descargas nube – tierra o nube – nube. Sin embargo a partir de estas líneas se garantiza una alta confiabilidad de incidencia real de descargas eléctricas atmosféricas en un área [3].

<sup>16</sup> Fuente: Tomado de “IEEE Guide for Direct Lightning Stroke shielding of Substations” y publicado por “the World Meteorological Organization (1956)”

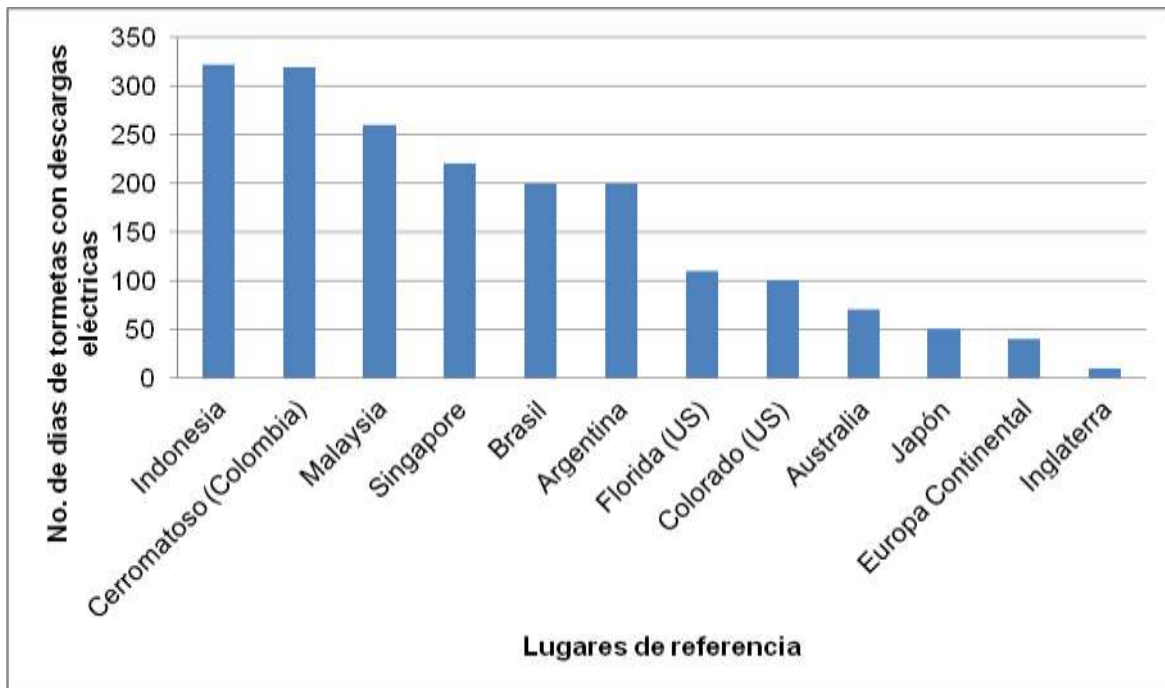


Figura 9. Número de días de tormentas en varias regiones a nivel mundial<sup>17</sup> [28]

En el año de 1976, Colombia tuvo su primer mapa de niveles Ceráunicos en cual poseía poca información de estudio debido a que en ese momento el país contaba con pocos investigadores en este tema. La figura 10 muestra el mapa de nivel Ceráunico en Colombia actualizado por la Universidad Nacional de Colombia, [1], [16], [29]

Los trazados de niveles Ceráunicos ilustrados en la figura 10, fueron realizados bajo criterios técnicos, ubicando los promedios anuales de los años de medición registrados. Las isolíneas fueron ubicadas conforme a la variación del relieve y de esta manera se evitaba efectuar el cruce de las isolíneas entre las montañas. Este mapa contempla la distribución espacial del fenómeno de la descarga eléctrica atmosférica entre los periodos anuales de 1974 a 1988 [1], [16], [29].

<sup>17</sup> Fuente: National Lightning Safety Institute. [http://www.lightningsafety.com/nlsi\\_info/world-lightning-activity.html](http://www.lightningsafety.com/nlsi_info/world-lightning-activity.html)



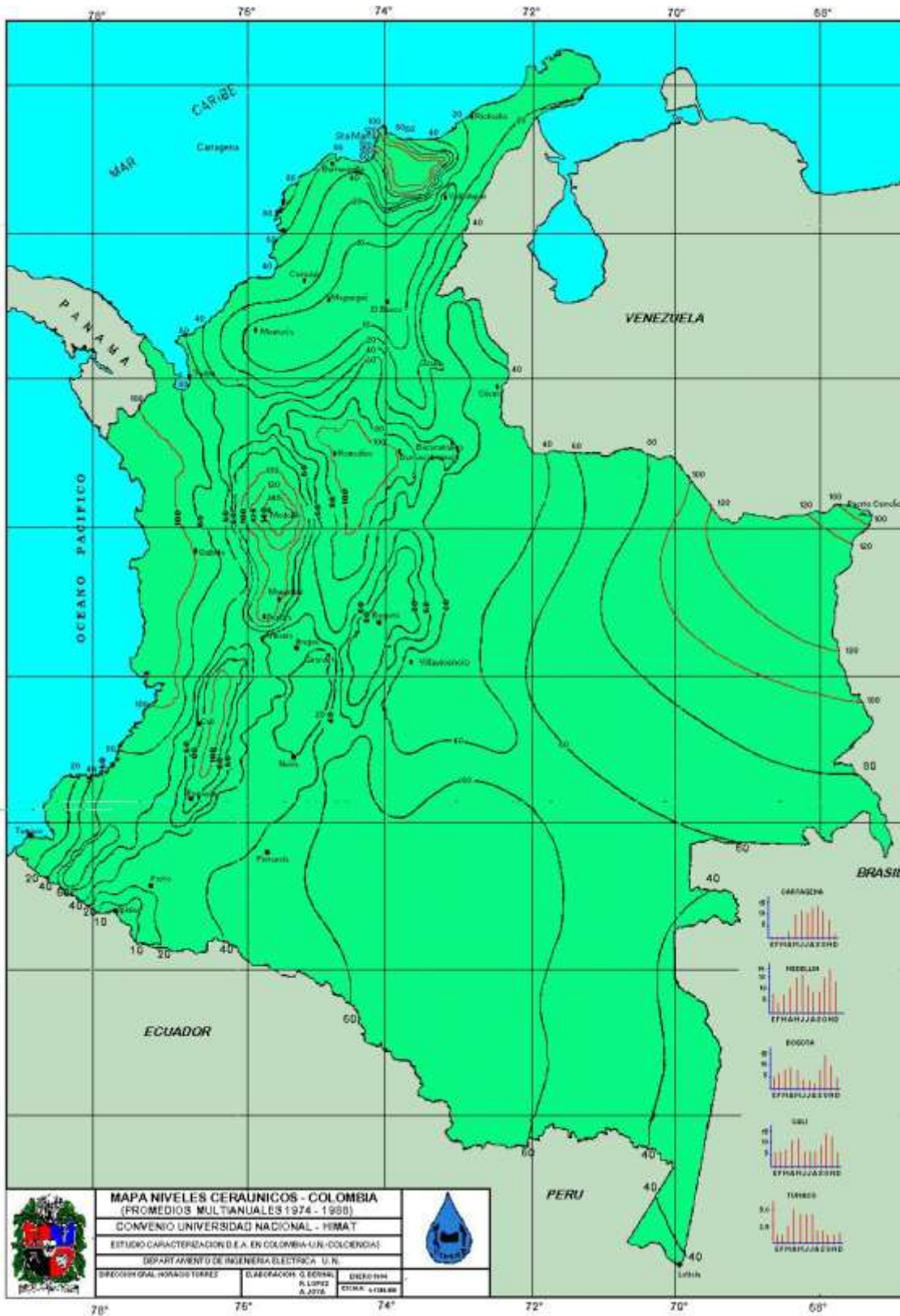


Figura 10. Mapa de niveles Cerámicos en Colombia [3].



---

En Colombia se presenta una variación espacial del nivel Ceráunico y esto se le atribuye a la oreografía, la cual contribuye a la formación de lluvias y la probabilidad de posibles tormentas. La presencia de los vientos alisios del nordeste y sudeste ocasiona condiciones locales, por ejemplo presencia de mayor nubosidad en áreas extensas [30], [31].

A continuación se presenta las siguientes caracterizaciones de la orografía colombiana que producen una variación en los niveles Ceraunicos sobre el territorio:

- El mayor nivel Ceráunico es registrado en el estrechamiento de la cadena montañosa central y oriental. Estos son marcados por los vientos que se generan en estas [29].
- En la zona norte Colombiana, partiendo de la Sierra Nevada de Santa Marta se registra un nivel Ceráunico de 120 días tormentosos/año y este disminuye al oeste entre los 40 y 20 días tormentosos/año conforme se acerca a la sabana de córdoba [29].
- En el Magdalena Medio se presenta un alto nivel Ceráunico y alta densidad de descargas a tierra. El valor promedio sobre el valle del rio magdalena es de 100 días tormentosos/año [29].
- En el altiplano cundiboyacense, se presenta un nivel Ceráunico de 80 días tormentosos/año [29].
- En la zona oriental del territorio Colombiano, se presenta un aumento del nivel Ceráunico desde la cordillera oriental hasta la frontera de Venezuela entre 60 a 120 días tormentosos/año respectivamente [29].
- La zona de Nariño posee un nivel Ceráunico bajo. En esta zona se registran 10 días tormentosos/año [29].

La información señalada anteriormente puede validarse en el grafico ilustrado en la figura 10 de la presente sección.

### 1.3.2 Densidad de descargas a tierra (DDT)

La densidad de descargas a tierra (DDT) para una región o área, se define como el número promedio de descargas registradas en un área de un kilómetro cuadrado durante un periodo de observación de un año. Este ha sido considerado por autores como un concepto de mayor rigor para el estudio de la actividad atmosférica en una región o área específica. De esta manera se establece una relación directa con el grado de severidad tormentosa.

La densidad de descargas a tierra (DDT) en una región determinada puede ser estimada contando el número de descargas a tierra registradas en la región analizada identificando su ubicación espacial y temporal. Esto se alcanza utilizando herramientas tales como los contadores de descargas, sistemas localizadores de descargas atmosféricas o información suministrada por los satélites [32]. La figura 11 ilustra un mapa global de la densidad de descarga a tierra realizado por el *National Severe Storm Laboratory* (NOAA) haciendo una integración de los sistemas de observación OTD<sup>18</sup> y LIS<sup>19</sup> que utiliza la NASA para la medición del fenómeno atmosférico entre Abril de 1995 y Diciembre de 2003 [20].

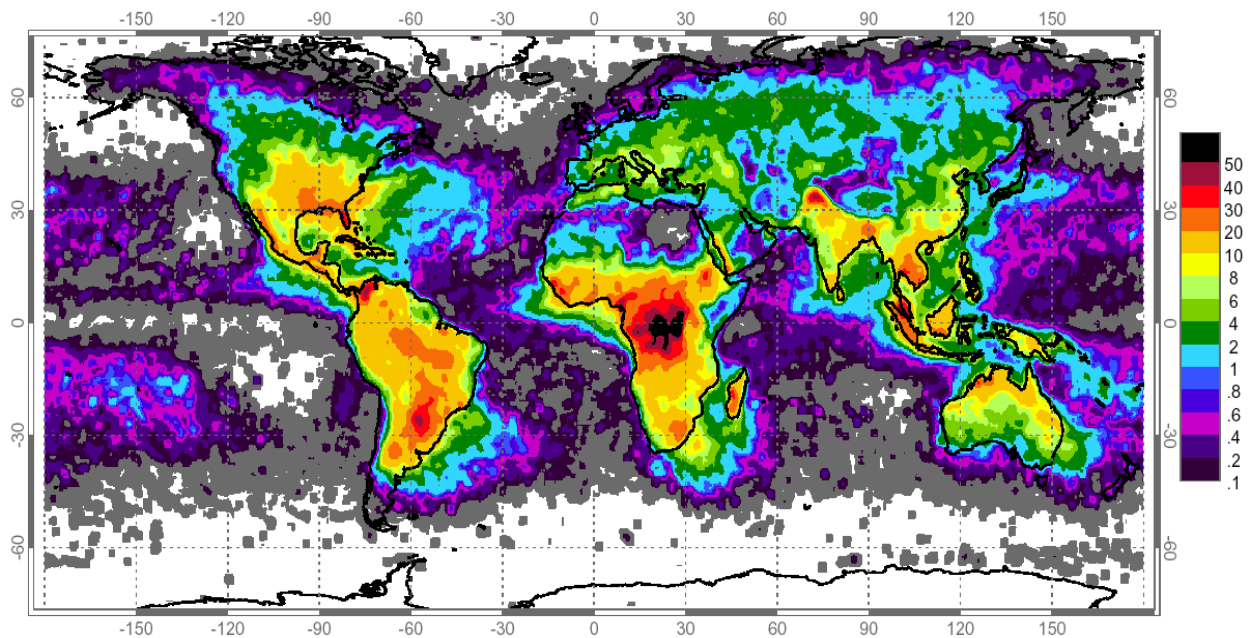


Figura 11. Mapa mundial que representa la densidad de descarga a tierra<sup>20</sup>.

<sup>18</sup> Optical Transient Detector (OTD): sistema compacto e integrado la óptica con dispositivos electrónicos.

<sup>19</sup> Lightning Imaging Sensor (LIS): Es un Sistema de observación terrestre que utilize la NASA

<sup>20</sup> Fuente: [http://www.crh.noaa.gov/Image/pub/tg2/hirez/world\\_annual\\_flashrate\\_72dpi.jpg](http://www.crh.noaa.gov/Image/pub/tg2/hirez/world_annual_flashrate_72dpi.jpg)

El parámetro de nivel Cerámico no permite realizar una medición que determine la severidad de las tormentas, ni tampoco expresa una claridad entre las descargas a tierra que se presentan en un área. Por lo anterior fue planteada la densidad de descargas a tierra (DDT) [3].

### 1.3.2.1. Relación DDT y NC

La densidad de descargas a tierra puede ser calculada a partir del nivel Cerámico a través de la siguiente relación matemática, la cual es resultado de investigadores a nivel mundial que han desarrollado trabajos a nivel global y que convergen en una relación similar:

$$(Ec. 1)^{21}$$

Estos parámetros son el resultado de múltiples estudios realizados a través del globo terráqueo y en dependencia de esto varía las constantes a y b de la ecuación 1. Los datos estimados para las constantes a y b se presentan en la tabla 2.

**Tabla 2. Parámetros de las constantes que relaciona el nivel Cerámico con la DDT en diferentes regiones del mundo [1], [8], [15], [33]**

Valor de la constante (a)	Valor de la constante (b)	Ubicación espacial y temporal del estudio	Autores
0,01	1,4	Australia	Mackerras
0,012	1,4		Kuleshov & Jayaratne
0,053	1,17	Sur África	Eriksson & Potgieter
0,004	2	Suecia	Muller & Hillebrand
0,0054	1,537	China	Chen et al.
0,024	1,12	México	De la Rosa & Montaña
0,003	1,12	Brasil	Dinitz
0,0017	1,56	Colombia	Younes & Torres
0,0026	1,25	Reino Unido	Stringfellow
0,004	2	Suecia	Muller & Hillebrand
0,17	1	Estados Unidos	Horn & Ramsey
0,15	1		Brown, Whitehead & Golde
0,036	1,3	Rusia	Kolokolov y Paulova
0,1	1	India	Aiya

Recientes estudios no contemplan la relación con el nivel Cerámico debido a que poseen sistemas de medición directos de las densidades de descargas a tierra y estos son validados con otros mecanismos de medición a fin de determinar la veracidad de los resultados obtenidos.

<sup>21</sup> Adaptado de [8], [15]

### 1.3.2.2. Selección de áreas para el análisis de la densidad de descargas a tierra.

La densidad de descargas a tierra o DDT representa para un área específica el total de eventos ocurridos durante un año de análisis. Sin embargo, esta consideración está sujeta a los siguientes factores: Condiciones climáticas, temperaturas, orografía del terreno, horas del día, entre otros. Con base en lo anterior, un área extensa de análisis en un país con una orografía como la posee Colombia, no es completamente precisa. Para la anterior afirmación se presenta el siguiente caso particular tomando como referencia el área de análisis presentado en la figura 12.



Figura 12. Imagen de caso de análisis para la estimación de un área de DDT.

*Caso Particular:* Un área de análisis de DDT que cubra la ciudad de Barranquilla y se extiende hasta el departamento del César del lado oriental y hacia al sur cubra los departamentos del Magdalena y Cesar hasta alcanzar un área que guarde la simetría cuadrada. Dentro de esta zona queda incluida la Sierra Nevada de Santa Marta que tiene una elevación de 5300 metros (Pico Cristóbal Colon) sobre el nivel del mar, la zona de depresión del Magdalena y la planicie del departamento del Atlántico como se presenta en la figura 12.

Para el caso anterior, cabe considerar que en esta área de análisis se encuentra localizada la Sierra Nevada de Santa Marta, la cual posee orográficamente unas condiciones diferentes al resto de la zona de estudio. De acuerdo a lo expresado por investigadores y por resultados obtenidos, las condiciones climáticas, orográficas y horarias son relevantes en el estudio, por lo tanto la Sierra Nevada de Santa Marta, presentará una condición diferente que se adicionará al comportamiento del área, lo cual

afectará los análisis realizados y posiblemente represente más una parte del área analizada que toda en su conjunto y es posible que en particular cada zona tenga un comportamiento representativo de densidad de descarga a tierra diferente por lo que el promedio de descargas por kilómetro cuadrado no estaría representando de manera adecuada las zonas asociadas dentro de la figura.

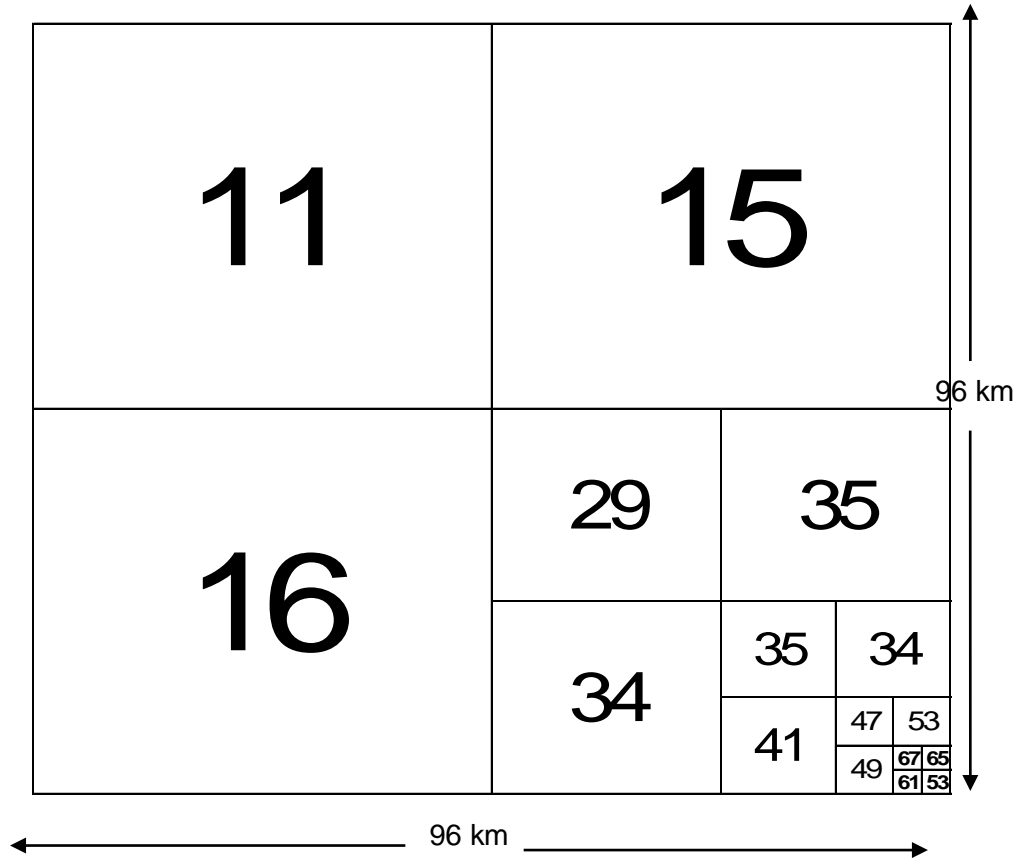


Figura 13. Análisis de DDT en Áreas desde 48km x 48km hasta Áreas de 3km x 3 km.<sup>22</sup>

La figura 13, representa las áreas expuestas por (Younes, 2002) e ilustra lo señalado en el caso planteado anteriormente. Este caso se expone para un área de 96 x 96 km<sup>2</sup> con una densidad de descarga a tierra de 19 strokes/km<sup>2</sup> – año en promedio. Sin embargo dentro de ese mismo área de estudio hay un comportamiento diferente si se llegan a subdividir las áreas en cuadrículas menores. Es decir si el área total se subdivide en cuatro cuadrículas de 48 x 48 km<sup>2</sup>, que corresponden ahora a cuatro espacios con diferente localizaciones latitudinales y longitudinales; estos tendrán un número de

<sup>22</sup> Fuente: Younes Camilo. Evaluación de parámetros del rayo con mediciones terrestres y satelitales para Colombia. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. 2002

descargas dentro de su área diferente y variará entonces del valor inicial de 19 strokes/km<sup>2</sup> como es ilustrado en el caso de la figura 12. Esta subdivisión se realiza hasta áreas de 3 x 3 km<sup>2</sup>. Es decir que un análisis que contemple áreas pequeñas favorece a una mejor caracterización de las áreas y resultan más precisos al momento de realizar el diseño de sistemas de apantallamiento debido a que se toman en consideración áreas con condiciones climatológicas y orográficas similares.

Retomando el ejemplo inicial, es preferible caracterizar en áreas más pequeñas cada una de las regiones con condiciones (orográficas, atmosféricas, entre otras) similares y que los resultados representen adecuadamente esa zona a diferencia de considerar zonas grandes con condiciones diferentes que no representen de manera precisa la zona de estudio contemplada y no se tenga una estimación correcta de la zona analizada.

### 1.3.2.3. Ground Flash Density (GFD) Vs. Ground Stroke Density (GSD)

Para hacer referencia a GFD y GSD se establece como “Flash” al evento completo de descarga atmosférica registrada nube – tierra. Sin embargo, un evento o “Flash” se encuentra conformado usualmente por múltiples descargas pequeñas que duran intervalos de tiempo más pequeños y que hacen parte del evento. Estas descargas individuales se conocen con el nombre de “Strokes”.

El estándar IEEE 998 de 1996, define el *Ground Flash Density* (GFD) como el número de “strokes” por unidad de área en una región en particular [27]. Y basado en esta afirmación muchos autores hacen referencia a este bajo la misma definición al igual que lo hace el estándar IEEE 1243 de 1997 [34]. El estándar IEEE 988/96, plantea la siguiente ecuación:

$$(Ec. 2)^{23}$$

Sin embargo existe una discrepancia con el término debido a que en la actualidad otros autores hacen relación a GFD como el número de “**Flashes**” de un evento atmosférico nube-tierra y se considera el Ground Stroke Density (GSD) como el término que se refiere al conteo del número de “**Strokes**” de un evento atmosférico nube – tierra [25]

<sup>23</sup> Ecuación adaptada de: [27]

La Densidad de Descargas a Tierra (DDT), resulta equivalente en español al término *Ground Flash Density* (GFD), tomando en cuenta la consideración anterior para definirla. Es decir, la densidad de descargas a tierra considera para el cálculo los “*flashes*” de un evento atmosférico nube – tierra [3], [4], [15].

#### 1.3.2.4. Densidad de Descargas a Tierra (DDT) y la variación latitudinal

Las ecuaciones más utilizadas para relacionar la densidad de descarga a tierra con el Nivel Cerámico en la literatura más especializada son las siguientes:

(Ec. 3)<sup>24</sup>

(Ec. 4)<sup>25</sup>

Sin embargo, al momento de ser aplicadas en Colombia para calcular el fenómeno de descargas atmosféricas a tierra se han registrado errores superiores al 400%, lo que indica una compatibilidad inadecuada para el fenómeno de descargas atmosférica colombiano [15].

Basado en lo anterior los investigadores de la Universidad Nacional de Colombia del grupo PAAS-UN, llegaron a la conclusión de acuerdo a los estudios realizados de que existe una correlación estadística con la latitud estableciendo una relación matemática cómo se señala a continuación tanto para la zona costera como para zona montañosa:

- Ecuación para la zona costera colombiana:

(Ec. 5)<sup>26</sup>

- Ecuación para la zona montañosa colombiana:

(Ec. 6)<sup>27</sup>

De acuerdo a los resultados obtenidos y a las observaciones realizadas en Colombia, las ecuaciones presentan un nivel de confianza del 99% y este resultado coincide con las comparaciones realizadas con ecuaciones desarrolladas por otros autores en otras latitudes en las que se contemple este parámetro [15]. Por lo anterior, para el fenómeno

<sup>24</sup> Ecuación Anderson – Eriksson, aceptada por CIGRE, IEEE e IEC [15]

<sup>25</sup> Ecuación de Eriksson

<sup>26</sup> Resultados obtenidos por Younes & Horacio en sus investigaciones: [15]

<sup>27</sup> Resultados obtenidos por Younes & Horacio en sus investigaciones: [15]

atmosférico colombiano los investigadores Colombianos (*Younes & Horacio, 2010*) recomiendan que se debe tener en cuenta la latitud al momento de establecer una relación para la densidad de descargas a tierra y el nivel cerámico [15], [1],

### 1.3.3 Polaridad de la descarga a tierra

La polaridad de las descargas a tierra y las descargas entre nubes pueden ser de polaridad positiva o negativa. Se ha establecido que la polaridad de una descarga atmosférica varía entre 90% y 95% para polaridad negativa y entre 5% y 10% para polaridad positiva. Estudios efectuados señalan la presencia de rayos de polaridad positiva bajo condiciones especiales, entre las cuales se destacan grandes elevaciones, climas fríos, latitudes altas, tormentas severas y probabilidades de ocurrencia espacio temporales (año, horas del día) [3].

Durante el desarrollo de investigaciones en Colombia respecto a la polaridad, se han observado variaciones pronunciadas durante épocas en el año y esto es atribuible a condiciones atmosféricas y/o cambios climáticos como se expresó anteriormente. Sin embargo las descargas positivas tienen una oscilación entre el rango de ocurrencia expresado, siendo las más probables las descargas con polaridad negativa.

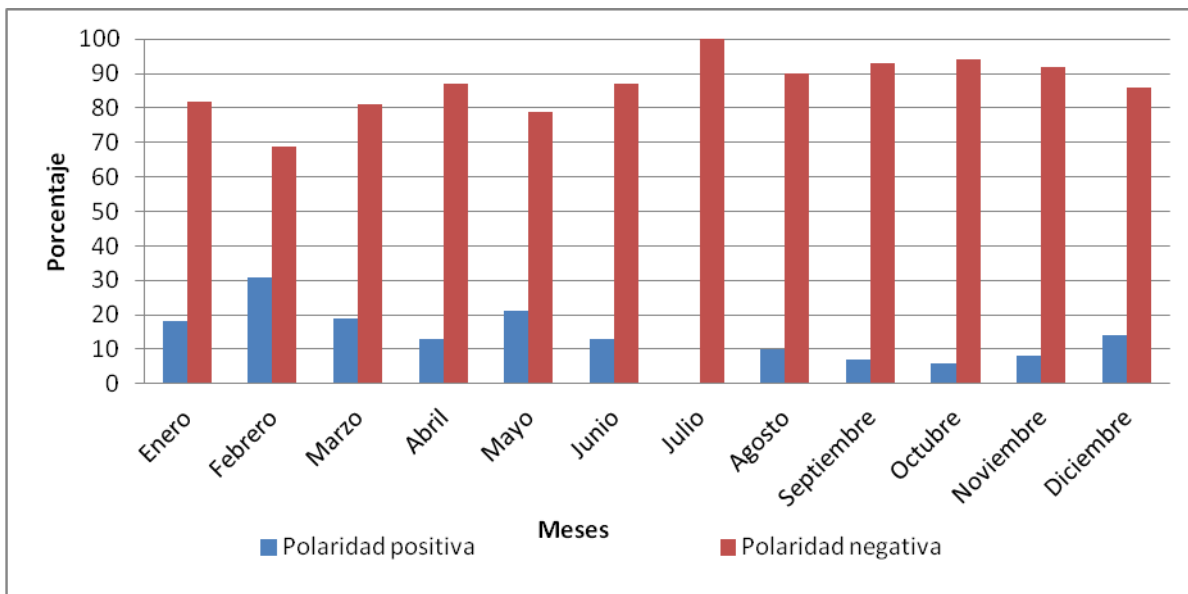


Figura 14. Numero de descargas de polaridad positiva y negativa en la zona sur del departamento de Cundinamarca (1997) [3].



La Figura 15, es un ejemplo del comportamiento registrado de las descargas atmosféricas en el departamento de Cundinamarca siendo para este caso las descargas con polaridad negativa, las que predominan superiores durante todos los meses del año. También se resalta que para el año de 1997 en el departamento de Cundinamarca, fue el mes de Febrero, el que más presentó descargas de polaridad positiva.



Figura 15. Relación porcentual de polaridad positiva y negativa para Colombia entre 1997 - 2001

Con base a lo anterior varios investigadores entre los cuales se destacan los resultados obtenidos por el LDN (*Lightning Detection Network*) de los Estados Unidos, resaltan que para esta zona del planeta, se presentan mayor presencia de descargas con polaridad positiva para las temporadas de invierno, al igual que para Japón [32], [35], [36]. Esto se relaciona con las investigaciones realizadas por (Uman, 2001), las cuales señalan que las grandes elevaciones de tierra, climas fríos, latitudes altas y tormentas severas son las que favorecen la polaridad positiva de las descargas [13], [37].

Adicional a esto los trece años de estudio que se llevan en Colombia han demostrado que la polaridad de la descarga también depende de las condiciones temporales. Estas condiciones hacen alusión a horas en las que se presenta una tormenta y periodos del año.

### 1.3.4 Multiplicidad de la descarga a tierra

La multiplicidad se define como el número de descargas individuales o *strokes* presentados en una misma descarga (*flash*). Lo anterior hace referencia al número de corrientes de retorno que pueden presentarse dentro de un mismo evento. Es decir pueden presentarse descargas con una o más corrientes de retorno. [15]

Un “*stroke*” puede tardar una decena de milisegundos, y entre un *stroke* y otro *stroke* se presenta un tiempo de cientos de milisegundos. Por lo anterior resulta relevante el estudio de la duración de un *Flash* debido a que este depende de la cantidad de *strokes* con la que se presente el evento. Este es un parámetro necesario para el diseño de protecciones contra descargas atmosféricas debido a que estas deben soportar completamente el tiempo de exposición a la descarga y deben proteger los equipos asociados durante ese intervalo de exposición.

Según las investigaciones realizadas por Younes, se observó que en el territorio Colombiano, las descargas atmosféricas registradas tienen cinco o menos *strokes* y de acuerdo a los resultados obtenidos, el valor promedio de *strokes* de las descargas totales analizadas es de 1,57. Este resultado obtenido es diferente a otras latitudes. La Figura 16 ilustra la multiplicidad promedio de las descargas positivas y negativas.

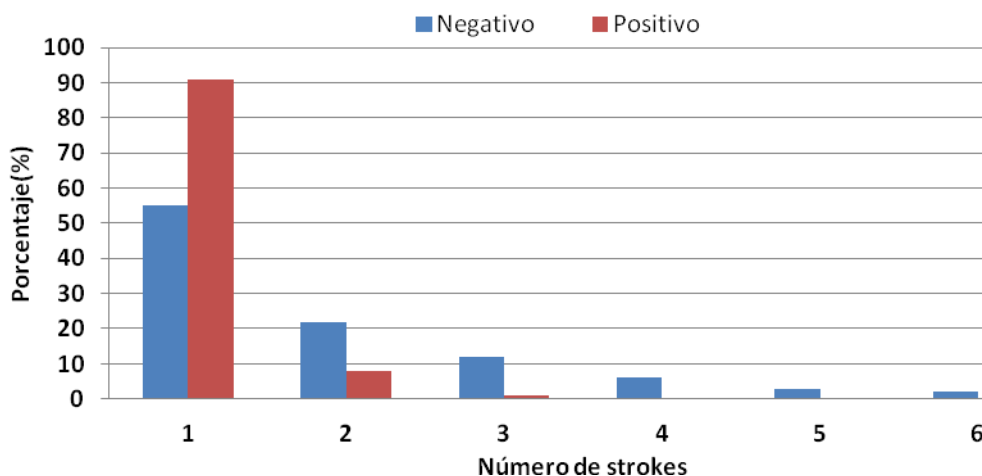


Figura 16. Multiplicidad promedio de descargas positivas y negativas de acuerdo a los resultados obtenido por Younes para Colombia.

### 1.3.5 Magnitud de la descarga a tierra

La amplitud de la corriente de retorno del rayo o corriente pico del fenómeno atmosférico resulta importante para aplicaciones de ingeniería y se define como el valor máximo registrado de corriente durante el tiempo en que se presenta la descarga. Esta magnitud puede ser estimada mediante modelos matemáticos en función del campo eléctrico o magnético medido, haciendo referencia al valor de mayor magnitud de corriente eléctrica entre el centro de carga de la nube y tierra.

Estadísticamente se presenta con un 50% de probabilidad que el valor de corriente pico es de 36kA; de igual forma la tasa de ascenso de la corriente oscila entre 4 a 6 kA/us para la zona tropical en la que se encuentra localizada Colombia.

El estándar IEEE 998/1996, presenta una ecuación propuesta por Anderson (1987), como una relación de magnitud de corriente asociado a un valor de probabilidad y que generaliza este comportamiento para todas las latitudes, teniendo como referencia 31 kA como valor promedio de una amplitud de descarga [27], [34], [38].

(Ec. 7)

Donde,

- **I**: Magnitud de corriente medida en kiloamperios.
- **P (I)**: Probabilidad de ocurrencia de la descarga atmosférica.

De igual forma Mousa (1989), propone una relación para magnitud de descarga equivalente a 24 kA y que se ajusta a los datos hasta el momento obtenidos [27], [39].

(Ec. 8)

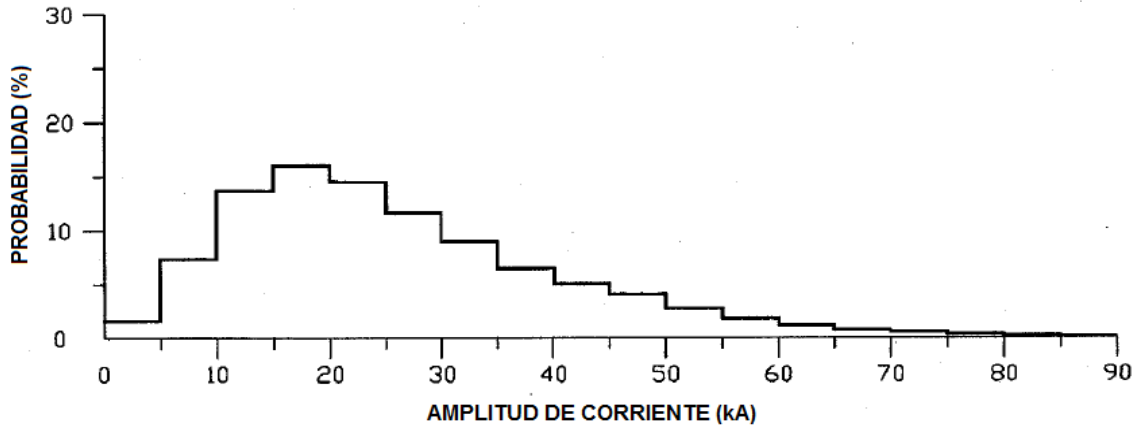


Figura 17. Rango de probabilidad de ocurrencia de stokes registrados que se ajustan a la distribución de probabilidad de Mousa (1989)<sup>28</sup> [27], [39].

Tanto la ecuación de Anderson y la ecuación de Moura han tenido aceptación a nivel internacional para representar el comportamiento probabilístico de las descargas atmosféricas. En Colombia investigadores del área, orientados hacia el cálculo de apantallamientos en diversas regiones de Colombia, han optado por esta expresión debido a la importancia que este parámetro dentro del cálculo de sistemas de apantallamiento para líneas de transmisión, subestaciones y edificaciones [27], [40]. Sin embargo estudios recientes como es el caso de Younes & Torres (2010), presentan comportamientos en las amplitudes de corriente diferentes en distintas ciudades de Colombia presentándose variaciones en las amplitudes negativas y positivas en donde se registró que el 50% de las corrientes negativas son menores o iguales a 32 kA, mientras que para el caso positivo el valor es de 28 kA [16]. La tabla 3 presenta el comportamiento característico de la probabilidad de las amplitudes de corriente en diferentes ciudades [16].

Tabla 3. Valores probabilísticos del 50% y 95% de corriente en ciudades de Colombia [16]

CIUDAD	Imag Positiva (50%)	Imag negativa (50%)	Imag Positiva (95%)	Imag negativa (95%)
Bogotá	28	31	63	54
Samana	14	24	32	41
Puerto Berrio	14	22	28	36
El Bagre	10	23	24	50
Nechi	8	23	14	46
Magangue	11	24	23	50
Barranquilla	27	40	68	74

<sup>28</sup> Ilustración adaptada al idioma español del STD IEEE 998/1996 [27]

La amplitud de la corriente de una descarga atmosférica puede ser representada mediante modelos de ingeniería que contemplen el cálculo de campos electromagnéticos y considerando una variación espacio temporal de la corriente de retorno. Existen dos tipos de modelos utilizados que se conocen como los modelo de programación de corriente y los modelos de generación de corriente.

### 1.3.5.1 Modelo de propagación de corriente

Desde una visión óptica este modelo revela a la corriente de retorno como un frente luminoso que se propaga desde el suelo hacia la nube a lo largo del canal del líder. El postulado de este tipo de modelos propone que el aumento de la luminosidad del canal es causado por un incremento en la corriente y que la imagen proporciona una analogía a la propagación del pulso de una línea de transmisión impulsada por una fuente de corriente en uno de sus extremos. Se establece como base de referencia del canal al suelo. A continuación se describen los modelos de propagación más usados que buscan representar el comportamiento de la corriente en un *stroke* [16], [41].

#### 1.3.5.1.1 Modelo de Norinder

El modelo de Norinder busca describir las características de las corrientes de la descarga atmosférica a tierra en función de los campos magnéticos medidos. El modelo asume que la corriente empieza a circular de manera instantánea al momento de que se inicie la corriente de retorno. Como se presenta en la ecuación, el modelo de Norinder plantea una variación de la corriente a través del tiempo y que por un instante determinado la corriente posee la misma amplitud sobre todo el canal [16], [41].

(Ec. 9)

Donde,

$B_i$ , es el campo magnético inducido.

$D$ , es la distancia hipotética del origen donde se crea la corriente de retorno.

$H$ , es el ancho del canal.

$i(t)$ , es la corriente de retorno.

La ecuación que propone el modelo tiene una precisión correcta si la medición de la descarga es realizada a escasos 20 metros. Sin embargo, la medición realizada a grandes distancias puede introducir errores elevados al momento de determinar la corriente [16], [41].

#### 1.3.5.1.2 Modelo de Bruce & Golde

Este modelo se basa en dos suposiciones para realizar la determinación de la corriente del rayo. La primera corriente de la descarga se asume muy grande e inferior a la velocidad de la luz. La segunda suposición propone que en un instante determinado el flujo de corriente es el mismo a través de todo el canal. Este primer modelo busca validar las mediciones experimentales obtenidas a partir de una representación matemática [16], [41].

$$I(z, t) = \begin{cases} I(0, t) = I_0 \\ 0 \end{cases} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde:  $I_0 = 3 \times 10^4 \text{ A}$ ,  $\alpha = 4.4 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ ,  $\beta = 4.6 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$

De igual forma se plantea la relación de velocidad de la corriente presente del primer stroke de la descarga [41].

$$v(z) = v_0 e^{-\gamma t}$$

Donde:  $v_0 = 0,8 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $\gamma = 3 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$

Una limitación de la ecuación planteada radica en que la magnitud de la corriente se ajusta al tamaño del canal de manera instantánea, lo que se traduce en que se realiza una transferencia de la corriente superior a la velocidad de la luz, lo que se hace físicamente imposible [41].

### 1.3.5.1.3 Modelo de Dennis & Pierce

Este modelo visualiza la corriente de retorno de la descarga con una velocidad que está en función de la altura. Este fenómeno convierte el canal del líder de la descarga en un estado adecuado para la propagación de la descarga de retorno. Las corrientes de pulso que se descargan a lo largo del canal con una velocidad  $u$  que está en función de la altura, pero con la restricción que éste debe ser igual o mayor que  $v$ , que es el de la velocidad de propagación del líder [41]. Matemáticamente la ecuación que representa el comportamiento de la corriente está dada en función del ancho  $z$  y del canal  $t$  y está dado por:

$$I(z, t) = \text{(Ec. 11)}$$

### 1.3.5.2. Modelo de generación de corriente

El modelo de generación propone que cada punto presente en el canal de la descarga puede ser considerado como una fuente de corriente, la cual es encendida cuando es alcanzada por la descarga de retorno líder. La corriente inyectada viaja a una velocidad  $u$ , aproximada a la velocidad de la luz. Para lo anterior, se asume que la descarga de retorno se descarga hacia arriba a una velocidad  $v$ . A continuación se proponen los siguientes modelos de generación de corriente [16], [41].

#### 1.3.5.2.1. Modelo Wagner

El modelo de Wagner se basó en tres suposiciones principales:

- I. Se asume una distribución de carga por unidad de longitud a lo largo del canal del líder.

(Ec. 12)

- II. Se presenta la siguiente ecuación que presenta una variación temporal de la corriente corona por unidad de longitud.

(Ec. 13)

III. Se asume una velocidad de descarga de retorno  $v$  como un valor constante y una velocidad de propagación infinita para la corriente corona que baja por el canal de la descarga de retorno.

$$I(z, t) = \frac{\rho_0}{\tau} \frac{1}{\left(\frac{1}{v\tau} - \frac{1}{\lambda}\right)} e^{\left(\frac{z}{\lambda}\right)} \left\{ e^{-\frac{v(t-\frac{z}{v})}{\lambda}} - e^{-\left(t-\frac{z}{v}\right)} \right\} \quad (\text{Ec. 14})$$

#### 1.3.5.2.2. Modelo Cooray y colaboradores

Este modelo descompone la ecuación matemática de la corriente de un rayo en una primera descarga de retorno y en una corriente corona que se origina a medida que el frente de la descarga de retorno avanza y alcanza una altura determinada en donde la carga localizada de la envolvente caliente de corona es neutralizada rápidamente dando origen a esta componente. La carga  $\rho(z)$  puede ser descrita en función de la corriente pico de la descarga  $I_p$  [41].

(Ec. 15)

## 1.4. Sistemas de detección de descargas atmosféricas indirectos

Los sistemas de medición indirecta de descargas pueden ser categorizados en dos tipos: los sistemas de detección convencionales y los sistemas de detección orientados a la precisión. En la primera categoría se destacan los contadores de descargas mientras que en la segunda hay dos categorizaciones: detección de la dirección (DF) y el sistema basado en el tiempo de arribo de la onda (TOA)

### 1.4.1. Contadores de eventos

Los contadores de eventos detectan la señal de la descarga atmosférica a través de un sensor de campo eléctrico estándar. El sistema detecta únicamente los eventos o el “flash” de la descarga y posee un contador interno que funciona como tiempo muerto para que strokes sucesivos de la descarga no sean tenidos en cuenta por el sensor. El



contador denominado “*CIGRE 10 kHz counter*”, tiene un ancho de banda entre los 2,5kHz – 50 kHz con un valor pico de diseño de 10kHz [41]. Este sensor es capaz de discriminar eventos nube – nube de eventos nube – tierra. El rango efectivo de la detección está definido por la siguiente ecuación:

(Ec. 16)

Donde:  $P(r)$ , es la probabilidad que un evento localizado una distancia  $r$  de separación de la antena sea detectada por el contador de eventos.

#### 1.4.2. Sistema DF

Los sistemas DF se constituyen de dos partes: la antena receptora la cual localiza la dirección de la descarga y el sistema de procesamiento de la posición. Este sistema puede operar con una estación o con múltiples estaciones. El sensor se compone de una antena de campo magnético con lazos ortogonales y una antena de campo eléctrico de placa y microprocesador. El ancho de banda de cobertura es de 1Hz - 400kHz [1].

Las antenas detectan las variaciones de campos magnéticos del rayo produciendo una tensión inducida en cada lazo en donde su relación integrada proporciona la dirección de la descarga. Por su parte la antena de campo eléctrico es omnidireccional y se utiliza para determinar la polaridad de la descarga. El sistema realiza un proceso de análisis a fin de determinar aquellas descargas que corresponden la descarga de retorno nube-tierra y rechazar las descargas entre nubes [8].

Si es un sistema de múltiples sensores, el analizador confronta la información obtenida con los diferentes sensores con el objeto de identificar si el evento registrado ha sido tomado por todos los sensores en un rango de tiempo de 20ms. Este sistema permite calcular las coordenadas, la amplitud, polaridad, número de strokes/flash y los sensores que detectaron los rayos [41], [42], [43].

Los sistemas DF presentan errores en la medición ocasionados por ruido de fondo recibido por el receptor, el cual produce errores en ángulo entre 0,7-0,9 grados. El otro error es generado por fuentes externas, por ejemplo: interferencia electromagnética, apantallamiento de edificios, variaciones en el terreno, entre otros [44].

#### 1.4.2.1. Sistema LLP

Este sistema de localización basado en tecnología DF fue el que se puso en funcionamiento en Colombia en el año 1994 y fue el adquirido por las empresas públicas de Medellín [4]. Posee cuatro sensores localizados en Antioquia en los siguientes municipios (Troneras, Río Grande II, La fe y Playas). Adicionalmente la Universidad Nacional cuenta con un sensor denominado TSS-420, el cual fue instalado en el año 1990, con un radio de cubrimiento de 185km [45].

#### 1.4.2.2. Sistema TOA

Los sistemas TOA miden la diferencia en los tiempos de arribo de una señal mediante tres o más sensores y localiza el sitio de impacto por medio de la intersección de las correspondientes hipérbolas sobre una superficie esférica [46]. Las técnicas TOA consisten en medir el tiempo que tarda un paquete de datos en llegar de un punto a otro. De esta manera se puede hacer una estimación de la distancia que separa a ambos nodos. Las estaciones bases varían de 10km a 400 km dependiendo de la sensibilidad seleccionada y las estaciones están conectadas a un analizador central por medio de canales de comunicación dedicados [47].

Las estaciones localizadas están sincronizadas en referencia a una señal de tiempo de referencia común y cada estación consta de una antena omnidireccional de recepción de descarga y una antena de sincronización. La primera recibe la referencia de tiempo y la otra detecta la variación de campo eléctrico del rayo. El receptor es capaz de responder dentro de una banda entre 50 Hz a 500KHz [48].

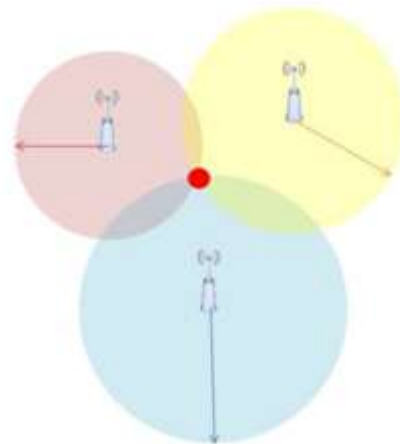


Figura 18. Esquema de medición a partir de TOA [46].

#### 1.4.2.2.1. Sistema LPATS

El sistema LPATS es un sistema basado en tecnología TOA adquirido por la interconexión eléctrica S.A. ESP-ISA en 1994. Este sistema consta de seis sensores ubicados de manera estratégica en conexión pentagonal y estaba enfocado en medir las descargas alrededor del sistema de transmisión nacional. La conexión pentagonal suministra la máxima eficiencia de operación del sistema según las recomendaciones realizadas por el fabricante. Los sensores se encuentran ubicados en Sabanalarga (Atlántico), Montelibano (Córdoba), San Carlos (Antioquia), San marcos (Valle del Cauca), Bogotá (Cundinamarca) y Bucaramanga (Santander) [15], [49].

#### 1.4.2.2.2. Sistema LINET

El sistema LINET es un sistema de detección de descargas de gran eficiencia y detección, basado en una red de sensores localizados en sitios estratégicos, que permiten presentar datos históricos y actuales de las descargas atmosféricas que se registran alrededor de los sensores y su respectivo alcance. El sistema LINET puede ser accedido de manera remota y cuenta con una plataforma que permite ilustrar la magnitud, amplitud, altura, polaridad, ubicación espacio - temporal y se visualizan en mapas en tiempo real [50]. EL sistema LINET es basado en tecnología TOA y recientemente la empresa KERAUNOS en Colombia adquirió equipos de esta tecnología y los instaló alrededor de la zona central y norte de Colombia [5].

A diferencia de los demás sensores el sistema LINET posee una alta eficiencia en la reducción del error con un margen de alrededor de 100m. Esto permite analizar la densidad de descargas a tierra a un valor igual a inferior a los  $3 \times 3 \text{ km}^2$ . Además, es capaz de detectar rayos nube – tierra e intranubes con una discriminación confiable y resaltando una eficiencia mayor a 90% [5].<sup>29</sup>

<sup>29</sup> <http://www.keraunos.co/attachments/article/81/Keraunos.pdf>



Figura 19. Imagen de sensor de detección de descargas basado en tecnología LINET<sup>30</sup>.

En estos momentos Colombia cuenta con sensores localizados alrededor de la zona central de Colombia y algunos sensores en la región Caribe. La Figura 20 señala los puntos donde se encuentran ubicados sensores en Colombia. La gran mayoría de estos sensores son nuevos y los primeros registran información desde Septiembre de 2011.



Figura 20. Puntos de localización de sensores de la red Keraunos<sup>31</sup>.

<sup>30</sup> Imagen tomada de:

<sup>31</sup> Imagen tomada directamente del sistema de información LINET.

### 1.4.2.3. Sistema basado en mapeo de imágenes

El sistema de medición basado en imágenes es utilizado por la Agencia Aeronáutica y Espacial de los Estados Unidos (NASA) el cual realiza mediciones desde un satélite entre los trópicos  $35^\circ$  de latitud Norte y  $35^\circ$  de latitud sur [51].

El sistema utilizado es denominado LIS (Lighting Imaging Sensor), fue desarrollado por un grupo de investigación científica en el Centro Global de Hidrología y Climatología (GHCC) y el Centro de Vuelos Espaciales Marshall de la NASA [51].

El sistema se basa en un dispositivo electrónico de elementos ópticos “*imager*” el cual es capaz de detectar y localizar rayos durante el día y la noche bajo la detección de variaciones de iluminación alrededor del globo captada en un momento por el satélite. La figura 8 ilustra la vista global analizada por el satélite. El sensor hace parte del observatorio de la Misión de Medición de Precipitación en el Trópico (TRMM) y está localizado a 350 km sobre la superficie de la tierra [12].

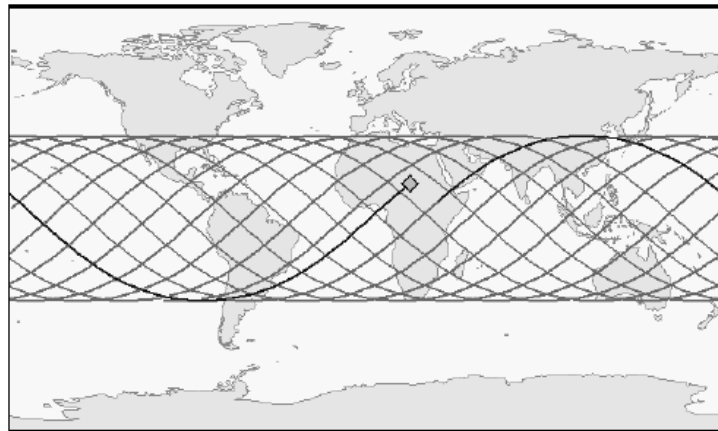


Figura 21. Vista global analizada por el satélite LIS alrededor de la órbita del planeta Tierra durante un periodo de 24 horas [51].

El sensor LIS hace parte de uno de los cinco elementos que conforman el TRMM y éste adicionalmente contiene los siguientes instrumentos: TMI (radiómetro a base de señales microondas), VISR (Escáner de visión infrarroja), PR (radar de precipitación) y CERES (sistema de radiación de energía de tierra y nubes) [32], [52].

El sistema TRMM ha demostrado que la actividad de rayos puede ser fácilmente detectada desde el espacio. A partir de esta herramienta se puede obtener información

importante acerca de tormentas, tasa de precipitación, peso de la tormenta y presencia de hielo [51].

### 1.5. Sistemas de detección de descargas atmosféricas directos

Los sistemas de medición directa son por lo general estructuras de gran altura diseñadas para captación de rayo y capaces de soportar la magnitud del valor nominal de los parámetros del rayo, los cuales están ligados a su lugar de ubicación. Esto implica contemplar las condiciones de cada estructura y/o estación de análisis [7], [15].

Para estimar la corriente de retorno del canal, los sistemas de medición directa utilizan la siguiente ecuación en función del tiempo:

(Ec. 17)

Siendo  $t_m$  y  $t$  el tiempo de ascenso de la corriente y el pico de la misma respectivamente.

A partir de la ecuación anterior se determina el campo electromagnético radiado, que impacta en la punta de la estructura llegue directamente a tierra [53].

El proyecto ILYAPA es un proyecto experimental iniciado en Colombia en el año de 1998 el cual se fundamenta en promover la medición directa de rayos en Colombia debido a que hasta ese momento las mediciones que se utilizaban eran indirectas. El proyecto ILYAPA presentaba los siguientes objetivos fundamentales:

- Obtener mediciones directas a fin de compararlas con los datos obtenidos mediante medición indirecta. Los datos directos permitirán el ajuste de los sistemas localizadores mejorando así la confiabilidad de la información de descargas en zona tropical [15].
- Comparar las magnitudes de parámetros del rayo en zonas tropicales con las reportadas en otras latitudes a fin de demostrar la variación espacio – temporal [15].
- Introducir mejoras en los equipos eléctricos y electrónicos para sistemas de protección contra descargas atmosféricas.

Los siguientes sistemas de medición directa para descargas atmosféricas han permitido el desarrollo de investigaciones de los parámetros del rayo.

- **Estación Alemana:** Esta estación localizada en el monte Honer Peissenberg sobre una torre de telecomunicaciones en Alemania comenzó sus mediciones desde el año 1978, posee una altura de 160 metros. La antena tiene medición en dos puntos a lo largo de su estructura (base y punta), con el objetivo de identificar el comportamiento transitorio generado por la torre, tiene un ancho de banda de 14 MHz. El sistema de detección se compone de un video de alta velocidad con una resolución vertical de 10 bits, un muestreo de 10 ns y un tiempo de registro de 50  $\mu$ s [1], [3].

El registro del impulso electromagnético se realiza desde una estación situada a 200 metros de la torre y la forma de onda de la descarga es medida por medio de un transformador *Pearson (Tipo 2093)* el cual es un monitor de corriente con una sensibilidad de 0,001 volt/ampere y soporte de corriente pico máximo de 2500 Amperes. Los registradores de eventos tanto en la base como en la punta permiten determinar la forma de onda de la descarga para determinar y comparar los eventos registrados [1].

- **Estación Canadiense:** localizada en la torre nacional de la ciudad de Toronto (CN), es la estación de medición más alta en el mundo (553 metros sobre el nivel de la tierra), Se encuentra integrado por tres sensores que permiten el registro de corriente, campo eléctrico y campo magnético. Para los cuales utiliza una *Bobina de Rogowski* para la detección de la corriente, el cual captura el 20% de la corriente de la descarga. El detector de campo magnético está integrado por un *Lazo de antena* mientras que el campo eléctrico se detecta por medio de un *Monopolo hemisférico*. Estos tres sensores de detección se encuentran integrados a un equipo que permite el registro de la información a través de un osciloscopio y un computador [1].
- **Estaciones Estadounidenses:** Utilizando el método de *rockets* que busca generar la inducción de líderes de movimientos ascendentes al igual que lo realizan de manera natural las montañas y las altas edificaciones o estructuras. Estos métodos son utilizados en las estaciones de Florida, Alabama y Nuevo

---

México. Estas mediciones son coordinadas por el *Keneddy Spacial Center* (KSC), los laboratorios nacionales SANDIA (SNL) y el laboratorio Langmuir. Las descargas generadas son similares a descargas naturales con la diferencia de que estos no tienen primera descarga ascendente y pueden exhibir una variedad de formas de onda.

- **Estaciones de Sudáfrica y Suiza:** Las estaciones de medición de Sudáfrica y Suiza son estaciones de medición similares en operación, poseen una altura de 60 metros sobre el nivel de la tierra y su medición de corriente se realiza mediante el uso de transformadores basados en impulsos de banda ancha. La estación de Sudafrica se encuentra ubicada en Pretoria y sigue lo establecido por Anderson & Ericksson en donde toman como referente la influencia de la altura de la estructura sobre el mecanismo de la descarga.
- **Estación Brasileña:** La estación brasileña Morro de Cachimbo (MCS) posee una altura de 60 metros, es uno de los puntos de medición directa localizado en Suramérica que opera desde el año 1985. Utiliza el método clásico de detección y el método de altitud para la determinación de las descarga. La estación MCS fue adquirida por la compañía energética de minas Gerais (CEMIG) del instituto nacional de investigaciones eléctricas (NEERI) ubicado en Suráfrica. La estación es similar a las estaciones de Sudáfrica y Suiza, fue instalada bajo las orientaciones de Anderson & Erickson. La estación almacena las descargas nube tierra que se generan en proximidad a la estación, el campo electromagnético generado y la corriente. Adicionalmente registra la información del evento a través de sistemas de video y fotografías. La estación se encuentra localizada a una altura de 1430 metros sobre el nivel del mar [54].
- **Estación Colombiana:** La estación de medición experimental colombiana (Ilyapa), sigue los diseños propuestos para las estaciones instaladas en Brasil, Suráfrica y Suiza [1]. La estación opera desde el año 1998 y se encuentra ubicada a 1000 metros sobre el nivel del mar, se encuentra localizada en la población de Puerto Olaya en las instalaciones de bombeo de Sebastopol, propiedad de la empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol). Su altura total es de 65 metros e incluye la punta tipo Franklin y su base. Su construcción es metálica, lo que la hace



equivalente a una jaula de Faraday. Esta estación busca validar la información recopilada de manera indirecta por los sistemas de medición instalados [1].

## CAPITULO 2: METODOLOGÍA

La presente investigación se basó en la información obtenida de la red de localización de descargas atmosféricas KERAUNOS, la cual entró en operación en Colombia a partir de Septiembre de 2011. La Figura 22 presenta los puntos de localización con los que cuenta actualmente la red KERAUNOS para su operación [5].



**Figura 22. Puntos de localización de sensores de la red KERAUNOS en Colombia.**

Para el análisis de la información registrada por la red, se implementó el uso de herramientas computacionales entre las cuales se destaca programación en MATLAB, debido a que se requería de un programa que organizara la información para su respectivo filtrado, selección y clasificación de la misma. El uso de las herramientas computacionales como MATLAB y los comandos de análisis estadísticos de EXCEL, permitieron una interpretación eficiente de los datos debido a la numerosa información recopilada para la Región Caribe Colombiana.

El mecanismo de obtención de la información, los sistemas de filtrado utilizados, las subclasificaciones realizadas y los programas desarrollados que permitieron la interpretación de los datos son presentados durante el desarrollo del presente capítulo.

## 2.1. Análisis de la información obtenida de la red KERAUNOS.

El análisis de la información demandó mucho tiempo de dedicación debido a la gran cantidad de información que se había recopilado a través de la red de localización de descargas atmosféricas, que en promedio se estiman unas 589,000 descargas (Strokes) de acuerdo a la información recopilada para el periodo observado. Este análisis se realizó mediante la programación en MATLAB, la cual tenía como objetivo analizar los archivos en formato de texto (.txt), que eran descargados del sistema y convertirlos a formatos de MATLAB (.mat) y así organizarlos en filas, celdas y columnas para una mejor interpretación de los mismos. El desarrollo de un sistema de adquisición de la información facilitó el trabajo para la interpretación de la información y su futura interpretación [55].

### 2.1.1. Descripción de cómo es adquirida la información de la red KERAUNOS

La figura 23 presenta el formato en el que es presentada la información de las descargas registradas. La información por cada archivo (.txt), presenta la información por día de los eventos ocurridos en el área analizada.

The image shows a screenshot of a text file with a grid of numerical data. The data is organized in rows and columns, representing individual lightning discharge events. Each row contains multiple numerical values, including timestamps, positive and negative charge values, and other parameters. The first row of data is: 20110922 06:42:54.468 +13.3647 -80.8540 00.0 1 034.0 08.62420110922 06:50:25.702 -13.3281. The grid continues with many more rows of similar data points.

Figura 23. Formato de presentación de datos de la red KERAUNOS.

De acuerdo a lo presentado en la figura 23, se resalta que cada evento contiene la información que se presenta en la tabla 4 en el respectivo orden de izquierda a derecha en que se presenta la tabla. Por ejemplo, para el caso del bloc de notas que se ilustra en la figura 23, hay un primer evento que tiene la siguiente codificación:

20110922 06:42:54.468 +13.3647 -80.8540 00.0 1 034.0 08.624

Toda la información que se presenta en esta línea de texto, corresponde a un primer evento, cuya representación se presenta en la tabla 5. Cada evento contiene la información: año, día, mes, hora: minutos: segundos: centésimas de segundos, latitud, longitud, altura de ocurrencia del evento, tipo de evento, amplitud de la descarga en el orden de kA (kilo Amperios), error en dos dimensiones.

**Tabla 4. Descripción de datos obtenido.**

Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Segundo	Mili segundo	Latitud	Longitud	Altura	Tipo	Corriente (kA)	Error
2011	09	22	06	42	54	468	13,3647	-80,8540	00,0	1	034,0	08,624

A continuación se describe la información suministrada por cada uno de los parámetros:

**Tabla 5. Información de referencia tomada para formato de datos utilizado.**

<b>FECHA</b>	<b>AÑO</b>	yyyy: Indicación del año en que ocurre el evento.
	<b>MES</b>	mm: Indica en formato numérico el mes correspondiente.
	<b>DIA</b>	dd: Indicación del día.
	<b>HORA</b>	hh: Indicación de la hora en la cual el sistema registra el evento.
	<b>MINUTO</b>	mm: Indicación del minuto en la cual el sistema registra el evento.
	<b>SEGUNDO</b>	ss: Indicación del segundo en la cual el sistema registra el evento.
	<b>MILISEGUNDO</b>	uuu: Indicación del milisegundo en la cual el sistema registra el evento.
<b>POSICIÓN GEOGRAFICA</b>	<b>LATITUD</b>	+/- gg,ffff: Medida de posición espacial entre línea ecuatorial y un punto determinado del planeta donde se registra el evento.
	<b>LONGITUD</b>	+/- gg,ffff: Medida de la distancia angular entre un punto dado de la superficie terrestre y el meridiano donde se registra el evento.
	<b>ALTURA</b>	hh,f: Altura a la cual se registra el evento.
<b>TIPO DE EVENTO</b>	x: Indica si se presentó un evento Nube-tierra o un evento nube – nube	
<b>MAGNITUD</b>	+/- kkk,f:: Magnitud de la corriente en el orden de los kiloamperes que presentó el evento registrado.	
<b>ERROR DE MEDIDA</b>	ee,f: Rango de error en dos dimensiones que presenta la medición realizada.	

Donde:

- **yyyy:** Indicación de la referencia de año que se da en cuatro dígitos numéricos. Ejemplo: 2011
- **mm:** Indicación de la referencia del mes. Se da en dos dígitos numéricos. Ejemplo: 09, que equivale al mes de septiembre.
- **dd:** Indicación de referencia del día. Se da en dos dígitos numéricos.
- **mm:** Indicación de referencia de minutos. Se da en dos dígitos numéricos.
- **ss:** Indicación de referencia de segundos. Se da en dos dígitos numéricos.
- **uuu:** Indicación de referencia de mili segundos. Se da en tres dígitos numéricos.
- **+/-:** Valor positivo o negativo del dígito asociado. Su interpretación se relaciona en función de la magnitud analizada.

- **g**: Dígito para la representación de grados. Ejemplo: ggg, equivale a tres dígitos para la representación.
- **f**: dígito para fracción asociado a una unidad de medida. Ejemplo: ffff, equivale a cuatro dígitos para la fracción asociada.
- **x**: Tipo de descarga registrada: “1” descarga nube-tierra, “2” descarga nube-nube.
- **k**: dígito para magnitud de corriente. La corriente es expresada con tres dígitos enteros es decir kkk.
- **e**: dígito para rango de medición de error. El error es expresado con dos dígitos enteros es decir ee.

### **2.1.2. Manejo de la información mediante el uso MATLAB.**

El manejo de la información se realizó con el tipo de información que se presentó en la figura 23 y de acuerdo con las especificaciones realizadas anteriormente, se realizó su interpretación. Este proceso se realizó inicialmente de manera diaria. El programa realizado tiene como finalidad la organización de la información de acuerdo a lo señalado por el documento insertado y de esta manera eran incorporados los datos. Cada columna corresponde específicamente a la información señalada en las tablas 5 y 6 y tienen como objetivo inicial servir de base de datos de la información obtenida de la red.

#### **2.1.2.1. Organización de la información en bases de datos.**

La figura 24 es un ejemplo de cómo es condensada la información en un archivo (.mat) de MATLAB. Este archivo en específico corresponde a los veintisiete primeros eventos registrados durante el día 20 de Diciembre del año 2011. De esta manera se organizaron todos los eventos registrados durante ese día.

Tabla de archivo  
File: December\_20\_2011  
Size: 79 Events

	Year	Month	Day	Hour	Minutes	Seconds	Thousands...	Latitude	Longitude	Height	Type	Current (kA)	2D Error
1	2011	12	20	0	0	24	202	9.2771	-76.4605	0	1	-65.8000	8.5270
2	2011	12	20	0	0	24	274	9.2734	-76.4351	0	1	-43.6000	7.7543
3	2011	12	20	0	2	8	258	9.2714	-76.4497	0	1	-46.6000	8.8690
4	2011	12	20	0	2	8	294	9.2670	-76.4486	0	1	-52.9000	7.9030
5	2011	12	20	0	2	8	370	9.2573	-76.4407	0	1	-25.4000	9.0410
6	2011	12	20	0	2	8	447	9.1500	-76.3738	0	1	-16.7000	7.4670
7	2011	12	20	0	2	59	380	9.3362	-71.6745	0	1	-17.3000	6.5370
8	2011	12	20	0	4	9	638	8.7141	-74.6223	0	1	-28.7000	6.3460
9	2011	12	20	0	4	51	133	9.4541	-71.5930	0	1	-14.1000	8.8780
10	2011	12	20	0	6	27	915	9.3682	-71.6460	0	1	-23.1000	1.2160
11	2011	12	20	0	6	27	928	9.3590	-71.6663	0	1	16.9000	1.0340
12	2011	12	20	0	6	27	964	9.3944	-71.6477	0	1	-20.2000	1.0670
13	2011	12	20	0	7	16	270	8.7124	-74.6312	0	1	-23.8000	8.4170
14	2011	12	20	0	7	16	297	8.6980	-74.6404	0	1	-16.1000	8.4520
15	2011	12	20	0	7	16	345	8.7287	-74.6337	0	1	-15.2000	8.3590
16	2011	12	20	0	7	16	405	8.7322	-74.6334	0	1	-17.1000	8.4110
17	2011	12	20	0	7	24	129	8.2347	-76.2568	0	1	-31.2000	6.8170
18	2011	12	20	0	10	25	250	8.7209	-74.6425	0	1	-81.8000	9.3790
19	2011	12	20	0	10	25	266	8.7251	-74.6398	0	1	-14.9000	8.4270
20	2011	12	20	0	10	25	285	8.7221	-74.6420	0	1	-22.7000	8.5040
21	2011	12	20	0	10	55	615	9.2613	-76.4750	0	1	-62.6000	5.9220
22	2011	12	20	0	13	43	222	9.2818	-76.4310	0	1	-20.8000	7.7150
23	2011	12	20	0	13	43	587	9.2569	-76.4648	0	1	-61.2000	8.5470
24	2011	12	20	0	13	43	643	9.2608	-76.4659	0	1	-51.7000	8.0790
25	2011	12	20	0	18	55	897	8.4495	-74.6152	0	1	-34.5000	8.2910
26	2011	12	20	0	22	55	191	9.2468	-76.3699	0	1	-19.9000	8.3090
27	2011	12	20	0	25	19	988	8.4590	-74.6100	0	1	11.3000	8.1420

Figura 24. Ejemplo de cómo es almacenada la Información diaria en formato .mat

Una vez almacenados los archivos pueden ser abiertos en formato tipo tablas de MATLAB como se ilustra en la figura 24.

Variable Editor - December\_20\_2011\_and\_Info(1:1)

Stack: base - No valid plots for cell/mat...

December\_20\_2011\_and\_Info(1:1)+79x13 cell

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	2011	12	20	0	0	24	202	9.2771	-76.4605	0	1	-65.8000	8.5270	
2	2011	12	20	0	0	24	274	9.2734	-76.4351	0	1	-43.6000	7.7543	
3	2011	12	20	0	2	8	258	9.2714	-76.4497	0	1	-46.6000	8.8690	
4	2011	12	20	0	2	8	294	9.2670	-76.4486	0	1	-52.9000	7.9030	
5	2011	12	20	0	2	8	370	9.2573	-76.4407	0	1	-25.4000	9.0410	
6	2011	12	20	0	2	8	447	9.1500	-76.3738	0	1	-16.7000	7.4670	
7	2011	12	20	0	2	59	380	9.3362	-71.6745	0	1	-17.3000	6.5370	
8	2011	12	20	0	4	9	638	8.7141	-74.6223	0	1	-28.7000	6.3460	
9	2011	12	20	0	4	51	133	9.4541	-71.5930	0	1	-14.1000	8.8780	
10	2011	12	20	0	6	27	915	9.3682	-71.6460	0	1	-23.1000	1.2160	
11	2011	12	20	0	6	27	928	9.3590	-71.6663	0	1	16.9000	1.0340	
12	2011	12	20	0	6	27	964	9.3944	-71.6477	0	1	-20.2000	1.0670	
13	2011	12	20	0	7	16	270	8.7124	-74.6312	0	1	-23.8000	8.4170	
14	2011	12	20	0	7	16	297	8.6980	-74.6404	0	1	-16.1000	8.4520	
15	2011	12	20	0	7	16	345	8.7287	-74.6337	0	1	-15.2000	8.3590	
16	2011	12	20	0	7	16	405	8.7322	-74.6334	0	1	-17.1000	8.4110	
17	2011	12	20	0	7	24	129	8.2347	-76.2568	0	1	-31.2000	6.8170	
18	2011	12	20	0	10	25	250	8.7209	-74.6425	0	1	-81.8000	9.3790	
19	2011	12	20	0	10	25	266	8.7251	-74.6398	0	1	-14.9000	8.4270	
20	2011	12	20	0	10	25	285	8.7221	-74.6420	0	1	-22.7000	8.5040	
21	2011	12	20	0	10	55	615	9.2613	-76.4750	0	1	-62.6000	5.9220	
22	2011	12	20	0	13	43	222	9.2818	-76.4310	0	1	-20.8000	7.7150	
23	2011	12	20	0	13	43	587	9.2569	-76.4648	0	1	-61.2000	8.5470	
24	2011	12	20	0	13	43	643	9.2608	-76.4659	0	1	-51.7000	8.0790	
25	2011	12	20	0	18	55	897	8.4495	-74.6152	0	1	-34.5000	8.2910	
26	2011	12	20	0	22	55	191	9.2468	-76.3699	0	1	-19.9000	8.3090	
27	2011	12	20	0	25	19	988	8.4590	-74.6100	0	1	11.3000	8.1420	
28	2011	12	20	0	25	19	989	8.4665	-74.6106	0	1	10.7000	8.2580	
29	2011	12	20	0	25	20	133	8.4194	-74.5798	0	1	-16.1000	8.3050	

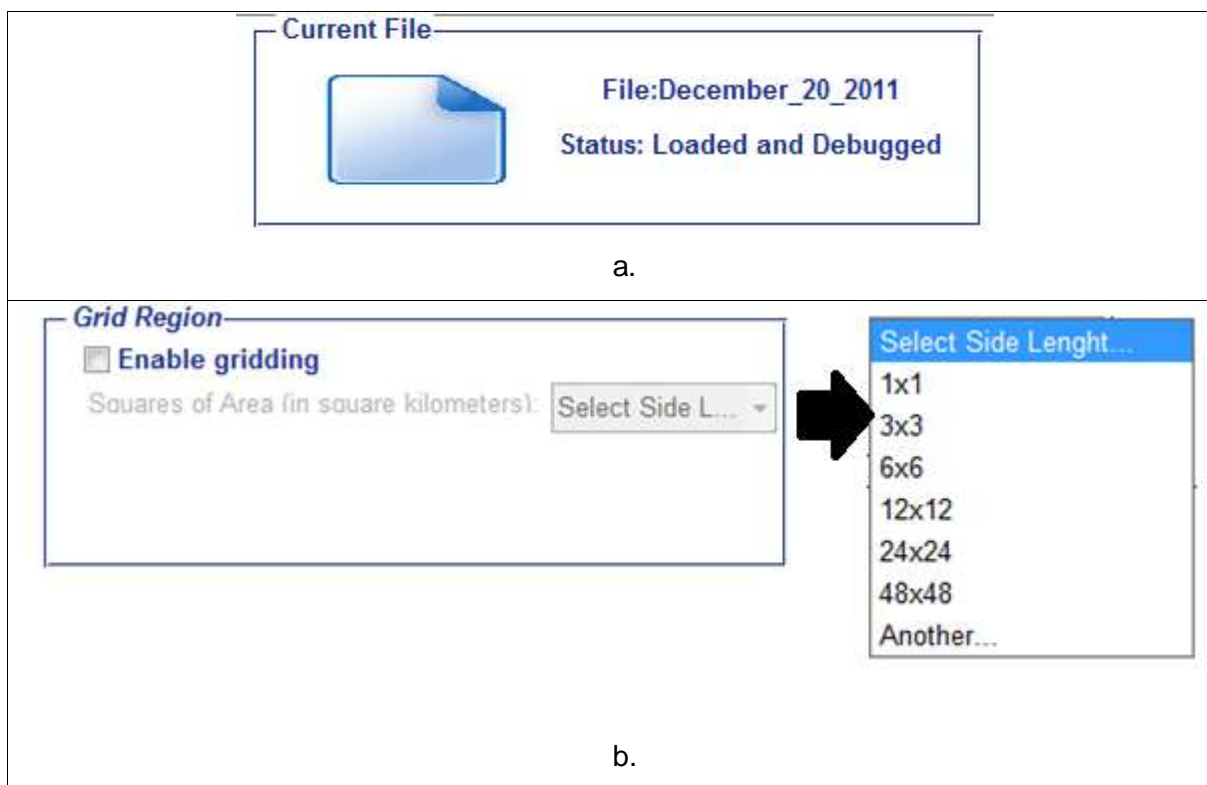
Figura 25. Ejemplo de cómo es almacenada la Información diaria en formato .mat

Una vez se tienen esta información organizada de los eventos, se procede a realizar una categorización diaria, mensual y anual de los eventos registrados.

### 2.1.2.2. Descripción del programa organizador de bases de datos (MATTIE)

Para el análisis de la información obtenida, es requerida información precisa como la presentada en el capítulo 1 del presente documento. A continuación se describen los procesos de filtrado y análisis que se le realizaron a cada uno de los 366 archivos recopilados del sistema de información de descargas atmosféricas KERAUNOS, los cuales fueron realizados mediante un proceso de filtrado y categorizado por medio del programa MATTIE.

Este programa a través de MATLAB, permite la interpretación de archivos .txt y convertirlos a formato .mat, como se presentó en las figuras 24 y 25. Una vez se cuenta con esta información procesada, es posible ejecutar las siguientes acciones en función de los análisis que se vayan a realizar con la información obtenida.



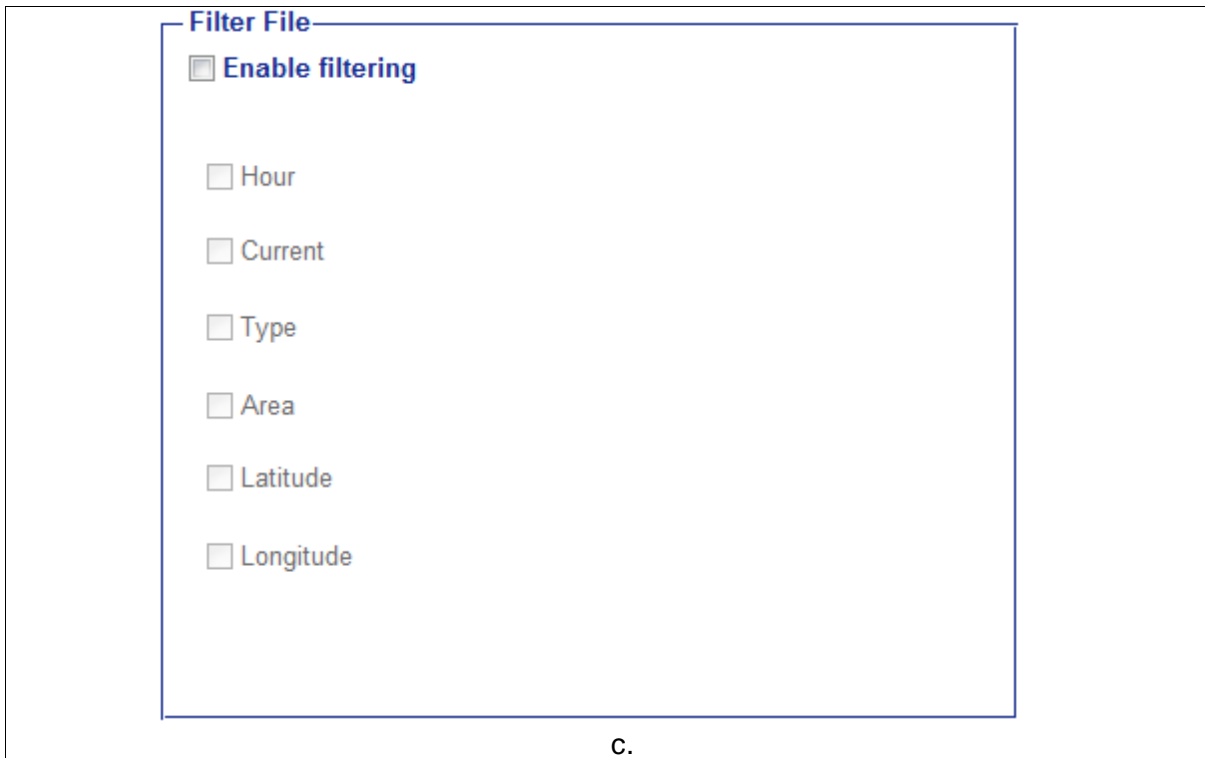


Figura 26. Acciones que desarrolla el programa MATTIE en los archivos consolidados en la base de datos. a. Información base del archivo analizado. b. Categorización por áreas y/o regiones. C. Proceso de filtrado dependiendo de varias condiciones.

- **Información de estado del archivo (*Current file*):** La figura 26a, ilustra la herramienta de visualización que tiene el programa, la cual permite identificar el archivo que se está trabajando y el estado del archivo. El estado “*Loaded and debugged*”, indica que el archivo se ha cargado exitosamente y que se encuentra convertido a formato .mat
- **Categoría de eventos por subareas (*Grid Region*):** Esta herramienta permite clasificar los eventos registrados de acuerdo al área donde se presentaron a fin de precisar un valor de densidad de descargas a tierra para cada una de estas zonas. Cada área de análisis dentro del programa puede ser de: *1 km x 1 km, 3 km x 3 km, 6 km x 6 km, 12 km x 12 km, 24 km x 24 km, 48 km x 48 km*. Y esto dependerá de la precisión que se desee tener para el cálculo de la densidad de descargas a tierra de los datos analizados.

Una vez se seleccione la división de áreas deseadas, el sistema generará una grilla, la cual asignará un espacio dentro de la matriz que corresponde a cada subdivisión de área, esto dependerá de los parámetros ingresados de la región en



estudio. Finalmente cada evento registrado será clasificado en dependencia de su sitio de ocurrencia y se le asignará la zona donde ocurrió.

- **Filtrado de eventos:** El sistema de adquisición de datos utilizado almacena toda la información de eventos registrados de descargas atmosféricas, con hora de ocurrencia, amplitud de la descarga, entre otros aspectos como se definió en la sección 2.1.1. Para efectuar una categorización precisa de los eventos se diseñaron los siguientes tipos del filtrado en función de sus parámetros:
  - **Filtrado por hora:** Filtra los datos en dependencia de las horas asignadas por el usuario.
  - **Filtrado por amplitud de corriente:** Filtra los datos registrados de acuerdo a la amplitud máxima y mínima ingresada de la descarga.
  - **Filtrado por tipo:** Clasifica las descargas atmosféricas entre nube – tierra y nube – nube, las cuales son 1 y 2 respectivamente de acuerdo a la parametrización del sistema de información expresado en la sección 2.1.1.
  - **Filtrado por área:** Una vez sean clasificados los eventos registrados de acuerdo a la zona o área en donde ocurrieron, estos pueden ser filtrados en dependencia de los requerimientos del usuario de acuerdo a su área bajo la cual fueron clasificados durante el proceso de categorización por subareas.
  - **Filtrado por latitud:** Presenta los eventos que ocurrieron entre las medidas latitudes seleccionadas.
  - **Filtrado por longitud:** Presenta los eventos que ocurrieron entre las medidas de longitud seleccionadas.

### 2.1.3. Análisis estadístico.

Para el análisis estadístico de los eventos registrados se realizó la clasificación de la información de acuerdo a los parámetros relevantes para el análisis de las descargas atmosféricas a tierras. Para lo anterior fue necesario analizar la información recopilada de manera diaria del sistema de descargas atmosféricas KERAUNOS y efectuar el análisis de la información de manera diaria, mensual, anual.

Basado en lo anterior, el grupo de investigación desarrolló el programa LIT, el cual se desarrolla bajo la plataforma de programación de MATLAB y cuyo objetivo radica en



efectuar un análisis estadístico de los eventos registrados. La figura 27 ilustra el menú inicial de los eventos registrados.

Figura 27. Presentación del menú inicial para el análisis estadístico.

Mediante este programa se puede analizar la información y entregar el análisis estadístico de los datos ingresados. Como información de entrada se selecciona la información del rango de días que se desea analizar y posteriormente los diferentes filtrados de información que ofrece el programa.

Este programa puede filtrar información por rango de corrientes, rango de horas, rango de latitud y longitud. Como resultado la información presenta: el total del número de eventos, la mediana (Quantil 50%), mes, día y hora con mayor número de eventos y la cantidad de estos, al igual que las descargas atmosféricas de magnitud positivas como negativas. La figura 28 ilustra la manera en que es presentada la información de los eventos analizados.



Figura 28. Resultados estadísticos de los datos analizados mediante el programa LIT.

La figura 29 presenta los análisis estadísticos de los eventos tanto por polaridad al igual que por rango de horas en que se presentan. La información analizada puede ser almacenada en formato .mat de los datos analizados.

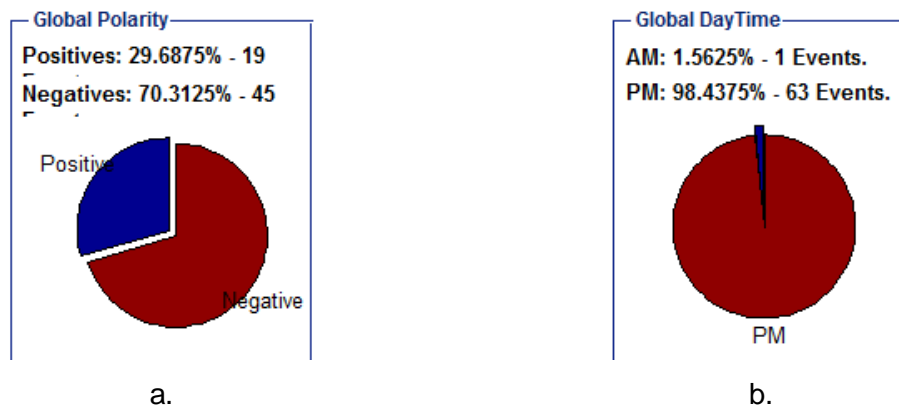


Figura 29. Ejemplo de los análisis estadísticos presentados por el programa LIT a) Análisis de los datos de acuerdo a la polaridad de la descarga b) Análisis de los datos de acuerdo al rango de horas AM o PM en que ocurren los eventos.

## 2.2. Información registrada

Otro de los objetivos del desarrollo de la presente investigación y caracterización de las descargas atmosféricas en la región Caribe colombiana, radica en validar la información almacenada por el sistema de descargas atmosféricas KERAUNOS con los datos registrados por el sistema de monitoreo de descargas que ha utilizado el grupo de investigación para detectar la ocurrencia de los eventos. Este sistema de monitoreo hace referencia a una cámara de video de característica monocromática, alta sensibilidad en la detección de eventos y un control automático del iris (autoiris<sup>32</sup>).



Figura 30. Elementos del sistema de monitoreo de descarga. a) Cámara WATEC 902H b) Lente para variación de autoiris.

Los elementos ilustrados en la figura 19a y 19b, son respectivamente la cámara de video del tipo CCD y el lente para ajustarse a las variaciones y cambios en la iluminación.

### 2.2.1. Cámara CCD con lente autoiris.

Los sistemas CCD o dispositivos de carga acoplada, son integrados fotosensibles que registran por un pronunciado tiempo los eventos presentes en los cuales incide la luz sobre una serie de píxeles dispuestos de manera cuadrangular.

Los sistemas CCD a diferencia de las cámaras convenciones, las cuales captan únicamente el movimiento registrado, detectan las diferencias de iluminación registradas y a partir de esto formar imágenes. Su principal característica radica en su alta capacidad

<sup>32</sup> **Autoiris:** Método automático de variar el tamaño de la apertura de una lente en respuesta a los cambios de iluminación en la escena.

<sup>33</sup> [http://www.brubeki.com.br/watec902\\_supreme.htm](http://www.brubeki.com.br/watec902_supreme.htm)

<sup>34</sup> [http://www.bhphotovideo.com/c/product/445445-REG/Bosch\\_LTC321420\\_LTC3214\\_20\\_2\\_8mm\\_Lens.html#specifications](http://www.bhphotovideo.com/c/product/445445-REG/Bosch_LTC321420_LTC3214_20_2_8mm_Lens.html#specifications)

de precisión lo cual la hace altamente sensible. Estos sistemas requieren de un acople a computador para un mejor aprovechamiento de su capacidad de registro y así almacenar los eventos registrados [56].<sup>35</sup>

La cámara WATEC 902H, corresponde a una cámara del tipo CCD monocromático, por medio del cual se registraron los eventos (figura 30a). Esta cámara adicionalmente integra un lente de ajuste de iris que permite una mejor adaptación a las variaciones de luz para poder captar con mayor calidad la imagen (figura 30b).

### **2.2.2. Registro de la información.**

Como se mencionó en la sección anterior, las cámaras CCD requieren de una integración con un computador para un mejor manejo de la información almacenada. Es por lo anterior que se recurrió a conectar el sistema CCD: Cámara CCD + Lente Autoiris, con un sistema de captación de video, el cual no es más que la herramienta de enlace entre el computador y el sistema CCD utilizado y así a través del Software UFO CAPTURE realizar el análisis de los eventos que puedan ser registrados con el sistema de monitoreo.

Este sistema tiene la capacidad de operar de manera continua y sin interrupción salvo el de su fuente de alimentación y la del computador al cual está conectado. Por lo anterior puede registrar los eventos en tiempo real y por medio del software programar el área de estudio y sobre esta almacenar la información relevante que permita el contraste de la información que se está analizado por intermedio del sistema de descargas KERAUNOS con los eventos registrados.

La figura 31, ilustra la manera en que funciona el sistema de monitoreo de descargas atmosféricas implementado en la Universidad del Norte. Donde se destaca la precisión temporal y espacial del evento. Esta es programada previamente para operar en tiempo real y sincronizada con el sistema de posicionamiento satelital (GPS) para tener correspondencia con los eventos almacenados por la red de descargas KERAUNOS.

Mediante la integración de la cámara CCD, el lente Autoiris, el sistema de captación para procesamiento en computador y el software UFO CAPTURE. Se definió entonces como el

<sup>35</sup> [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lep/hernandez\\_g\\_d/capitulo3.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/hernandez_g_d/capitulo3.pdf)

sistema de monitoreo de descargas atmosféricas funciona de manera integrada y permite la captura de eventos en la óptica de visión de la cámara CCD.



Figura 31. Imagen obtenida del sistema de monitoreo mediante UFO CAPTURE y el sistema CCD.

### 2.2.3. Validación de la red KERAUNOS

La implementación de este sistema de monitoreo de descargas, busca finalmente validar la información suministrada por la red KERAUNOS y estimar su precisión a fin de identificar cada uno de los posibles eventos registrados por el sistema de monitoreo dentro de los eventos que presenta la red.

Esta validación se realiza a fin de confrontar la información suministrada por la red KERAUNOS y estimar la precisión de este conforme a los datos analizados durante la caracterización de las descargas. Cada uno de los eventos verificados durante el periodo de estudio, serán contrastados con la red a fin de determinar si efectivamente ocurrieron en los lugares que el sistema señala.

---

## **CAPITULO 3: CARACTERIZACIÓN DE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS A TIERRA**

El presente capítulo es el resumen de los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación realizada durante el periodo de análisis de la información recopilada del sistema de información KERAUNOS. El sistema de localización de rayos recopila la información conforme se presentó en el capítulo 2 y es procesado mediante los sistemas de procesamiento de información desarrollados por el grupo de investigadores. Esta información es analizada y filtrada conforme lo expone la teoría existente.

A partir de lo anterior, el presente capítulo parte del análisis de la actividad atmosférica respecto al total de eventos registrados a fin de identificar qué porcentaje de estos eventos corresponden a eventos nube – tierra, como también se presenta el análisis de comportamiento de las descargas durante todo el periodo analizado. (Sección 3,1). Posteriormente se analizan las proporciones de descargas nube – tierra respecto a su polaridad y se comparan los resultados obtenidos con investigaciones realizadas a nivel nacional y referentes internacionales (Sección 3,2).

Una vez se analizan las polaridades de las corrientes, se procede a analizar la magnitud de estas para identificar el grado de severidad de las mismas. (Sección 3,3). Debido a que la amplitud pico de la corriente de retorno del rayo es un parámetro necesario para el diseño de los sistemas de apantallamiento y la caracterización de las descargas en las áreas analizadas. El número de Strokes por cada uno de los Flashes registrados son presentados de manera seguida. (Sección 3,4)

Finalmente, se presenta la densidad de descargas a tierra, la cual se analiza respecto al número de Flashes y Strokes presentados. (Sección 3,5)

### 3.1. Análisis de la actividad atmosférica general de la región Caribe Colombiana en función del total de eventos registrados.

En el presente subcapítulo se detalla el comportamiento mensual de las descargas atmosféricas registradas a nivel regional, señalando un análisis comparativo entre el total de eventos registrados en el sistema que incluye descargas atmosféricas nube – nube, intranubes y nube – tierra.

#### 3.1.1. Relación de eventos atmosféricos.

La relación comparativa se desarrolla en dos categorías: La categoría 1, que corresponde a las descargas nube–tierra registradas durante los periodos de análisis y la categoría 2, que abarca los eventos nube-nube e intranubes y no hace diferencia entre estos. La figura 32 presenta el total de eventos registrados durante los intervalos analizados desde el 01 de Octubre de 2011 hasta el 30 de septiembre de 2012.

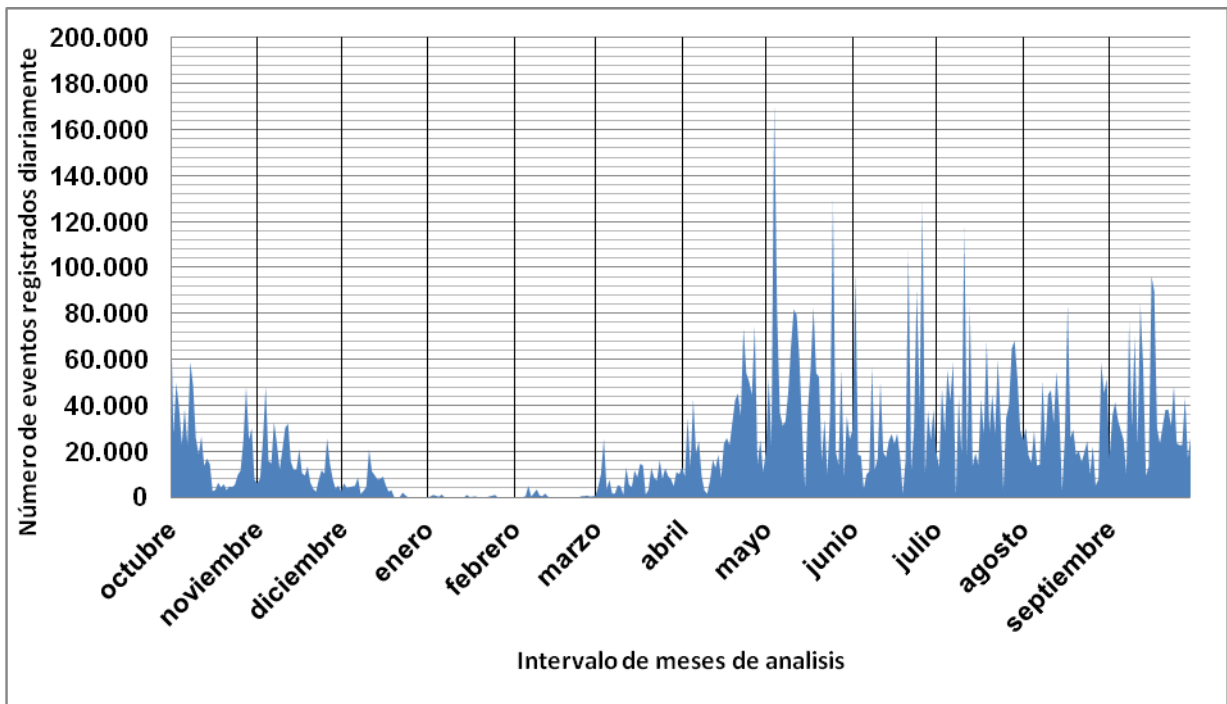
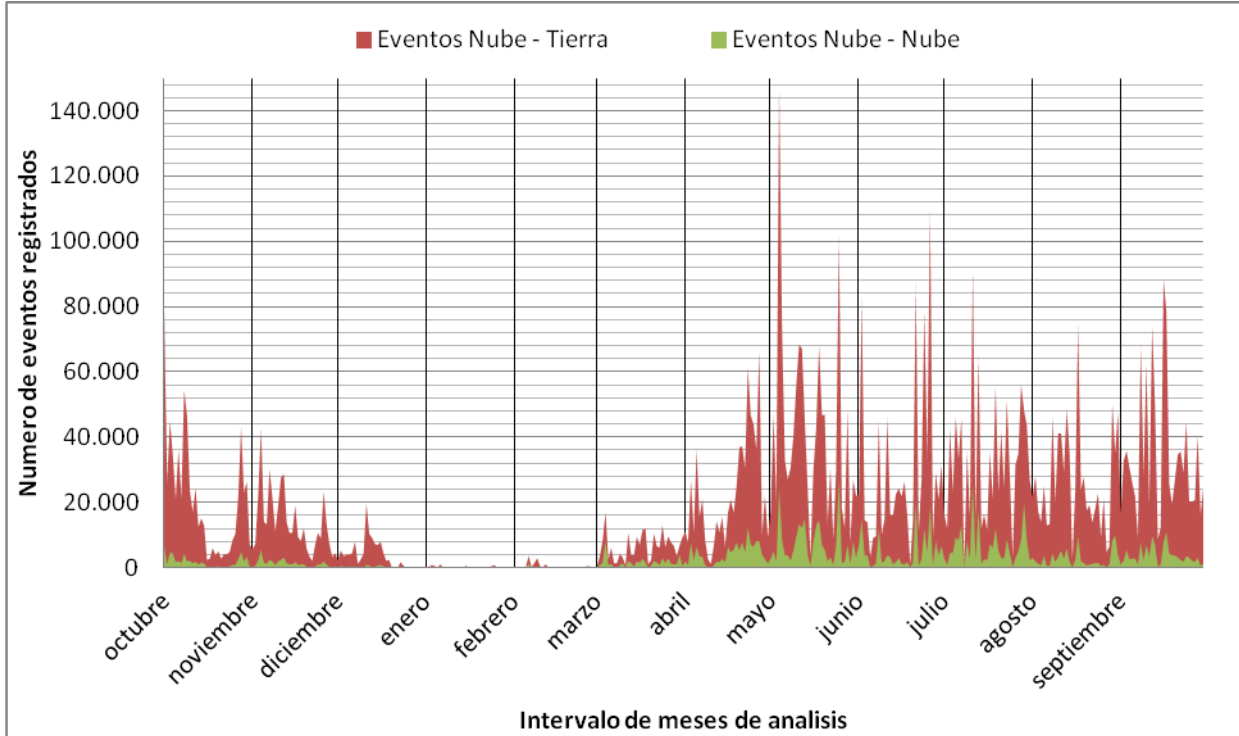


Figura 32. Análisis de comportamiento del total de eventos registrados.

Como se ilustró en la figura 32, se presentaron las cantidades de eventos registrados diariamente desde el inicio de las mediciones tratando de encontrar una relación para determinar el número de descargas a tierra que puedan presentarse en comparación al total de eventos. A partir de lo anterior, se identificó en la gran mayoría de los días

analizados un alto porcentaje de eventos nube – tierra en relación al total de eventos, como se ilustra en la figura 33.



**Figura 33. Comparación día a día del total de eventos Vs. total de eventos Nube–tierra registrados.**

Basado en los resultados presentados en la figura 33, en donde se obtiene para ambos tipos de datos analizados (total de eventos y eventos Nube-Tierra), una proporción similar de acuerdo al total de eventos presentados y con una correlación similar pero reducida, se buscó entonces relacionar un valor porcentual del total de eventos existentes con respecto a los eventos nube – tierra a fin de caracterizar los meses analizados.

Con base en lo anterior, por cada día analizado se realizó una proporción de los eventos nube – tierra en función del total de eventos, a fin de categorizar las descargas atmosféricas con una proporción porcentual del total de eventos presentados. Por ejemplo, en el día 05 de Octubre de 2011, se presentaron 23,079 eventos, de los cuales 21,176 eventos fueron identificados como descargas Nube – tierra. Es decir un 91,8% de las descargas presentadas ese día resultaron descargas nube tierra. De esta manera cada día se categorizó con un valor porcentual en referencia al total de eventos. Esto se realiza a fin de lograr determinar en qué proporción es posible relacionar los eventos nube–tierra respecto al total de eventos registrados.



En la figura 26, se presenta una relación porcentual de las descargas nube-tierra respecto al total de eventos registrados por cada día analizado, siguiendo el planteamiento señalado anteriormente en donde cada día posee un total de eventos que corresponden al 100% y que las descargas nube-tierra son una proporción de estos. La figura 26 relaciona el total de eventos de los días analizados, también se relaciona el promedio del total de datos medidos y el percentil del 95% de los datos.

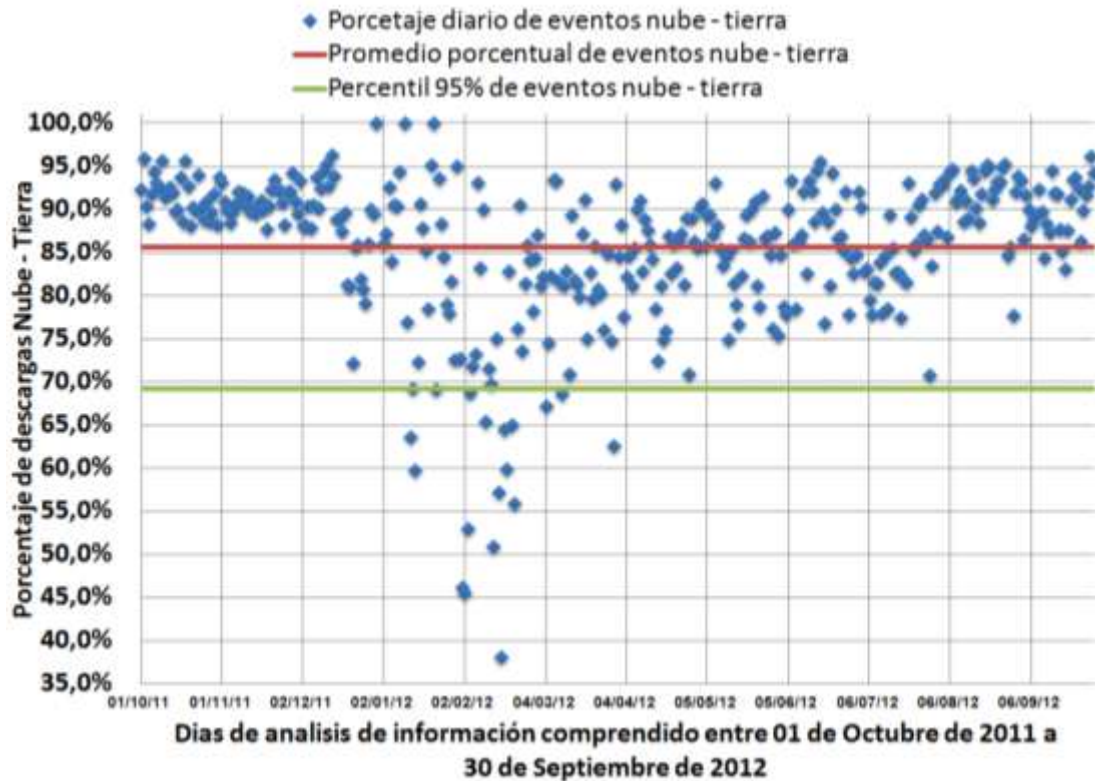


Figura 34. Análisis de dispersión diario del comportamiento de las descargas atmosféricas Nube – Tierra.

El promedio de los datos analizados arrojó que el valor medio de estos es 84,4%. Es decir que en un día promedio el 84,4% de los eventos pueden ser eventos nube – tierra. Sin embargo los datos comprendidos entre el 01 de Octubre de 2011 hasta el 20 de diciembre de 2011 se encuentran por encima de la media calculada. Esta información corresponde a días de lluvia en la región Caribe de acuerdo a como lo establece el IDEAM<sup>36</sup>. Esta información da indicios para correlacionar las épocas de lluvias en la región Caribe con respecto a los días en que se presentan el mayor número de descargas atmosféricas. Adicionalmente, de acuerdo al comportamiento de los días de lluvias y no lluvias es recomendable para futuras investigaciones analizar los datos de manera independiente.

<sup>36</sup><http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?IServicio=Publicaciones&ITipo=publicaciones&IFuncion=loadContenidoPublicacion&id=812>

### 3.1.2. Análisis promedio mensual de eventos atmosféricos.

La tabla 6 presenta los datos analizados promedios por día presentados en relación al total de los eventos registrados. Por ejemplo, para el periodo del mes de octubre del año 2011, en promedio, en un día del mes de octubre se presentan 22,851 eventos de descargas atmosféricas<sup>37</sup>, de los cuales en promedio 20,947 son descargas atmosféricas Nube-Tierra y este valor indica que un 91,7% del total de eventos presentados son Nube-Tierra mientras que el valor restantes son eventos nube – nube.

**Tabla 6. Promedio del total de eventos de descargas atmosféricas registradas en la región Caribe Colombiana.**

meses	eventos para un día promedio	Eventos Nube – Tierra para un día promedio	Relación promedio porcentual de eventos Nube-Tierra
oct-2011	22851	20947	91,7%
nov-2011	15501	14037	90,6%
dic-2011	4083	3736	91,5%
ene-2012	306	261	85,4%
feb-2012	638	497	78,0%
mar-2012	8169	6501	79,6%
abr-2012	27031	22609	83,6%
may-2012	47896	40531	84,6%
jun-2012	33956	28988	85,4%
jul-2012	39327	32607	82,9%
ago-2012	29151	26304	90,2%
sept-2012	37986	34164	89,9%

La Figura 35 ilustra un análisis comparativo de las descargas presentadas, en donde se observa un decremento al aproximarse a diciembre y nuevamente se incrementa conforme inician los meses de marzo, abril y junio. Este comportamiento se categoriza como polinómico de segundo orden y es probable que exista una relación respecto a los cambios climáticos que se presentan en la región Caribe Colombiana. Es decir las épocas de invierno se registran en la región durante los meses donde se registran el mayor número de descargas.

De la Figura 35, también se detallan las barras en color rojo como el total de eventos registrados y las barras en color azul hacen referencia a las descargas nube – tierra que

<sup>37</sup> Evento atmosférico se define como cualquier evento sea nube-nube, nube-tierra o intranubes registrado así como se define en el glosario de términos utilizados.

se presentan. Es decir que en su gran mayoría las descargas atmosféricas presentadas corresponden a descargas atmosféricas nube – tierra.

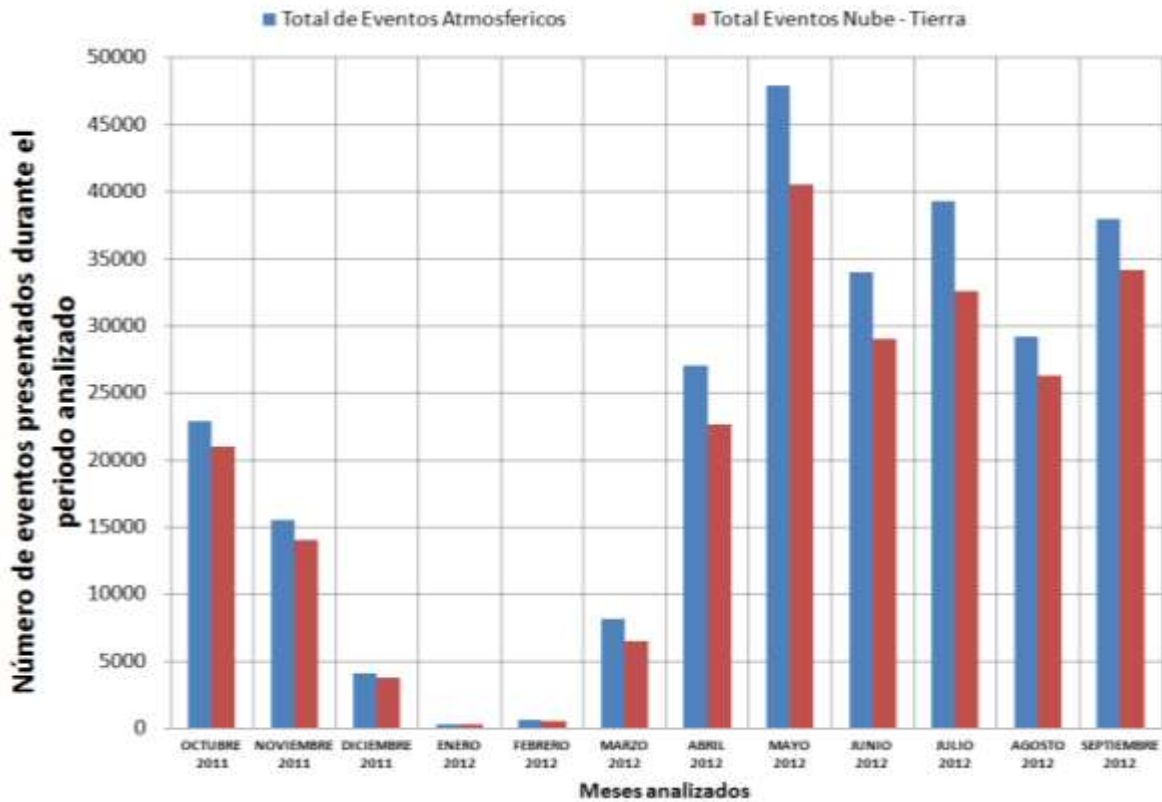


Figura 35. Promedio de descargas atmosféricas registradas en la región Caribe Colombiana en promedio para un día.

### 3.1.3. Comparación mensual de eventos atmosféricos.

Las figuras 36 y 37 presentan la relación de descargas a tierra presentadas durante los meses comprendidos entre Octubre de 2011 a Septiembre de 2012. En donde se detalla el comportamiento día a día de las descargas atmosféricas a tierra en función del porcentaje de eventos diarios registrados.

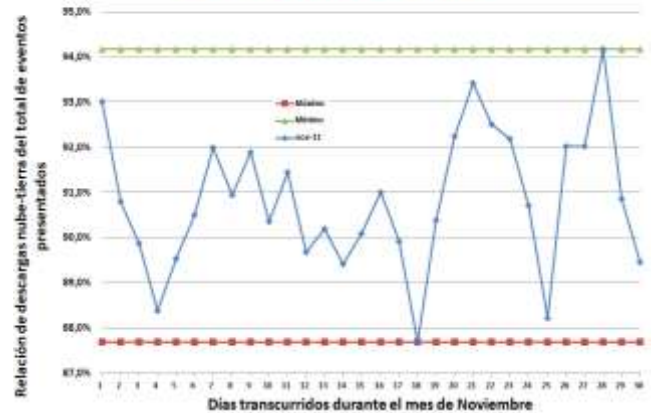
En la gran mayoría de los casos las descargas atmosféricas son un porcentaje por encima del 50% del total de eventos registrados como se detalla en los gráficos de comportamiento.

**RELACIÓN DE DESCARGAS A TIERRA PRESENTADAS EN EL MES DE OCTUBRE DE 2011**



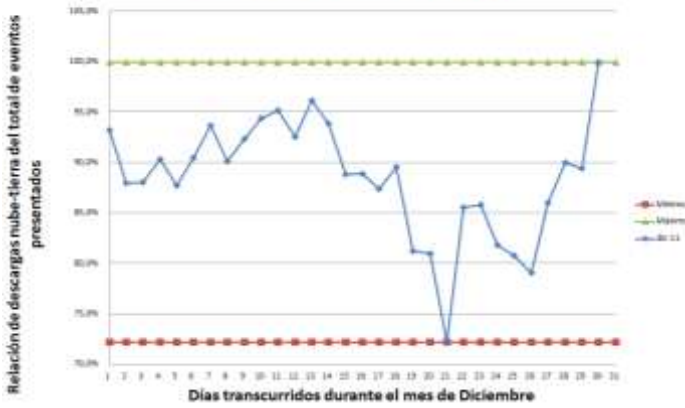
a.

**RELACIÓN DE DESCARGAS A TIERRA PRESENTADAS EN EL MES DE NOVIEMBRE DE 2011**



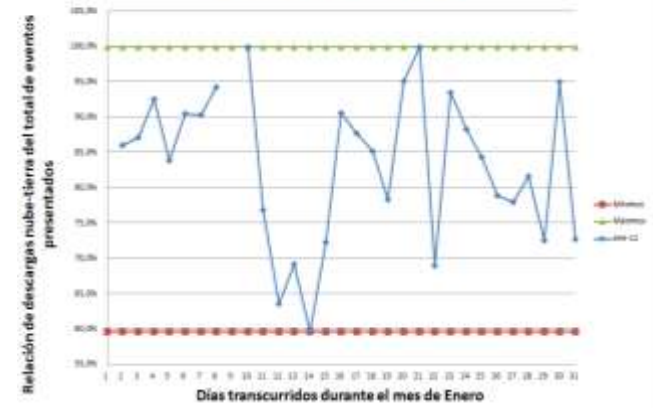
b.

**RELACIÓN DE DESCARGAS A TIERRA PRESENTADAS EN EL MES DE DICIEMBRE DE 2011**



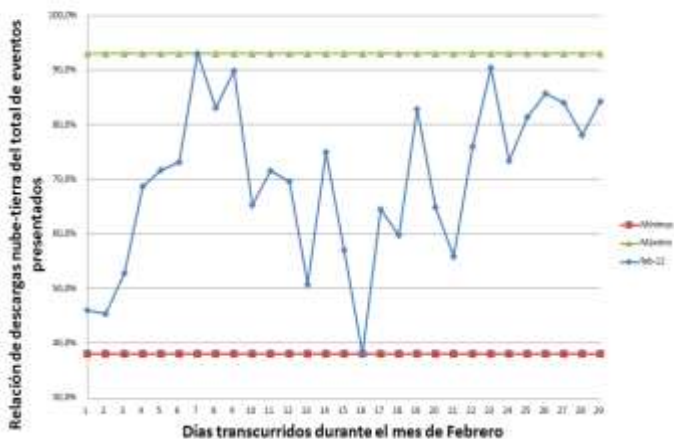
c.

**RELACIÓN DE DESCARGAS A TIERRA PRESENTADAS EN EL MES DE ENERO DE 2012**



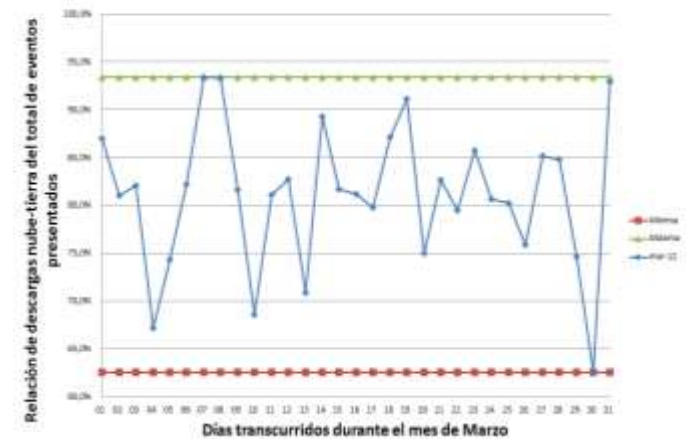
d.

**RELACIÓN DE DESCARGAS A TIERRA PRESENTADAS EN EL MES DE FEBRERO DE 2012**



e.

**RELACIÓN DE DESCARGAS A TIERRA PRESENTADAS EN EL MES DE MARZO DE 2012**



f.

Figura 36. Relación de descargas nube-tierra por días respecto al total de eventos registrados. a. Mes de Octubre de 2011. b. Mes de Noviembre de 2011. c. Mes de Diciembre de 2011. d. Mes de Enero de 2012. e. Mes de Febrero de 2012. f. Mes de Marzo de 2012.





a.



b.



c.



d.



e.



f.

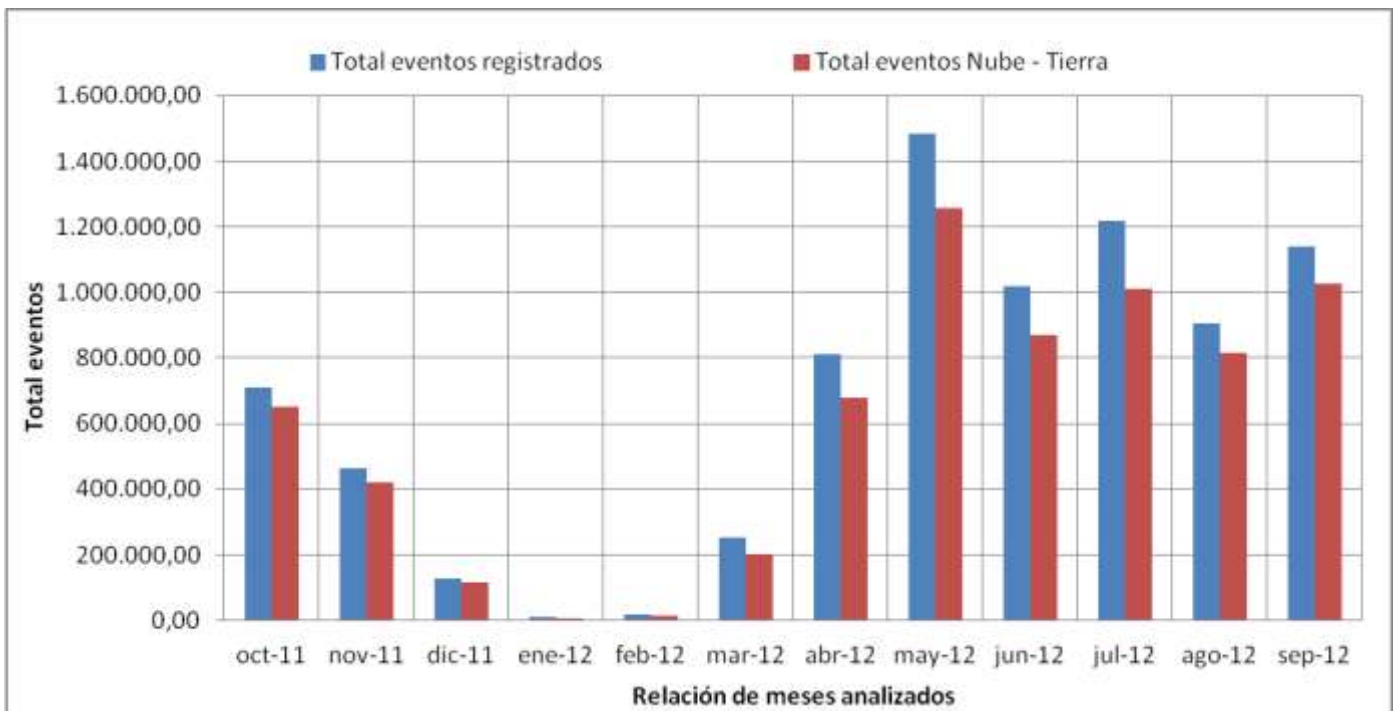
Figura 37. Relación de descargas nube-tierra por días respecto al total de eventos registrados. a. Mes de Abril de 2012. b. Mes de Mayo de 2012. c. Mes de Junio de 2012. d. Mes de Julio de 2012. e. Mes de Agosto de 2012. f. Mes de Septiembre de 2012.

### 3.1.4. Análisis total de eventos atmosféricos.

En esta sección se presentan el total de eventos registrados durante cada uno de los meses evaluados, al igual que el total de eventos de descargas Nube–tierra presentados. A diferencia de la Tabla 6, en la Tabla 7 se presentan los valores totales de eventos registrados mes a mes.

**Tabla 7. Total de eventos mensuales de descargas atmosféricas registradas en la región Caribe.**

Meses	Total de eventos mensual	Total de Eventos mensual Nube – Tierra	Relación porcentual del total de eventos mensual Nube-Tierra
oct-2011	708,375	649,371	91,7%
nov-2011	465,044	421,105	90,6%
dic-2011	126,576	115,804	91,5%
ene-2012	9,176	7,835	85,4%
feb-2012	18,488	14,414	78,0%
mar-2012	253,235	201,541	79,6%
abr-2012	810,938	631,517	83,6%
may-2012	1,484,781	1,256,456	84,6%
jun-2012	1,018,681	869.633,00	85,4%
jul-2012	1,219,218	1.010.803,00	82,9%
ago-2012	903,683	815.424,00	90,2%
sep-2012	1,139,585	1.024.926,00	89,9%



**Figura 38. Relación total de las descargas atmosféricas mensuales registradas en la región Caribe Colombiana.**

La Figura 38 corresponde al análisis de datos realizado para el total de eventos registrados en cada uno de los meses evaluados de acuerdo a la información suministrada en la tabla 8. Se puede identificar un comportamiento similar al presentado en la figura 35. Siendo los meses de mayor actividad atmosférica los relacionados por el IDEAM como meses de mayor precipitación atmosféricas.

### 3.1.5. Conclusiones y comentarios de la información analizada.

Como se mencionó anteriormente, la Figura 35 y la Figura 38 al igual que las Tablas 7 y 8, a pesar de presentar análisis diferentes de los datos; es decir mientras la figura 35 y la tabla 7, presentan una relación promedio de cuantos eventos se producen diariamente en un día de un determinado mes, la Figura 38 y la Tabla 8 presentan los totales de los eventos registrados por meses durante el periodo analizado, no obstante existe una relación en los comportamientos arrojados por los gráficos analizados y contrastando finalmente el porcentaje de descargas atmosféricas registradas en las tablas 7 y 8, se concluye que los datos promedios de un día están relacionados con el total de eventos registrados en un mes.

Lo anterior se evidencia con los resultados comparativos que presenta la figura 39, en donde los porcentajes de comportamiento analizados de manera independiente arrojan un resultado similar en porcentajes para los meses analizados y el análisis de dispersión que refleja la figura 39 solo resulta diferente para el mes de Febrero de 2012. El mes de Febrero de manera particular presenta el menor rango de eventos presentados durante el periodo analizado.

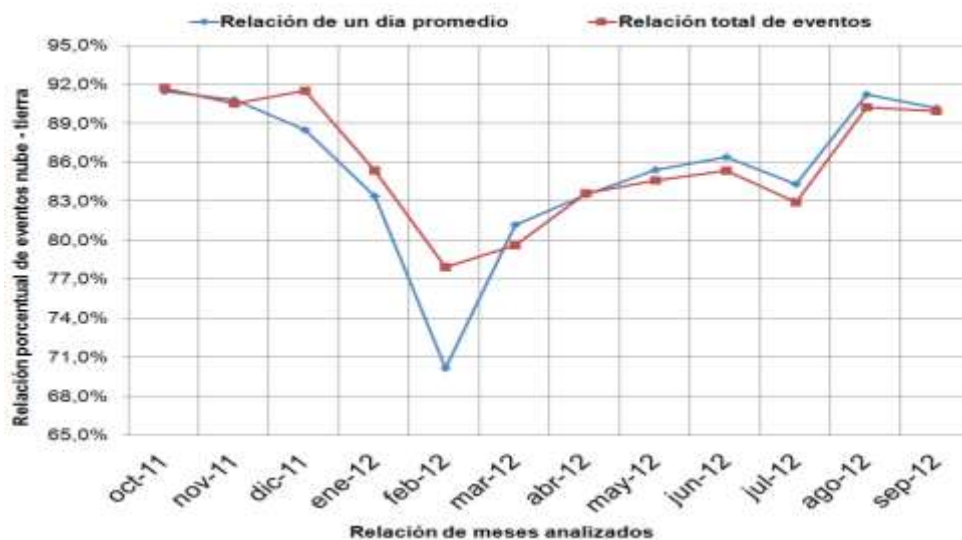
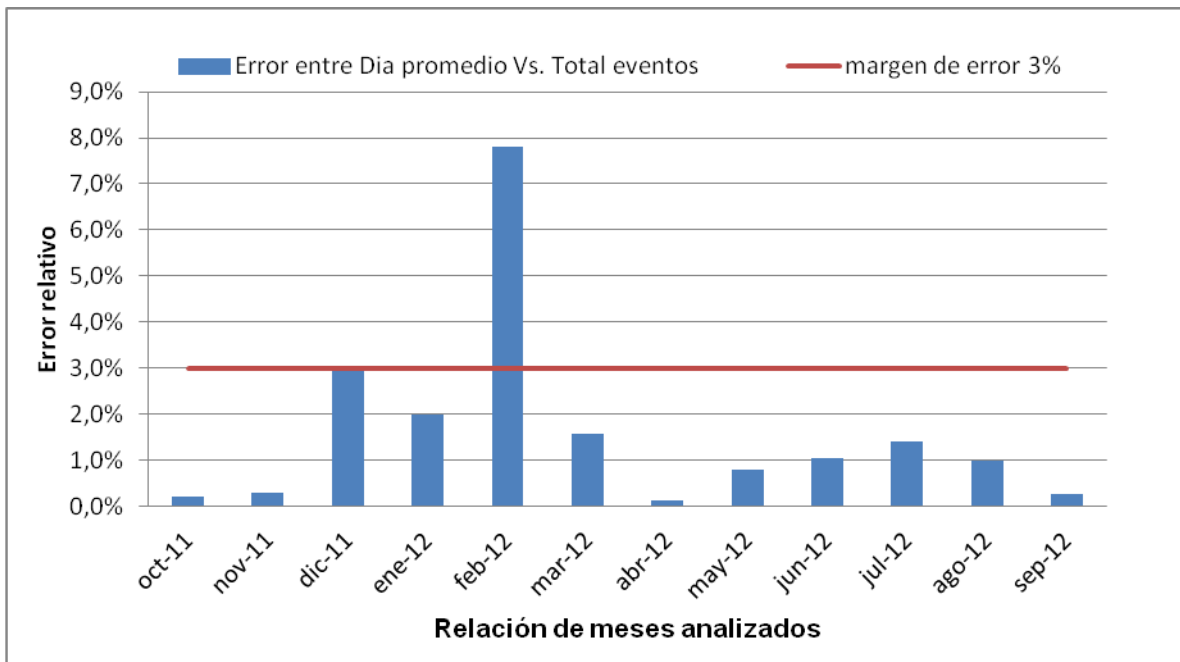


Figura 39. Análisis comparativo de eventos nube-tierra registrados respecto a un día promedio y según el total de eventos registrados en un mes.

La figura 40, ilustra el margen de error que presentan los resultados presentados en la figura 39. Por lo anterior es posible afirmar que el número de eventos que se presentan en cada mes puede ser representado con datos históricos de referencia y que para meses diferentes al mes de enero se puede tener una mayor precisión en su representación. Esta afirmación requiere de un seguimiento continuo a los eventos presentados y se propone un seguimiento de por lo menos cinco años a fin de analizar el comportamiento mes a mes y lograr indagar sobre el comportamiento de estas descargas que pueden presentarse en la región Caribe Colombiana.



**Figura 40. Comparación del error relativo registrado entre el porcentaje de eventos de un día promedio Vs. El total de eventos registrados para un mes de análisis.**

Se resalta la posibilidad de evaluar de manera independiente temporadas con alta precipitación en distintas épocas del año, en donde se debe realizar una observación constante y separada de los meses del año en donde la presencia de precipitaciones sean de propiedades similares a fin de caracterizar estos eventos, debido a que como se ilustró en la figura 40, es probable que los comportamientos de los eventos varíen en función de la presencia o ausencia de precipitaciones en esta zona del territorio Colombiano.



A continuación se plantea una primera ecuación que defina en promedio el total de posibles descargas Nube – Tierra registradas, basadas en el total de eventos presentados.

(Ec. 18)

Donde,

- **NDDNT**: Número de descargas nube tierra
- **TER**: Total de eventos atmosféricos registrados
- **0,856**: Valor porcentual que relaciona el promedio de descargas a tierra registradas Vs. El total de eventos.

La anterior ecuación indica que en promedio el 85,6% de los eventos de descargas atmosféricas registrados corresponden a descargas nube – tierra. Se propone que esta ecuación sea aplicada para comparar los eventos registrados para el periodo 2012 – 2013 a fin de validar y/o lograr una relación más precisa que permita definir si el porcentaje de eventos nube tierra sobre la región Caribe corresponde a esta proporción.

Hasta la fecha los trabajos previos no han establecido una relación entre el total de eventos registrados respecto a los posibles eventos nube – tierra, por lo que la relación anterior resulta innovadora debido a que busca relacionar la actividad atmosférica total con los posibles eventos nube tierra que se presenten. Se propone que la actividad atmosférica en la región Caribe se continúe monitoreando para validar este comportamiento y establecer una ecuación matemática que lo logre representar.

### 3.2. Polaridad de la descarga

De acuerdo a los datos e información recopilada de la red LINET, durante un año de medición partiendo desde el primero de Octubre de 2011 hasta el 30 de Septiembre de 2012 para la región Caribe Colombiana, se presentan los siguientes resultados obtenidos del análisis realizado a los datos.

De acuerdo a resultados analizados en investigaciones previas, para este caso se analizaron los casos de polaridad desde dos perspectivas: Análisis por Strokes, en donde se considera cada Stroke como un evento independiente que produce una contribución de

descarga que debe ser soportada en determinado caso por el sistema de protección respectivo.

Mientras el otro caso corresponde al análisis de descargas por flashes, los cuales consideran a una descarga como un solo evento, en donde la mayor amplitud de la descarga es el referente asociado para caracterizar el evento registrado. A continuación se presentan ambos análisis.

### 3.2.1. Análisis de polaridad por strokes.

La figura 34 presenta el porcentaje de polaridades tanto positivas como negativas para toda la región Caribe Colombiana. En donde se presentan un 75,6 % para eventos con polaridad negativa y un 24,4% de eventos registrados con polaridad positiva.

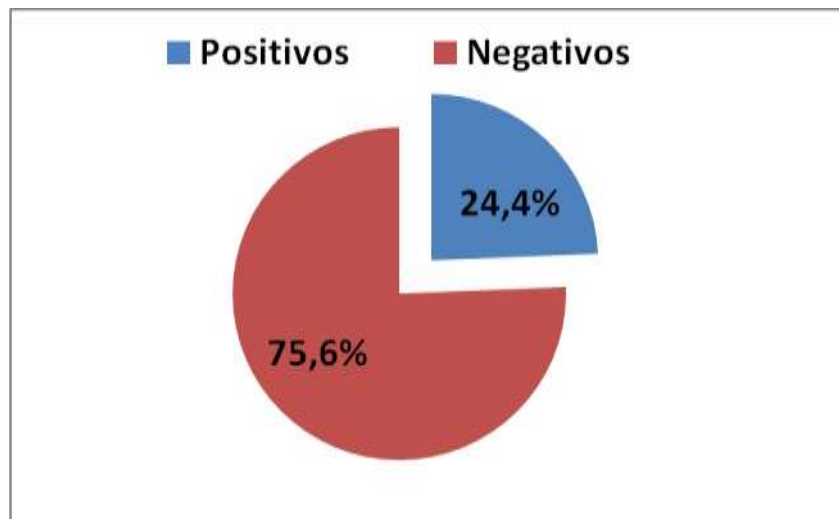


Figura 41. Porcentaje de strokes con polaridad positiva y negativa para la Región Caribe Colombiana entre Octubre de 2011 a Septiembre de 2012.

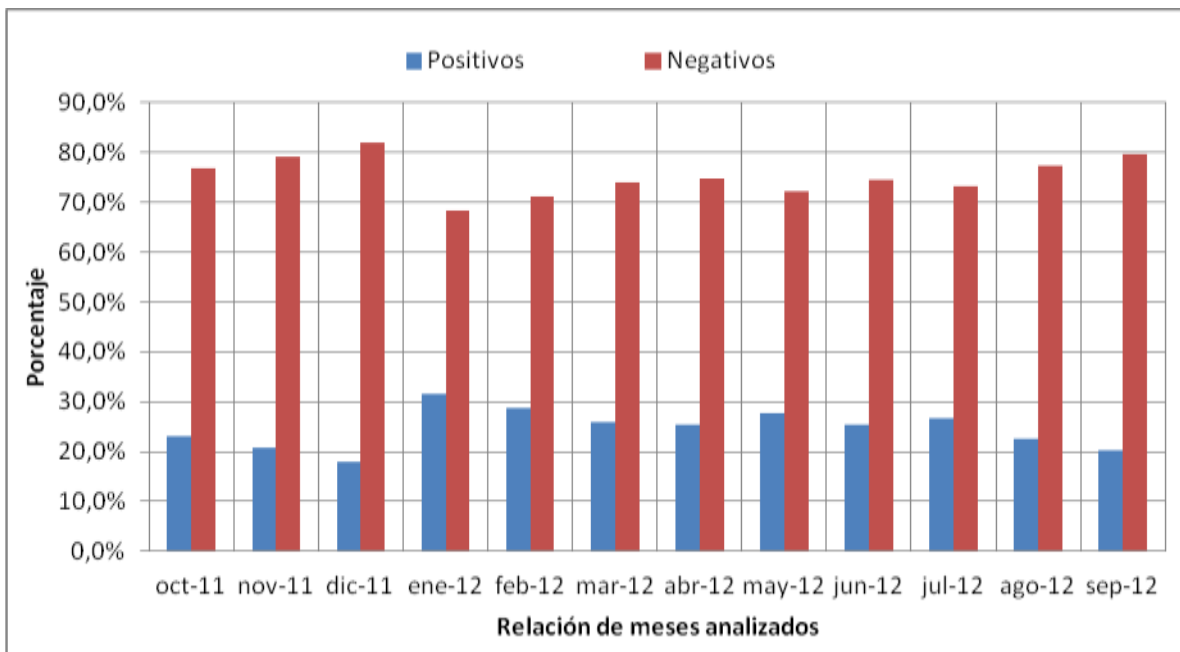
Al analizar la información de manera general, esta concuerda con investigaciones realizadas previamente, en donde se señala para toda Colombia un porcentaje de eventos con polaridad positiva del 32,72%. De esta manera se valida lo expresado por Younes en sus investigaciones respecto a que las descargas atmosféricas en Colombia, tiene un comportamiento diferente a zonas localizadas en latitudes superiores a los trópicos. [15]

Para el caso de los resultados obtenidos durante el desarrollo de esta investigación, se puede afirmar lo anterior para el caso de la región Caribe Colombiana, lo cual concuerda

con un comportamiento diferente a la información en otras latitudes. Las cuales establecen una relación porcentual que varía entre el 90% y el 95% para descargas con polaridad positiva y solo entre el 10% al 5% para descargas con polaridad positiva.

Los resultados obtenidos difieren también de los resultados obtenidos por Younes para el territorio Colombiano y esto es atribuible a las variaciones registradas en la orografía Colombiana.

La figura 33 presenta el comportamiento de las descargas mes a mes para la región Caribe. De los resultados obtenidos durante el análisis mes a mes, se resalta que el porcentaje de descargas positivas y negativas se mantiene en un rango de comportamiento similar al total de datos analizados en la figura 32. Esto ratifica el comportamiento de la polaridad de las descargas para esta región del país y como futura investigación se propone un análisis exhaustivo de estos eventos a fin de identificar los sitios donde acontecen estos eventos para determinar el origen de los mismos e identificar por que se presentan.



**Figura 42. Porcentaje de polaridad positiva y negativa por meses para la Región Caribe Colombiana entre Octubre de 2011 a Septiembre de 2012.**

### 3.2.2. Análisis de polaridad por flashes.

El sistema de información utilizado permitió la identificación y categorización de descargas positivas o negativas en función del número de “*flashes*” o eventos. El comportamiento de las descargas se ilustra en la siguiente figura.

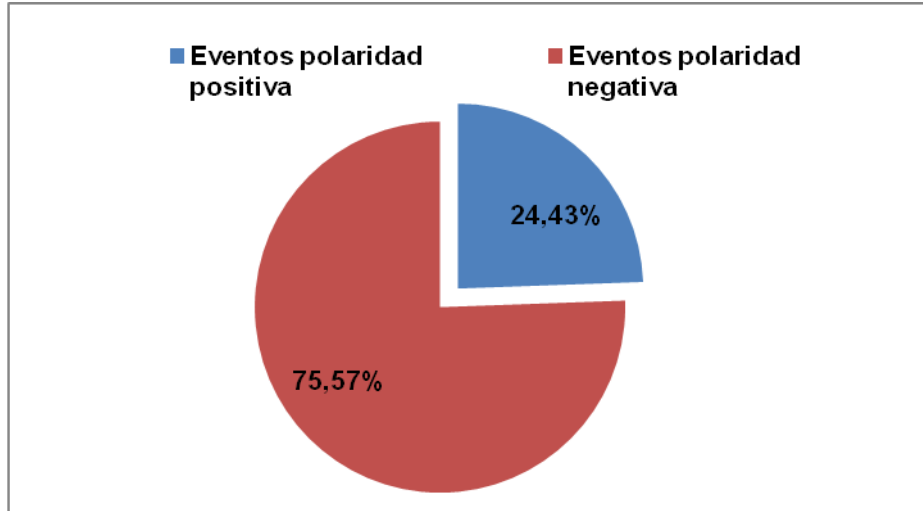


Figura 43. Porcentaje de “*flashes*” o eventos con polaridad positiva y negativa para la Región Caribe Colombiana entre Octubre de 2011 a Septiembre de 2012.

El análisis utilizado para el caso de flashes resultó similar al análisis independiente del número de strokes. Y con valores porcentuales para polaridad positiva del 24,43% mientras que para polaridad negativa del 75,57%. Se mantiene lo afirmado para el caso colombiano, en donde el valor de descargas con polaridad positiva es muy lejano del 10% con respecto al referente internacional para descargas atmosféricas a tierra. La figura 44 presenta el comportamiento mensual del porcentaje de descargas analizado para la región Caribe Colombiana.

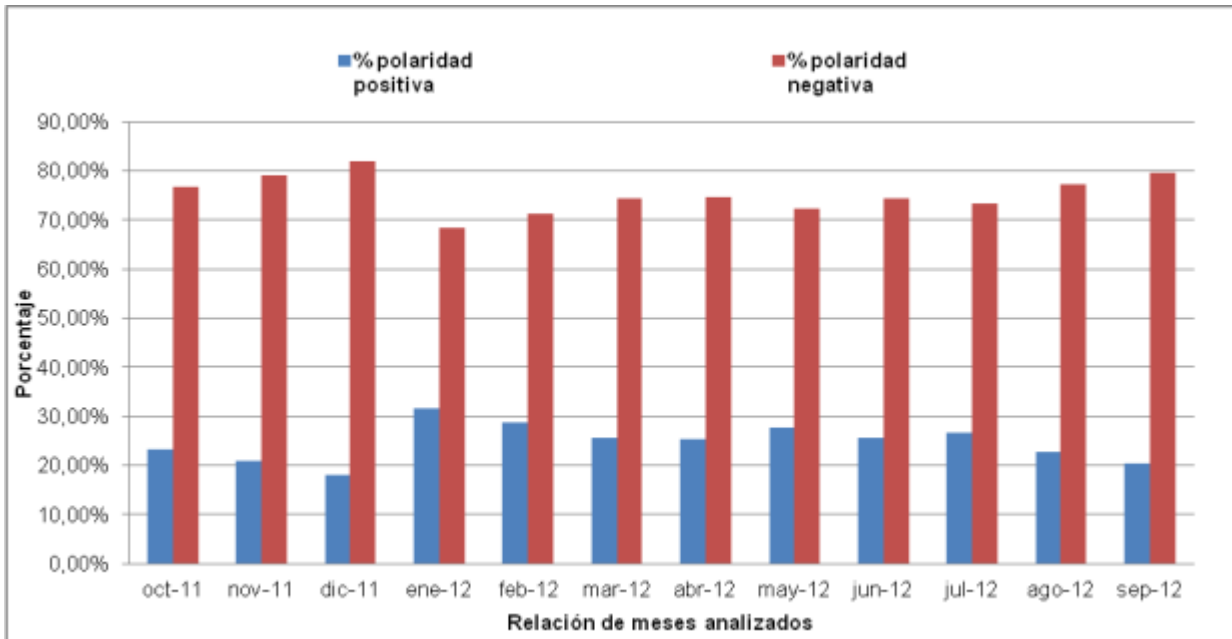


Figura 44. Porcentaje de flashes con polaridad positiva y negativa por meses para la Región Caribe Colombiana entre Octubre de 2011 a Septiembre de 2012.

### 3.3. Relación de Strokes

La relación del número de *strokes* dentro de cada evento registrado presentó resultados atípicos al panorama nacional e internacional debido a que se registraron en un 99,67% eventos atmosféricos con una única descarga de retorno dentro del mismo canal ionizado por el evento. La figura 45 ilustra el comportamiento anual de las descargas para los meses analizados, en donde se evidencia un comportamiento similar y superior al 99,5% para todos los meses.

Para establecer la relación de número de Strokes que tiene un Flash, se partió de identificar la posición longitudinal y latitudinal de los strokes registrados y si este se encontraba en un rango de proximidad inferior a un 3% de error en 2D de acuerdo con sus puntos de localización, se consideraba como parte del evento. De igual forma se debía cumplir que el tiempo de ocurrencia de este no excediera un segundo. Este análisis se realizó partiendo del hecho de que LINET almacena la información de Strokes en su base de datos [42], [50].

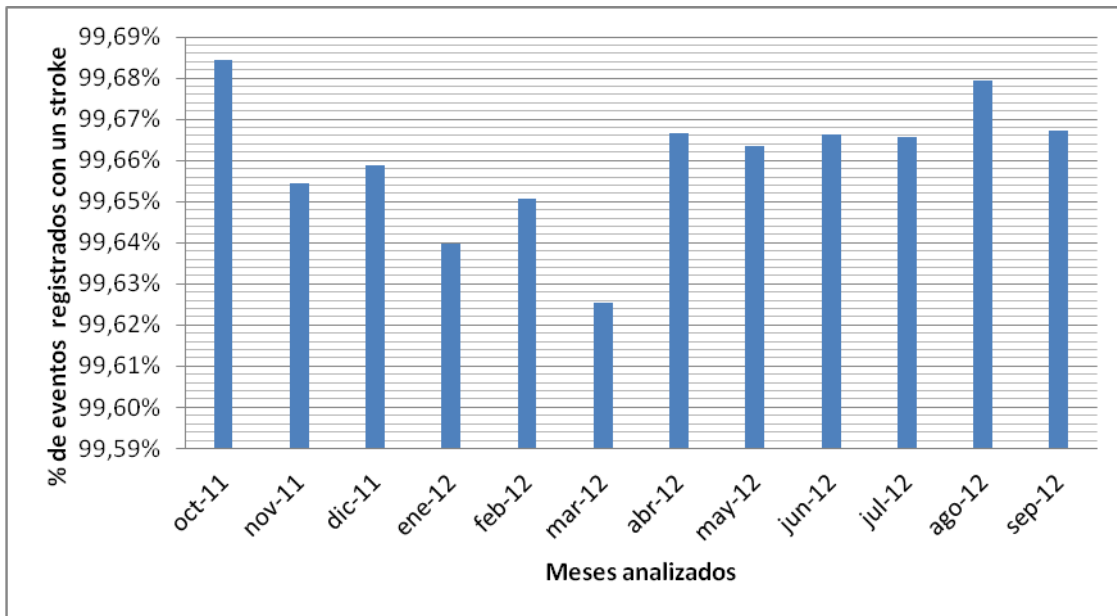


Figura 45. Relación porcentual durante los meses analizados del total de eventos con un solo stroke como corriente de retorno.

Las figuras 46 y 47 presentan el comportamiento de los eventos registrados que poseen más de un stroke. Se evidencia que se registraron eventos de hasta 10 strokes.

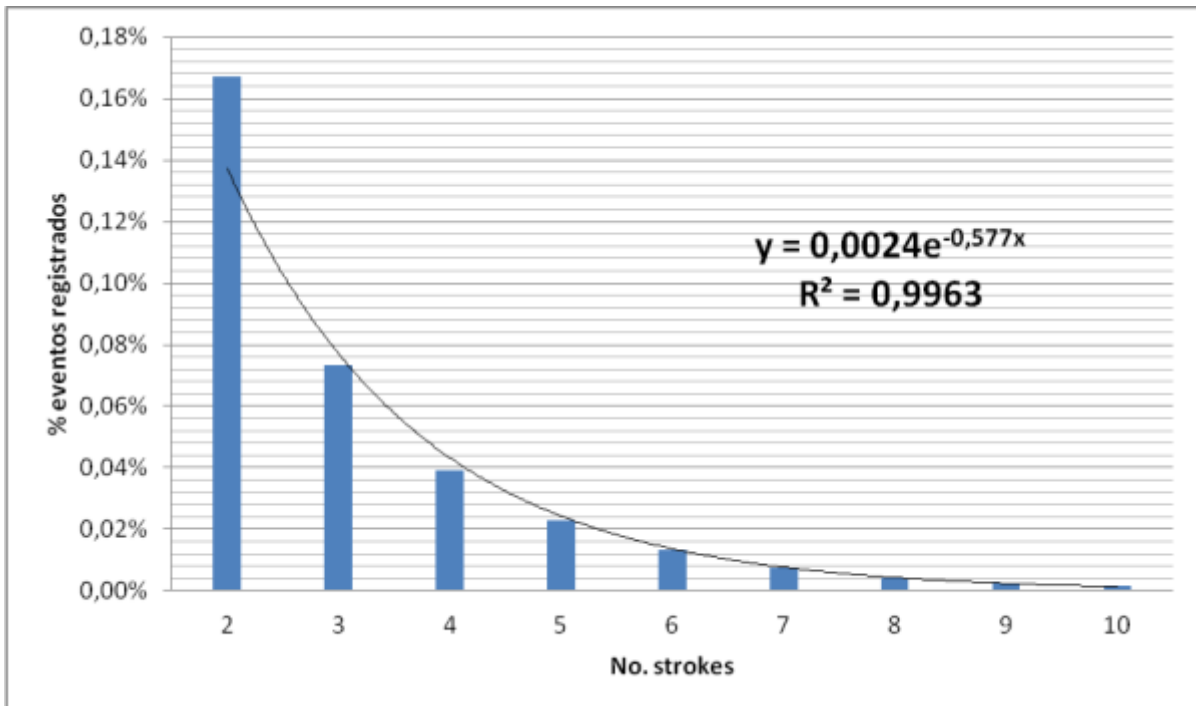


Figura 46. Eventos registrados con más de un stroke dentro del canal de descarga.

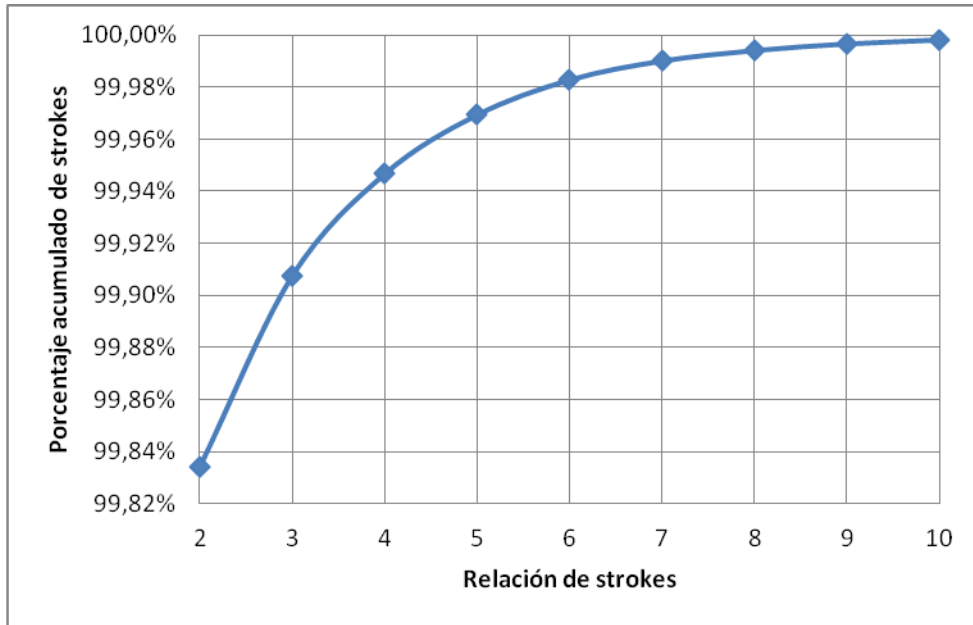


Figura 47. Distribución acumulada de strokes entre el periodo de análisis (01 de Octubre de 2011 – 30 Septiembre de 2012)

Debido al anterior resultado se presentó el siguiente patrón de comportamiento aplicando un análisis de dispersión entre Flashes Vs. Strokes a fin de identificar la relación entre ellos. Se trazaron mes a mes los resultados obtenidos y se llega a obtener una correlación entre Flashes y Strokes del 99,58%. La figura 48 ilustra el análisis señalado anteriormente.

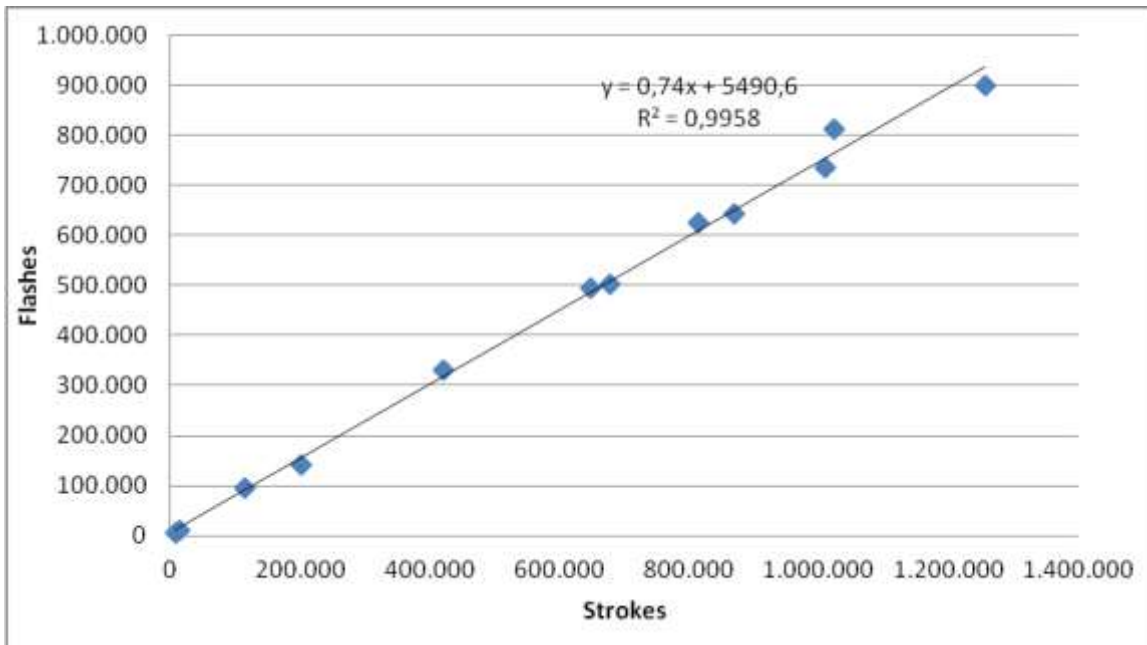


Figura 48. Relación de total de Flashes Vs. total de Strokes entre Octubre de 2011 y Septiembre de 2012

Este resultado para el total de strokes y flashes detectados fue validado cuidadosamente durante el desarrollo de la investigación, sin embargo no hay errores en el proceso de programación y categorización de la información, lo que lleva a dos posibles situaciones.

La primera plantea que el sistema únicamente almacena el mayor de los *flashes* registrados y tomando como referente los sistemas basados en detección de dirección, el sensor posee un tiempo de no operación que lo inhibe de detectar posibles descargas subsecuentes y almacena únicamente la corriente de mayor valor registrada durante el tiempo de ocurrencia del evento. Sin embargo esto se contradice con la presencia de descargas que poseen hasta diez strokes registrados como se presentó en la figura 46. Sin embargo estos eventos son pocos por lo que es recomendable validar para futuras investigaciones si efectivamente el sistema únicamente interpreta flashes. En este caso este valor de correlación puede estar asociado con la precisión del sistema en el proceso de detección.

El segundo caso que se plantea es que este sea el comportamiento de las descargas en la región Caribe colombiana y que este comportamiento sea entonces un factor característico de este área del planeta y del país en donde la actividad atmosférica registre en su gran mayoría descargas con un único stroke. Por lo anterior se recomienda evaluar la información obtenida durante más periodos de observación anual a fin de soportar lo anteriormente señalado.

### **3.4. Amplitud de la corriente.**

A continuación se presenta uno de los parámetros que tiene mayor relevancia para la aplicación de ingeniería. La presente sección se subdivide en tres etapas. La primera parte presenta las descargas atmosféricas con polaridad positiva, posteriormente las amplitudes de descargas con polaridad negativa y finalmente se analiza el total de descargas considerando únicamente su magnitud y no su polaridad.

El sistema LINET estima la medición de amplitud de descarga atmosférica de manera indirecta a través de la localización de la descarga mediante el sistema TOA (Time of arrival), el cual es un sistema de medición indirecto. Estos resultados deben ser validados por sistemas de medición directo para asegurar un comportamiento definitivo de estos



eventos en la región Caribe, al igual que se requiere un periodo mayor de análisis y continuo a fin de validar su comportamiento.

### 3.4.1. Comparación de amplitudes para polaridad positiva.

A Continuación se presenta un análisis independiente de corrientes de acuerdo al comportamiento de flashes y strokes.

#### 3.4.1.1. Análisis de corriente considerando corrientes por cada *stroke*

Como se presentó en la sección de polaridad. En el periodo comprendido entre el primero de Octubre de 2011 y el 30 de Septiembre de 2012 se registraron un total de 1, 721,089 strokes sobre la región Caribe colombiana. Lo que corresponde a un 24,4% del total de eventos registrados. La siguiente tabla resume la información estadística de los strokes registrados tomando como referencia los meses durante los cuales se analizó la información.

**Tabla 8. Resumen estadístico de las magnitudes de corriente por stroke**

Periodos analizados	Total (No. de eventos)	Media (kA)	Mediana (kA)	Moda (kA)	Desviación Estándar (kA)	Máximo (kA)	Mínimo (kA)
oct-2011	149.890	20,82	17,80	10,60	14,89	327,3	2,3
nov-2011	87.783	19,93	17,50	12,20	12,87	246,9	2,8
dic-2011	20.896	19,41	16,80	13,10	12,58	242,4	3,3
ene-2012	2.476	14,08	11,50	9,40	8,26	88,5	3,5
feb-2012	4.145	14,28	11,10	7,90	11,41	209,4	3,0
mar-2012	52.431	12,28	9,60	8,00	10,70	191,2	2,3
abr-2012	171.748	13,70	10,90	8,30	9,67	284,1	2,0
may-2012	348.138	13,20	16,00	7,90	8,93	356,7	2,0
jun-2012	221.738	14,21	11,30	8,70	9,62	312,2	2,0
jul-2012	269.648	14,29	11,60	8,80	9,04	267,9	2,5
ago-2012	185.075	16,92	14,10	10,00	10,63	446,9	2,7
sep-2012	207.121	16,57	13,60	9,60	10,87	253,5	2,5
<b>Totales</b>	<b>1.721.089</b>	<b>15,36</b>	<b>12,53</b>	<b>10,49</b>	<b>10,87</b>	<b>446,9</b>	<b>2,0</b>

La figura 49 ilustra la distribución porcentual de los strokes con polaridad positiva respecto a su magnitud de corriente registrada. La figura 50 presenta la curva de distribución acumulada.

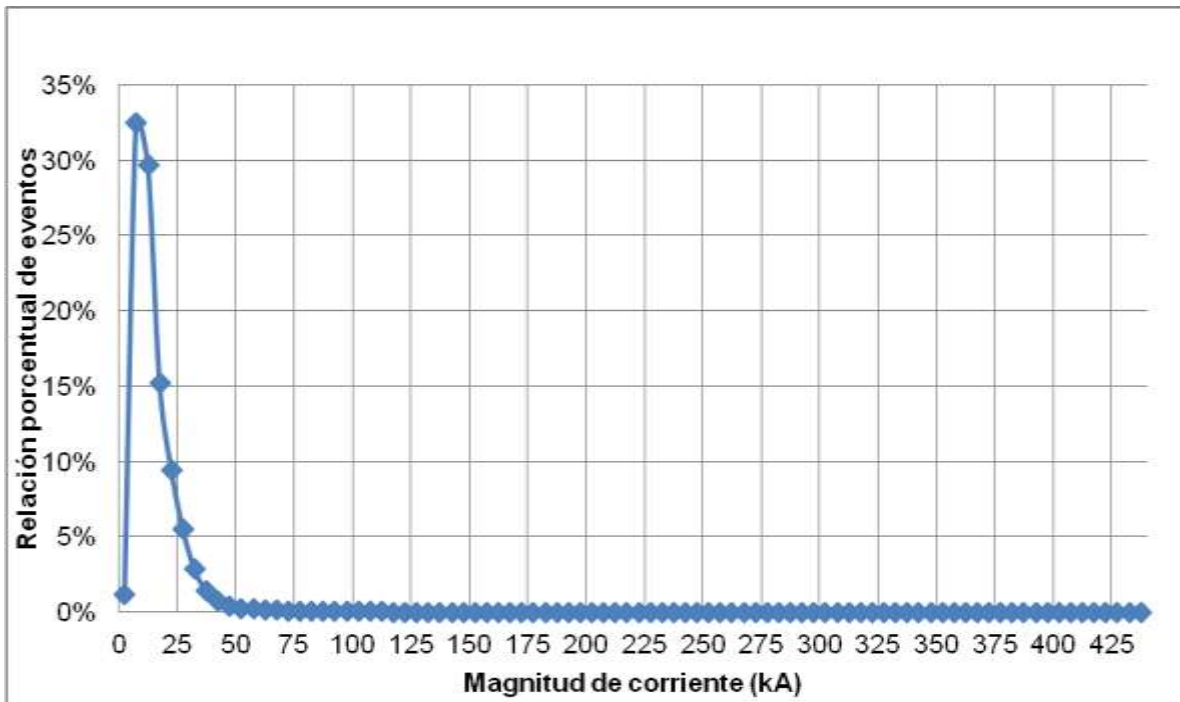


Figura 49. Distribución estadística de strokes positivos registrados respecto a su magnitud.

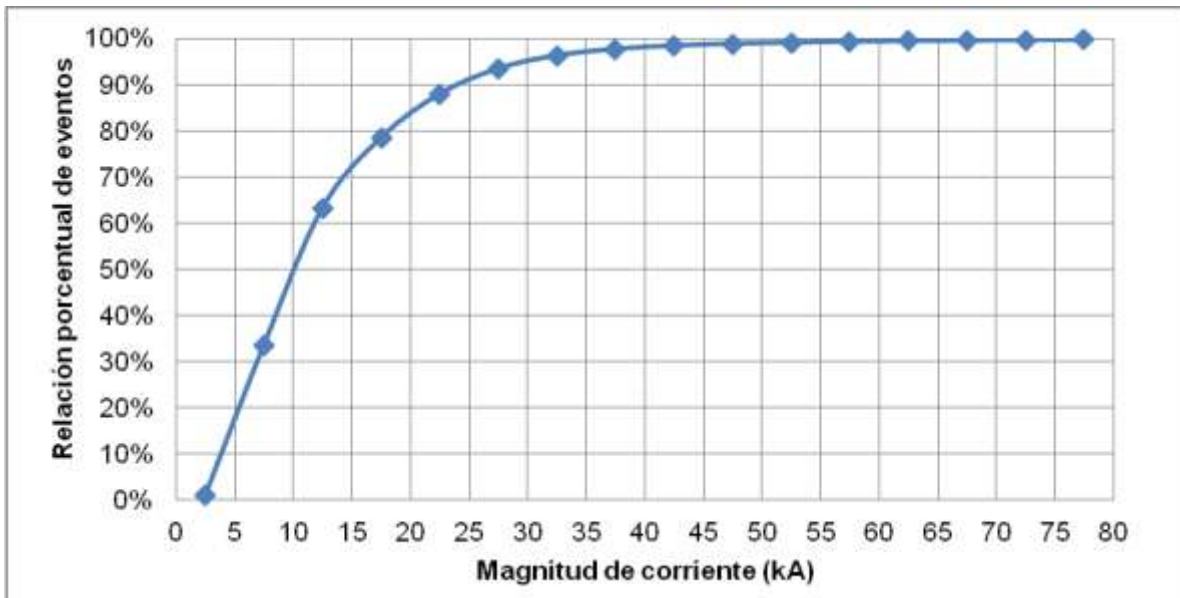


Figura 50. Curva de distribución acumulada de strokes respecto a su magnitud

A continuación se presentan las siguientes consideraciones, las cuales son producto de las observaciones realizadas:

- Se evidencian valores elevados de corriente, sin embargo son muy pocos los eventos registrados de esta magnitud. El valor más elevado se registró durante el mes de agosto del año 2012 Y fue de 446,9 kA.
- Se registraron descargas atmosféricas con polaridad positiva desde los 2,0 kA.
- El valor medio de corriente entre los meses observados varía entre los 12 kA y los 21 kA y el valor medio del total de strokes con polaridad positiva es de 15,36 kA.
- El valor mediana es de 12,53 kA. Es decir que el 50% de los datos se encuentran por encima de este valor y la moda se estima en proximidad a 10,49 kA. De acuerdo a los datos analizados existe una probabilidad del 62,12% de que el stroke de descarga con polaridad positiva sea entre el rango de 5kA a 15 kA.
- Se estima que los strokes de polaridad positiva, varíen en un rango de 10,87 kA como lo establece la desviación estándar, resaltando la presencia de eventos que superan los 400 kA pero que no son muy comunes de presentarse.

#### 3.4.1.2. Análisis de corriente considerando corrientes por cada *flash*

El análisis realizado para flashes es muy similar al efectuado para strokes. El comportamiento resulta muy similar debido a como se mencionó en la sección 3,3 (relacionaron los strokes) con un 99,67% de ocurrencia de Flashes con un único stroke. A continuación se relaciona la información estadística realizada a las corrientes para este caso.

**Tabla 9. Resumen estadístico de las magnitudes de corriente por flashes.**

<b>Media</b>	15,37
<b>Mediana</b>	10,87
<b>Moda</b>	10,48
<b>Desviación Estándar</b>	10,87
<b>Máximo</b>	446,9
<b>Mínimo</b>	2,0
<b>Total de eventos</b>	1,714,765

La figura 51 ilustra la distribución porcentual de los flashes con polaridad positiva respecto a su magnitud de corriente registrada. La figura 52 presenta la curva de distribución acumulada.

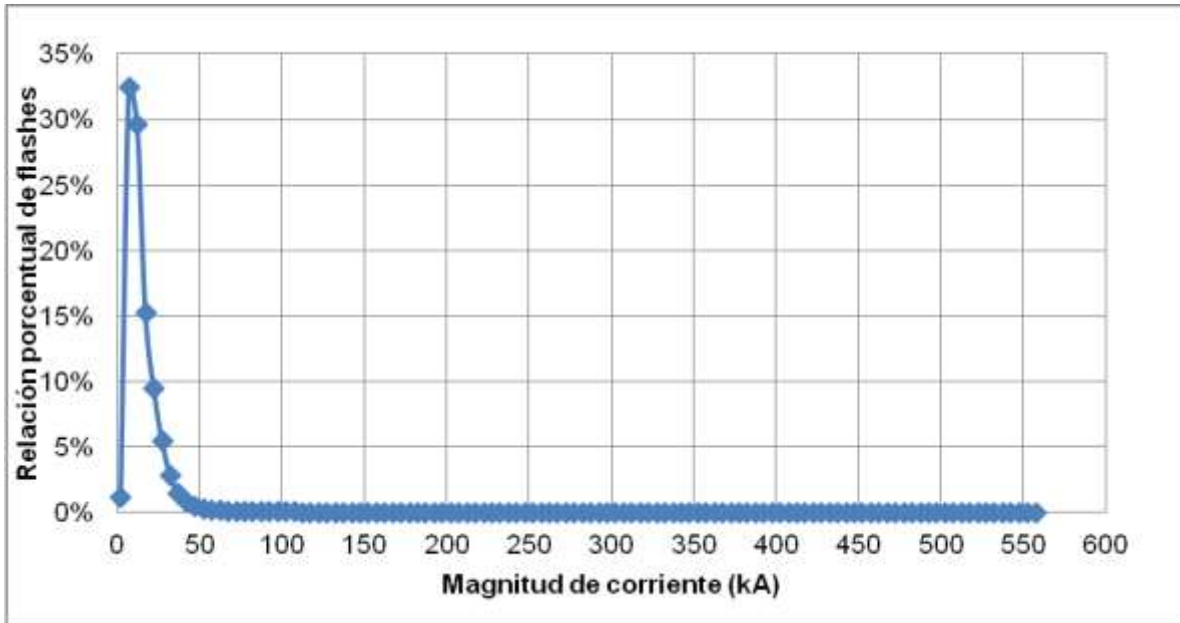


Figura 51. Distribución estadística de flashes positivos registrados respecto a su magnitud.

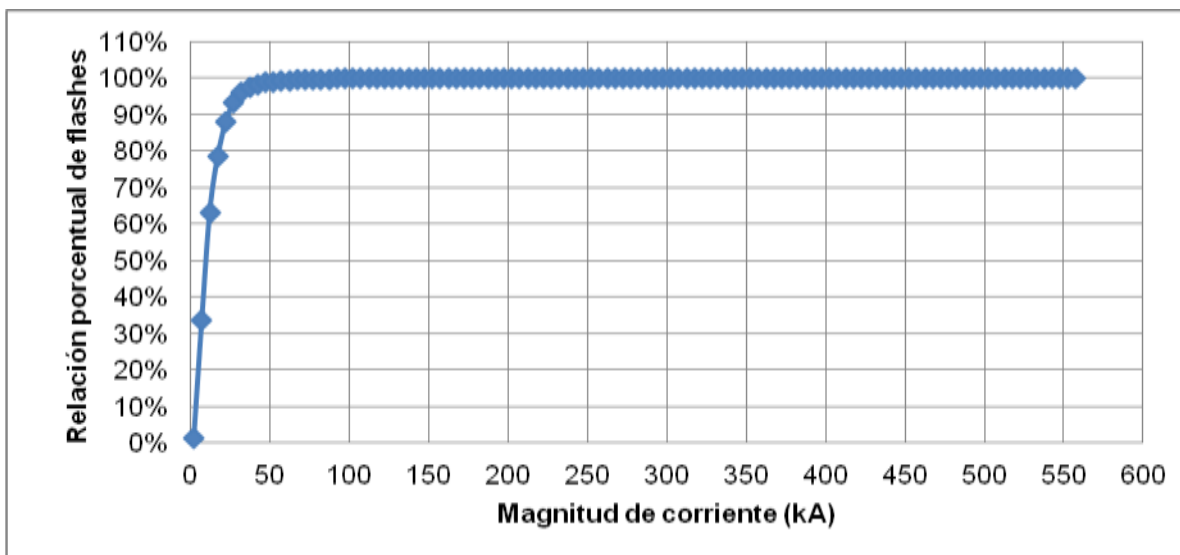


Figura 52. Curva de distribución acumulada de flashes respecto a su magnitud.

De acuerdo al comportamiento observado de los flashes analizados, las características de comportamiento son similares al realizado para strokes. Los valores de la media, varianza, desviación estándar, máximos, mínimos, media y moda son muy semejantes.

### 3.4.2. Comparación de amplitudes para polaridad negativa.

A Continuación se presenta un análisis independiente de corrientes de acuerdo al comportamiento de flashes y strokes.

#### 3.4.2.1. Análisis de corriente considerando corrientes por cada *stroke*

En el periodo comprendido entre el primero de Octubre de 2011 y el 30 de Septiembre de 2012 se registraron un total de 5, 344,622 strokes sobre la región Caribe colombiana. Lo que corresponde a un 75,6% del total de eventos registrados. La siguiente tabla resume la información estadística de los strokes registrados tomando como referencia los meses durante los cuales se analizó la información.

**Tabla 10. Resumen estadístico de las magnitudes de corriente por stroke.**

Periodos analizados	Total (No. de eventos)	Media (kA)	Mediana (kA)	Moda (kA)	Desviación Estándar (kA)	Máximo (kA)	Mínimo (kA)
oct-2011	499.481	27,9	22,2	17,7	20,3	357,5	2,7
nov-2011	333.322	30,6	23,6	19,5	23,6	554,3	3,2
dic-2011	94.908	31,3	24,5	20,5	23,6	344,2	4,6
ene-2012	5.359	23,6	17,4	13,0	20,8	320,6	3,9
feb-2012	10.269	21,3	16,2	11,5	17,1	249,4	3,8
mar-2012	149.226	17,2	13,7	10,1	11,6	236,0	2,6
abr-2012	506.535	19,9	16,1	11,3	13,6	283,2	2,3
may-2012	908.318	20,2	10,6	10,3	14,7	334,4	2,2
jun-2012	647.895	21,9	17,2	11,2	16,5	425,5	3,1
jul-2012	741.155	21,5	16,4	11,3	16,5	381,1	2,9
ago-2012	630.349	24,7	19,7	15,5	17,5	337,4	2,9
sep-2012	817.805	24,7	20,3	15,6	16,1	375,2	3,5
<b>Totales</b>	<b>5.344.622</b>	<b>23,2</b>	<b>18,1</b>	<b>11,86</b>	<b>17,36</b>	<b>554,3</b>	<b>2,2</b>

La figura 53 ilustra la distribución porcentual de los strokes con polaridad positiva respecto a su magnitud de corriente registrada. La figura 54 presenta la curva de distribución acumulada.

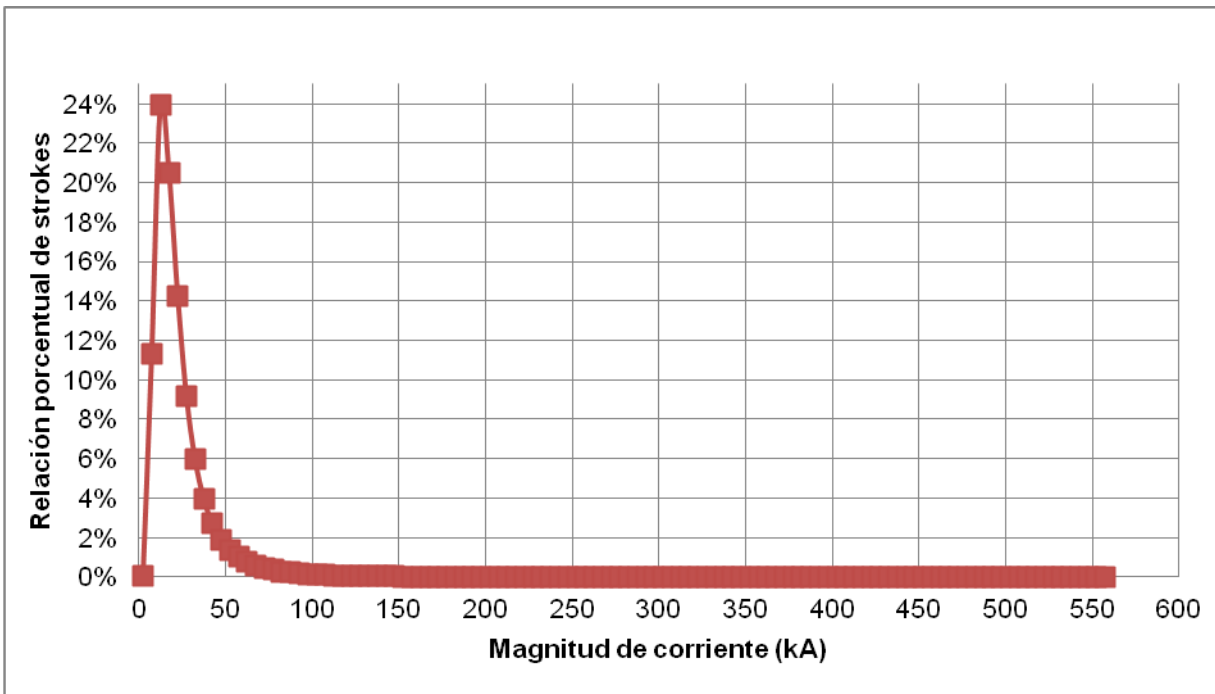


Figura 53. Distribución estadística de strokes negativos registrados respecto a su magnitud.

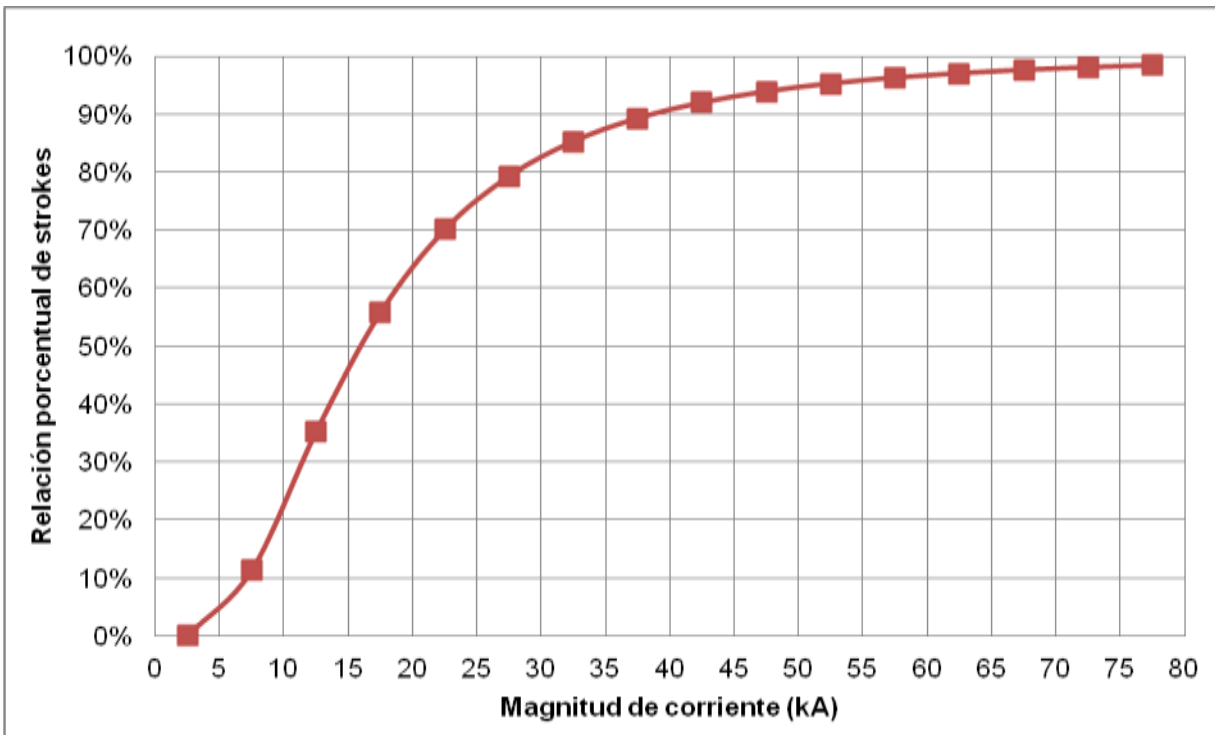


Figura 54. Curva de distribución acumulada de strokes respecto a su magnitud.

A continuación se presentan las siguientes consideraciones, las cuales son producto de las observaciones realizadas:

- Se evidencian valores elevados de corriente, sin embargo son muy pocos los eventos registrados de esta magnitud. El valor más elevado se registró durante el mes de noviembre del año 2011 Y fue de 554,3 kA.
- Se registraron descargas atmosféricas con polaridad negativa desde los 2,2 kA.
- El valor medio del total de strokes con polaridad negativa es de 23,2 kA.
- El valor mediana es de 18,1 kA. Es decir que el 50% de los datos se encuentran por encima de este valor y la moda se estima en proximidad a 11,86 kA. De acuerdo a los datos analizados existe una probabilidad del 85,25% de que el stroke de descarga con polaridad negativa sea entre el rango de 2,2kA a 35 kA.
- Se estima que los strokes de polaridad negativa, varíen en un rango de 17,36 kA como lo establece la desviación estándar, resaltando la presencia de eventos que superan los 500 kA pero que no son muy comunes de presentarse.

#### 3.4.2.2. Análisis de corriente considerando corrientes por cada *flash*

El análisis realizado para flashes es muy similar al efectuado para strokes. El comportamiento resulta muy similar debido a como se mencionó en la sección 3,3 (relacionaron los strokes) con un 99,67% de ocurrencia de Flashes con un único stroke. A continuación se relaciona la información estadística realizada a las corrientes para este caso.

**Tabla 11. Resumen estadístico de las magnitudes de corriente por flashes.**

<b>Media</b>	23,2
<b>Mediana</b>	17,38
<b>Moda</b>	11,88
<b>Desviación Estándar</b>	17,38
<b>Máximo</b>	554,3
<b>Mínimo</b>	2,2
<b>Total de eventos</b>	5300723

La figura 55 ilustra la distribución porcentual de los flashes con polaridad negativa respecto a su magnitud de corriente registrada. La figura 56 presenta la curva de distribución acumulada.

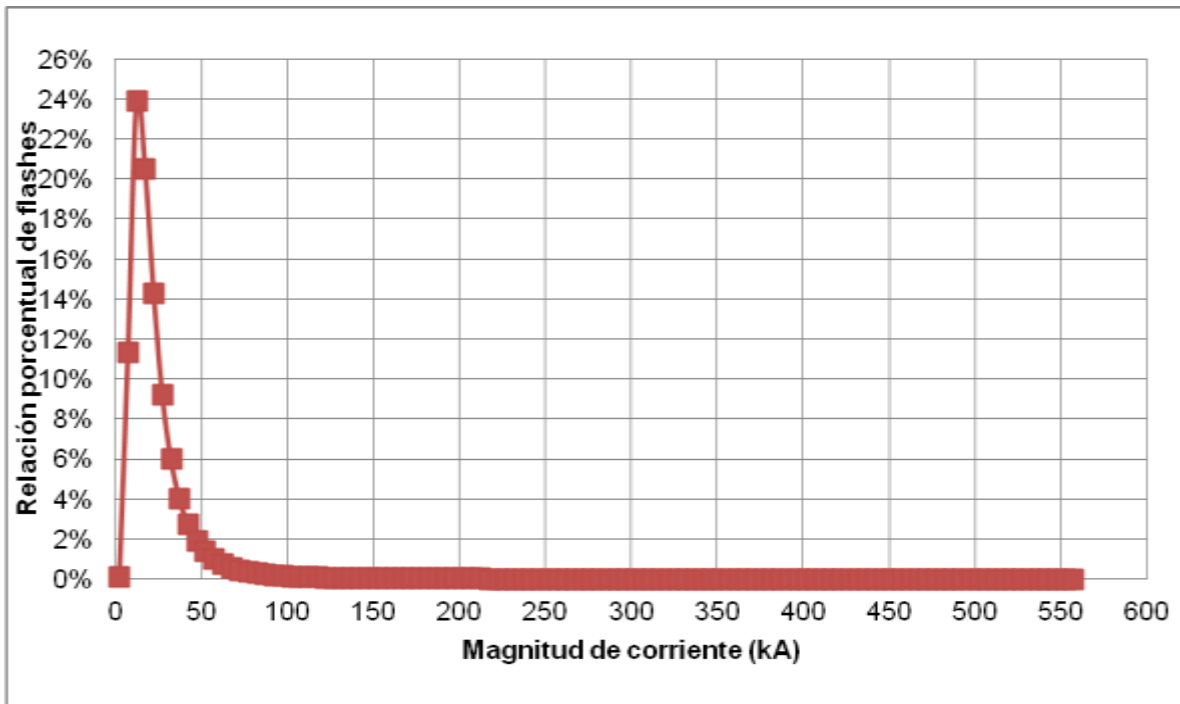


Figura 55. Distribución estadística de flashes negativos registrados respecto a su magnitud.

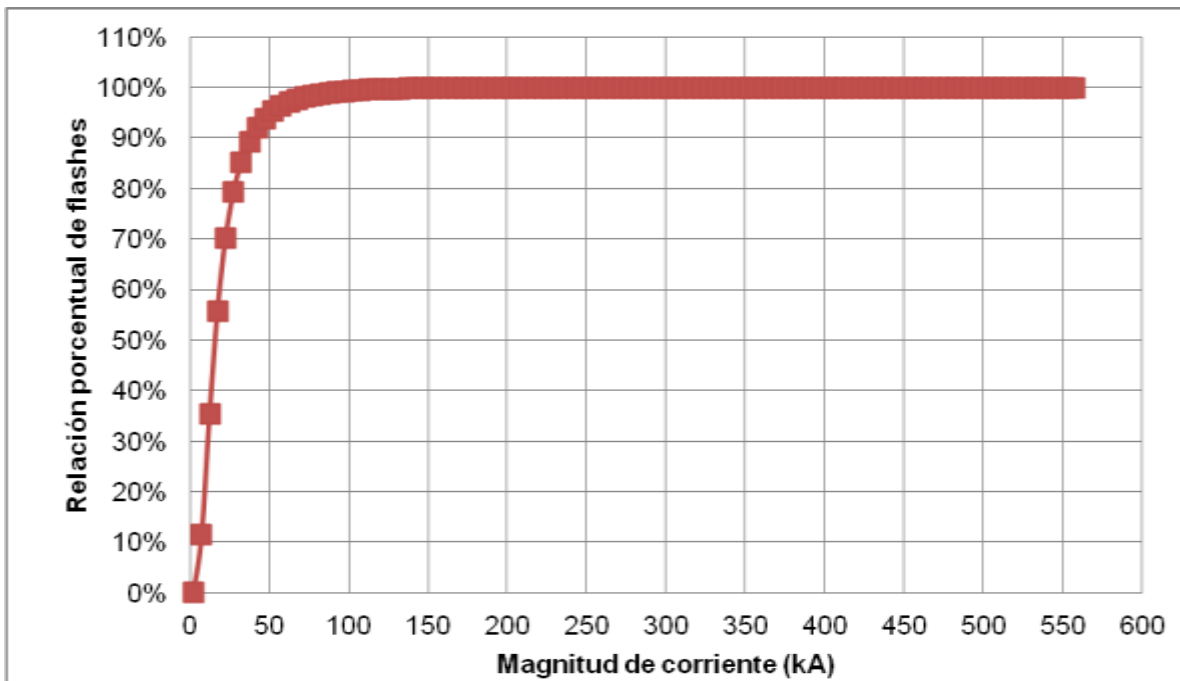


Figura 56. Curva de distribución acumulada de flashes respecto a su magnitud.

De acuerdo al comportamiento observado de los flashes analizados, las características de comportamiento son similares al realizado para strokes. Los valores de la media, varianza, desviación estándar, máximos, mínimos, media y moda son muy semejantes.



### 3.4.3. Comparación de amplitudes únicamente según la magnitud.

A Continuación se presenta un análisis independiente de corrientes de acuerdo al comportamiento de flashes y strokes.

#### 3.4.3.1. Análisis de corriente considerando corrientes por cada *stroke*

En el periodo comprendido entre el primero de Octubre de 2011 y el 30 de Septiembre de 2012 se registraron un total de 7.065.711 strokes sobre la región Caribe colombiana. La siguiente tabla resume la información estadística de los strokes registrados tomando como referencia los meses durante los cuales se analizó la información.

**Tabla 12. Resumen estadístico de las magnitudes de corriente por stroke.**

Periodos analizados	Total (No. de eventos)	Media (kA)	Mediana (kA)	Moda (kA)	Desviación Estándar (kA)	Máximo (kA)	Mínimo (kA)
oct-2011	649.371	26,3	21,1	17,7	19,4	357,5	2,3
nov-2011	421.105	28,4	22,2	22,3	19,0	554,3	2,8
dic-2011	115.804	29,1	22,9	22,5	17,0	344,2	3,3
ene-2012	7.835	20,6	15,2	18,4	9,4	320,6	3,5
feb-2012	14.414	19,3	14,5	16,0	7,9	249,4	3,0
mar-2012	201.657	15,9	12,4	11,5	8,1	236,0	2,3
abr-2012	678.283	18,3	14,7	13,0	10,0	284,1	2,0
may-2012	1.256.456	18,2	14,2	13,7	9,5	356,7	2,0
jun-2012	869.633	20,0	15,5	15,4	9,5	425,5	2,0
jul-2012	1.010.803	19,5	15,0	15,2	10,3	381,1	2,5
ago-2012	815.424	22,9	18,4	16,5	12,7	446,9	2,7
sep-2012	1.024.926	23,1	19,0	15,5	13,5	375,2	3,5
<b>Totales</b>	<b>7.065.711</b>	<b>21,2</b>	<b>16,5</b>	<b>21,2</b>	<b>16,5</b>	<b>554,3</b>	<b>2,0</b>

La figura 57 ilustra la distribución porcentual de los strokes respecto a su magnitud de corriente registrada. La figura 58 presenta la curva de distribución acumulada.

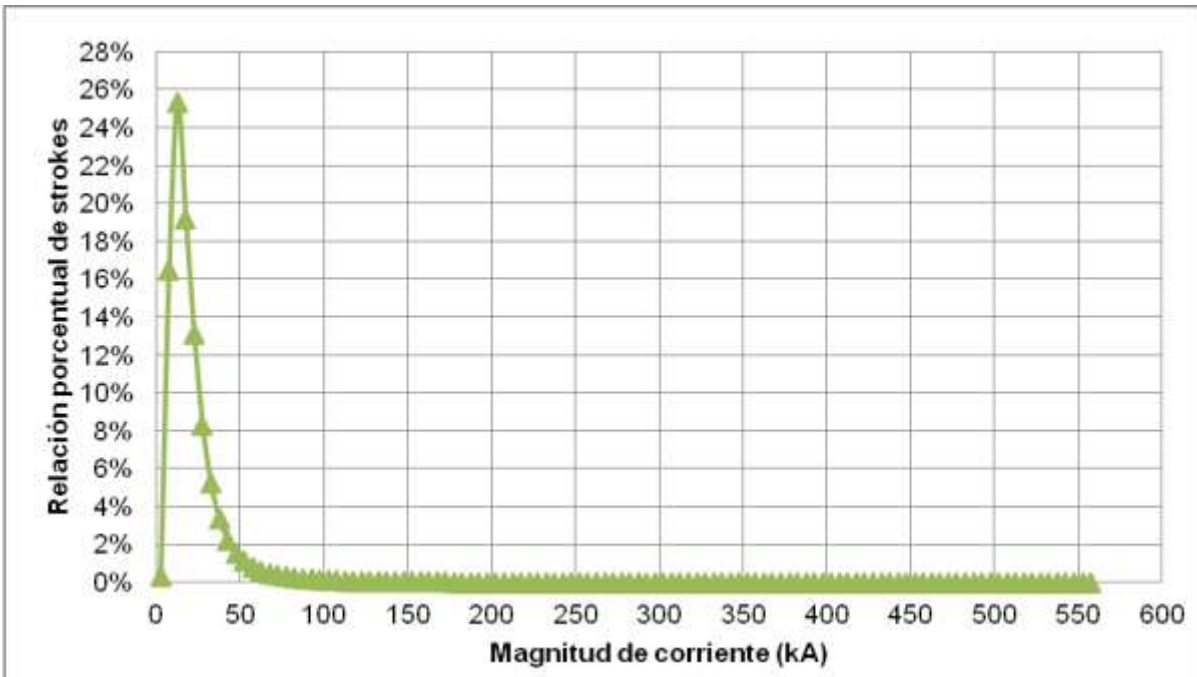


Figura 57. Distribución estadística de strokes registrados respecto a su magnitud.

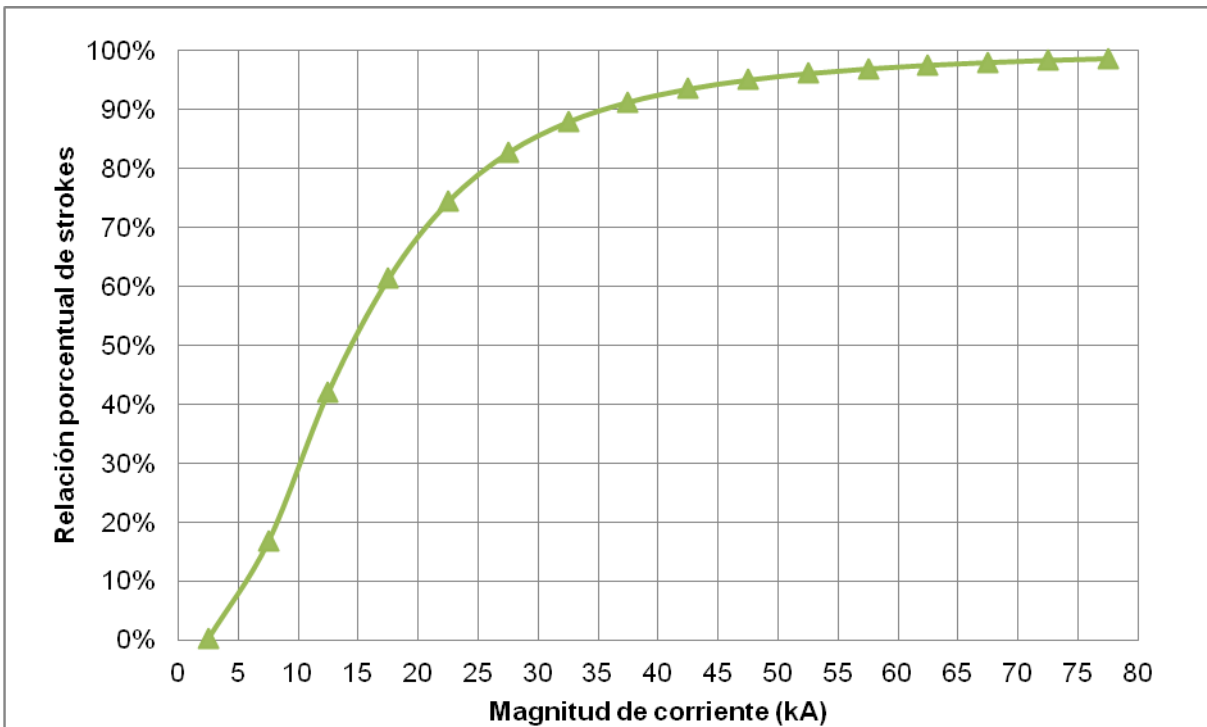


Figura 58. Curva de distribución acumulada de strokes respecto a su magnitud.

A continuación se presentan las siguientes consideraciones, las cuales son producto de las observaciones realizadas:

- El valor medio del total de strokes con es de 21,2 kA.
- El valor mediana es de 16,5 kA. Es decir que el 50% de los datos se encuentran por encima de este valor y la moda se estima en proximidad a 21,2 kA. De acuerdo a los datos analizados existe una probabilidad del 82,69% de que el stroke de descarga con sea entre el rango de 2,0kA a 30 kA.
- Se estima que los strokes de varíen en un rango de 16,5 kA como lo establece la desviación estándar, resaltando la presencia de eventos que superan los 500 kA pero que no son muy comunes de presentarse.

### 3.4.3.2. Análisis de corriente considerando corrientes por cada *flash*

El análisis realizado para flashes es muy similar al efectuado para strokes. El comportamiento resulta muy similar debido a como se mencionó en la sección 3,3 (relacionaron los strokes) con un 99,67% de ocurrencia de Flashes con un único stroke. A continuación se relaciona la información estadística realizada a las corrientes para este caso.

**Tabla 13. Resumen estadístico de las magnitudes de corriente por flashes.**

<b>Media</b>	21,29
<b>Mediana</b>	16,55
<b>Moda</b>	21,4
<b>Desviación Estándar</b>	16,38
<b>Máximo</b>	554,3
<b>Mínimo</b>	2,0
<b>Total de eventos</b>	7.015.488

La figura 59 ilustra la distribución porcentual de los flashes respecto a su magnitud de corriente registrada. La figura 60 presenta la curva de distribución acumulada.

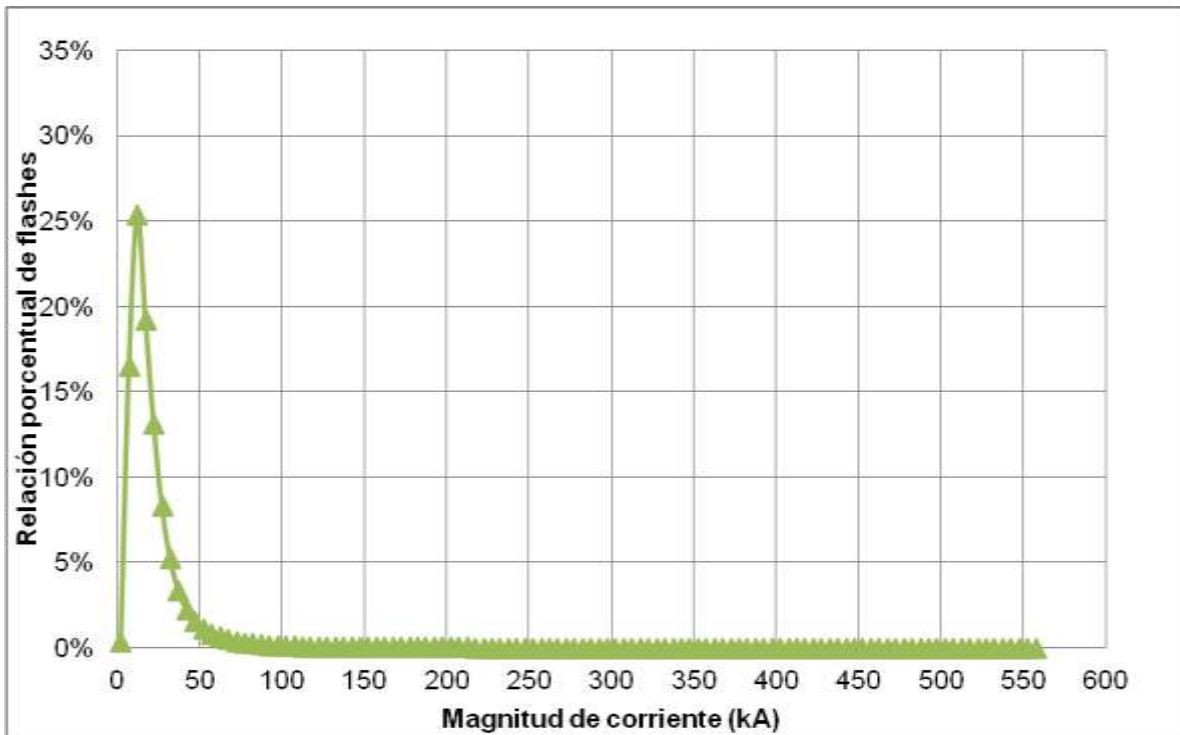


Figura 59. Distribución estadística de flashes registrados respecto a su magnitud.

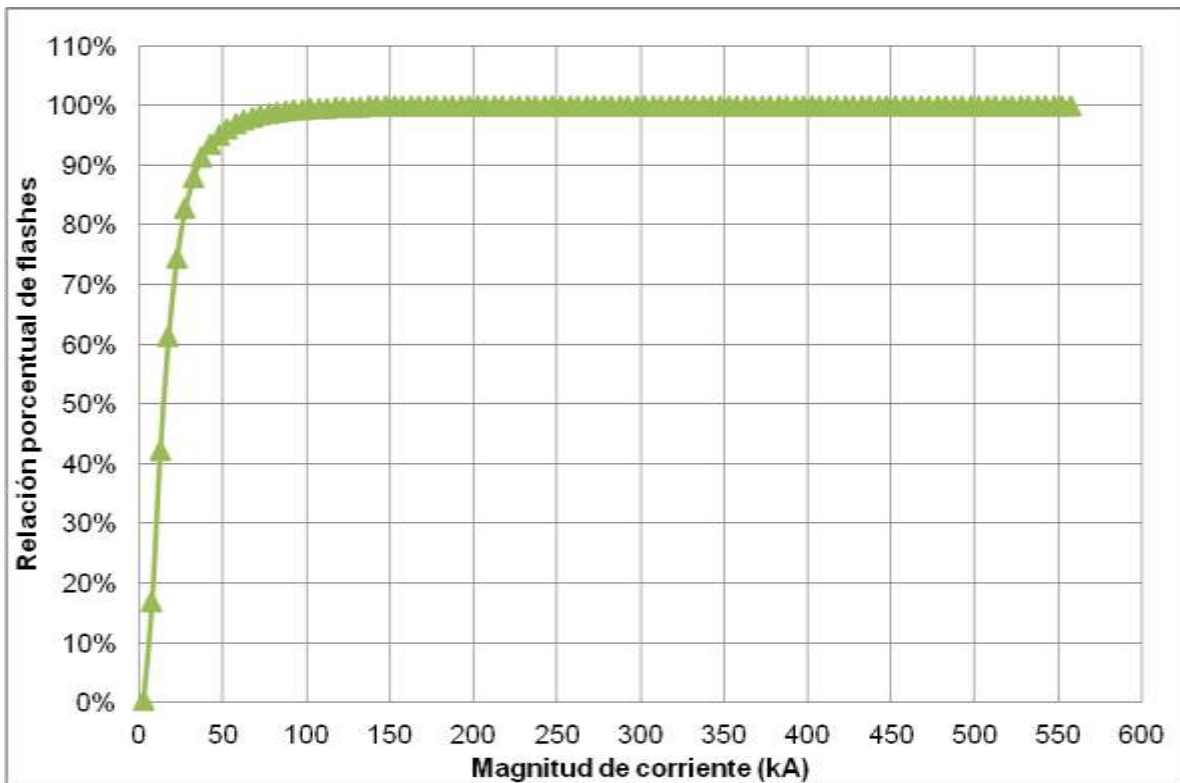


Figura 60. Curva de distribución acumulada de flashes respecto a su magnitud.

### 3.5. Densidad de descargas a tierra (DDT)

La densidad de descargas a tierra se estimó utilizando regiones de 3 km x 3 km sobre el mapa de la región Caribe Colombiana y tomando la información del sistema LINET entre los siguientes puntos. La tabla 14 presenta los rangos de referencia geográfica (latitud, longitud) desde donde se toman los puntos referentes para el mapeo de la densidad de descargas a tierra en la región Caribe.

**Tabla 14. Rango de referencia geográfica tomada para el estudio de la región Caribe Colombiana**

Limites del mapa	Posición atmosférica (Latitud, longitud)
Límite Superior izquierdo	12,6534742578335, -77,3529061103113
Límite Superior derecho	12,6534742578335, -71,1276096676249
Límite Inferior derecho	7,01336682721576, -71,1276096676249
Límite inferior izquierdo	7,01336682721576, -77,3529061103113

La selección de áreas de 3 km x 3 km arrojó un total de 48.952 áreas, en las cuales se subdividió el mapa de la región Caribe. El rango de estudio incluye los departamentos de la Guajira, Cesar, Atlántico, Bolívar, Sucre, Córdoba, Norte de Santander y parte del departamento de Antioquia como se presenta el de la figura 61.



**Figura 61. Región seleccionada para determinar la densidad de descargas a tierra.**

Posteriormente se ubicaron dentro de cada una de las áreas el número de descargas registradas alrededor de ese rango de ocurrencia del evento. La tabla 15 presenta las 48 zonas donde se registraron las mayores descargas.

**Tabla 15. Puntos máximos registrados de Densidad de descarga a tierra en áreas**

Latitud	Longitud	No. de descargas	DDT (AREA)	Latitud	Longitud	No. de descargas	DDT (AREA)
8,356249549	-74,79271926	1453	161,4	8,356249549	-74,95441527	1088	120,8
8,356249549	-74,8196686	1328	147,5	8,329391894	-74,79271926	1081	120,1
8,383107203	-74,8196686	1225	136,1	9,564843998	-71,58574837	1079	119,8
8,30253424	-74,92746594	1213	134,7	8,329391894	-74,60407391	1074	119,3
8,356249549	-74,76576993	1211	134,5	8,007100041	-74,98136461	1068	118,6
8,356249549	-74,84661793	1200	133,3	8,732256711	-74,76576993	1057	117,4
8,383107203	-74,84661793	1194	132,6	8,463680167	-74,60407391	1056	117,3
8,248818931	-74,65797259	1173	130,3	8,275676585	-74,92746594	1053	117
8,383107203	-74,87356727	1169	129,8	8,436822512	-74,60407391	1052	116,8
8,383107203	-74,79271926	1161	129	8,329391894	-74,84661793	1043	115,8
8,329391894	-74,87356727	1150	127,7	9,564843998	-71,55879903	1043	115,8
8,30253424	-74,57712458	1145	127,2	8,248818931	-74,63102325	1033	114,7
8,356249549	-74,92746594	1144	127,1	8,221961277	-74,68492192	1031	114,5
8,329391894	-74,95441527	1143	127	8,436822512	-74,55017524	1028	114,2
8,248818931	-74,68492192	1138	126,4	7,147655099	-74,98136461	1022	113,5
8,329391894	-74,8196686	1127	125,2	7,684808188	-75,17000996	1019	113,2
8,329391894	-74,9005166	1122	124,6	8,30253424	-74,55017524	1019	113,2
8,356249549	-74,87356727	1118	124,2	8,812829674	-74,76576993	1017	113
8,30253424	-74,60407391	1111	123,4	9,564843998	-71,66659637	1016	112,8
8,275676585	-74,60407391	1109	123,2	7,980242387	-74,4423779	1015	112,7
8,436822512	-74,57712458	1108	123,1	8,275676585	-74,65797259	1012	112,4
8,329391894	-74,92746594	1097	121,8	9,591701653	-71,72049504	1012	112,4
9,564843998	-71,6126977	1094	121,5	8,087673004	-74,8196686	1010	112,2
8,221961277	-74,65797259	1088	120,8	8,463680167	-74,57712458	1007	111,8

Los mapas de densidad de descarga a tierra fueron sobrepuestos en mapas geográficos en donde se realizó el mapeo de niveles sobre todas las zonas con el objetivo de integrarlos en un gráfico de nivel que esté asociado a las coordenadas de latitudes y longitudes.

La figura 62 presenta los gráficos de niveles realizados mediante el método geoestadísticos de interpolación. El método de interpolación varía los rangos medidos entre los 161,4 y los 0 flashes/km<sup>2</sup>



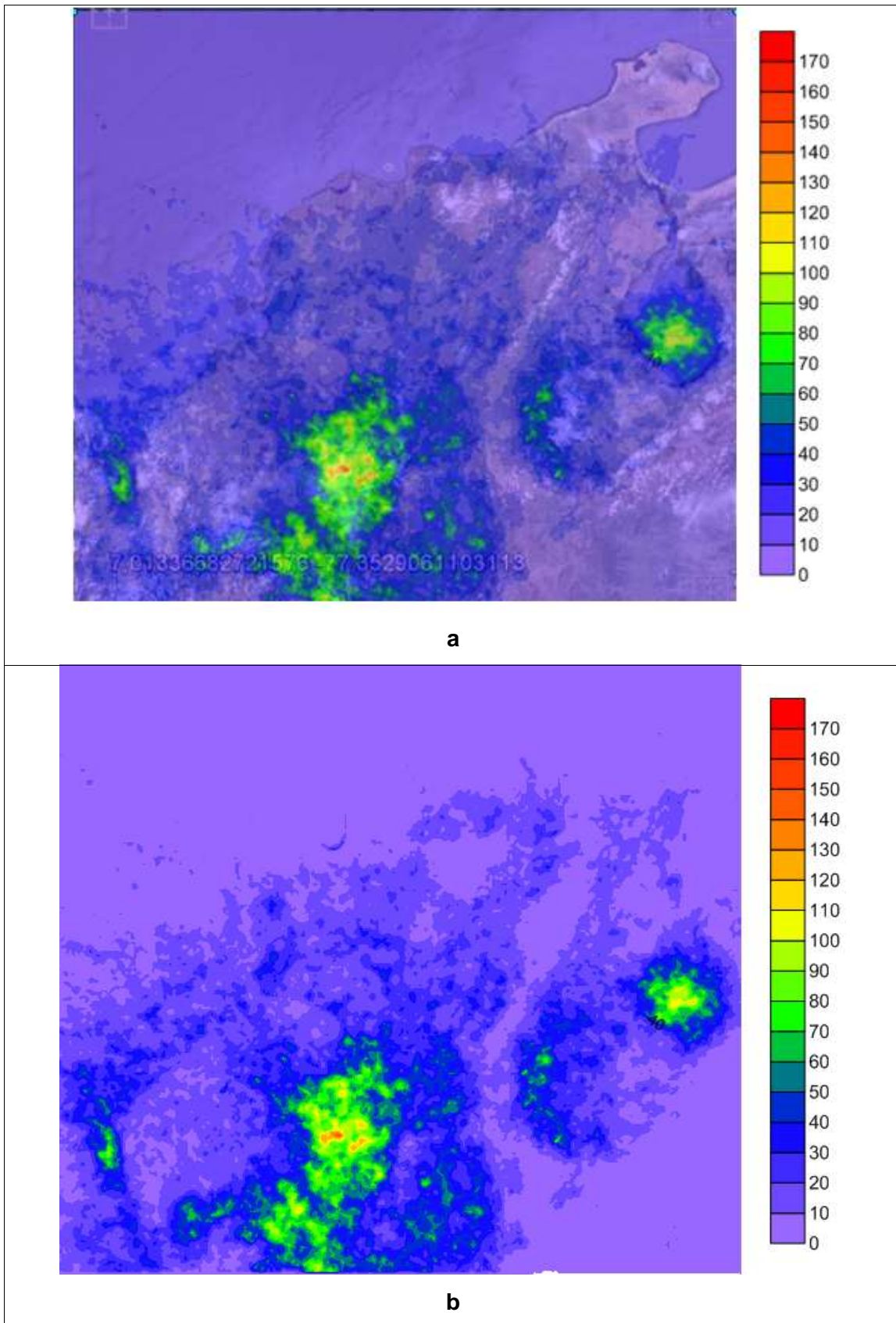


Figura 62. Gráfico de nivel sobrepuesto sobre la región Caribe. a) Gráfico de nivel sobre la región Caribe b) Gráfico de contornos

A partir de los resultados obtenidos en el desarrollo de un mapa de Densidad de descargas a tierra en áreas de 3km x 3km, se compararon los datos con información tomados por la RECMA y LIS, al igual que con investigaciones paralelas implementando LINET.

La tabla 16 resume los resultados obtenidos para las principales ciudades de la región Caribe Colombiana en donde se observa una variación en los valores medidos a través de los periodos observados y que se evidencia una variación temporal. Siguiendo las sugerencias de (Younes, 2002), se destaca que el comportamiento atmosférico a nivel regional debe continuar siendo observado para identificar su variación en los próximos años y poder identificar su incidencia con factores ambientales y/o orográficos tales como los fenómeno de la niña y del niño, las variaciones de temperaturas, las alturas, entre otros factores.

**Tabla 16. Comparación de densidad de descargas a tierra para las principales ciudades de la región Caribe y Norte de Santander.**

Sistema de edición Ciudades	Densidad de Descargas a Tierra (rayos/km <sup>2</sup> * año)		
	RECMA <sup>38</sup> (2002)	LIS <sup>39</sup> (2002)	LINET 3km x 3km (2011-2012)
Barranquilla	1	32	27
Santa Marta	1	16	5
Riohacha	6	16	13
Valledupar	6	32	14
Montería	8	32	18
Sincelejo	8	32	19
Cartagena	9	16	11
Ocaña	8	4	14
Cúcuta	8	0	7
Magangué	32	64	55
Mompós	30	64	50

Se sugiere continuar analizando los factores ambientales y orográficos debido a que durante el desarrollo de la investigación realizada y en apoyo con un trabajo de fin de pregrado del programa de Ingeniería eléctrica de la Universidad del Norte. Se identificaron los siguientes aspectos orográficos y ambientales que posiblemente incidan en el

<sup>38</sup> Información tomada en referencia a [1], [3]

<sup>39</sup> Información tomada en referencia a [1], [3]



comportamiento de las descargas atmosféricas y su parámetro de densidad de descargas a tierra:

- Se identificó en el mapa de DDT que se presentó anteriormente en la figura 62, que las zonas de la Sierra Nevada de Santa Marta no registran descargas Nube – Tierra, lo que establece un DDT equivalente a cero para esta zona, lo cual puede conducir a las siguientes hipótesis:
  - o *Hipótesis 1:* En las zonas montañosas de la región Caribe no se presenten frecuentemente descargas atmosféricas.
  - o *Hipótesis 2:* El sistema LINET no está detectando correctamente la actividad atmosférica en zonas montañosas de la Región Caribe Colombiana.
- Se identificó que el comportamiento de las descargas atmosféricas varía durante el año, donde los días con pocas lluvias inciden en la presencia de descargas atmosféricas sobre la región Caribe. Esto es soportado con el análisis de eventos presentado en la figura 34 en donde se registra una variación en el comportamiento atmosférico de las descargas Nube – Tierra.
- Estudios paralelos desarrollados dentro del grupo de trabajo en apoyo con un trabajo de fin de pregrado de la Universidad del Norte, buscó correlacionar el fenómeno atmosférico presentado sobre la región Caribe con condiciones Orográficas, lo que propone que existe una incidencia sobre el comportamiento de las descargas ante las variaciones altimétricas del terreno [57].

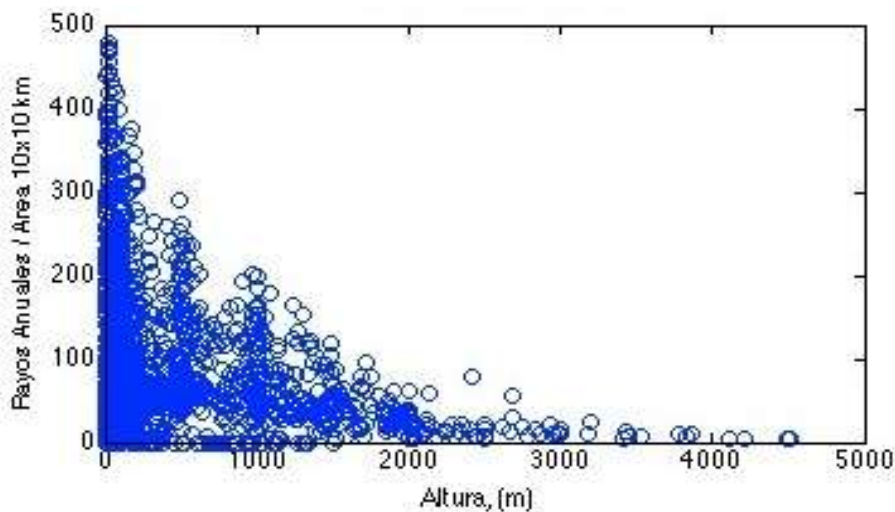


Figura 63. Relación del total de rayos registrados en áreas de 10 x 10 km respecto a la altura [57].

De acuerdo con los resultados obtenidos hasta el momento, esta investigación propone que se continúe observando durante los años consecutivos el comportamiento atmosférico sobre la región Caribe al igual que el sistema de detección de descargas atmosféricas LINET a fin de establecer factores incidentes y/o validar la información obtenida.

### 3.6. Error en la medición

#### 3.6.1. Análisis del error de medición respecto al total de eventos registrados

La información obtenida es registrada y procesada por las antenas localizadoras de descargas atmosféricas mediante el sistema de medición basado en los tiempos de arribo como se describió en el capítulo 1. El Sistema LINET filtra la información de descargas obtenidas entre el rango de 0 a 20 metros, el cual es asociado al error de medición y se asume que la información presentada es la captada con un bajo error conforme lo estableció el criterio de precisión del sistema [58].

Los datos registrados por el sistema identifican que el 62,75% de los datos se encuentran con un rango de error de 2D inferior a 0,5 Kilómetros. La figura 64 presenta que por lo menos el 95% de los datos están por debajo de los 5,5 Kilómetros.

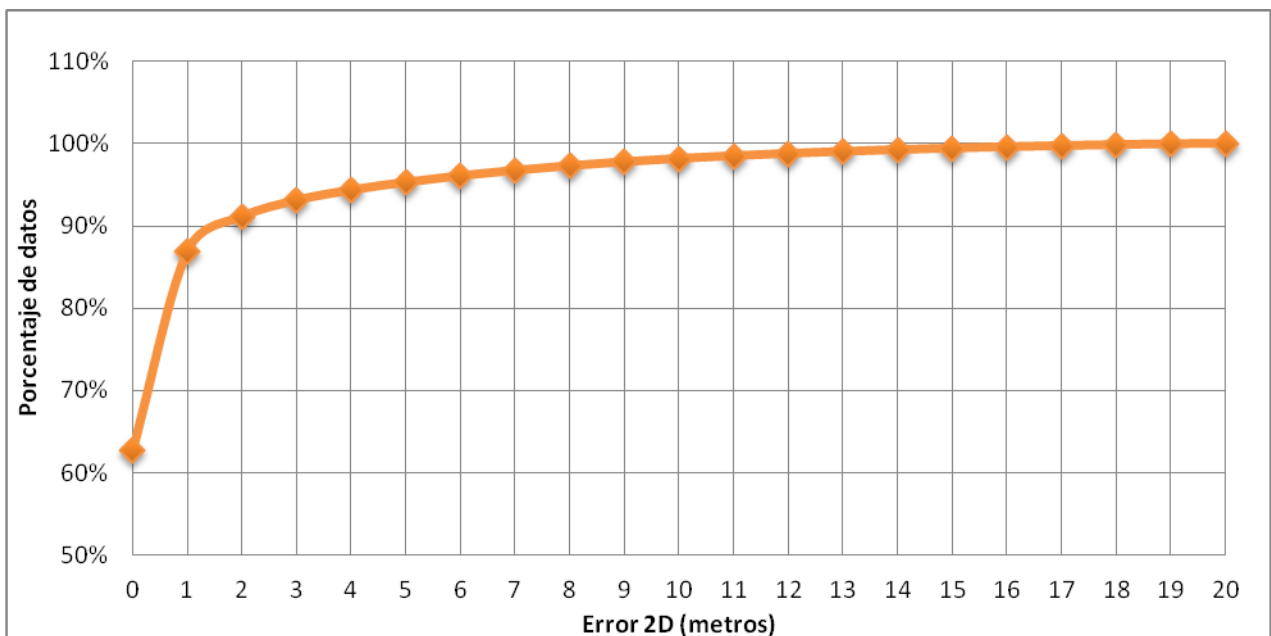


Figura 64. Porcentaje acumulado de eventos respecto al error de 2D medido.

### 3.6.2. Análisis del error de medición respecto a la corriente de flashes (kA)

El error medido se contrastó mediante análisis de dispersión en donde se relaciona la amplitud tanto de corrientes de descarga atmosférica con polaridad negativa y positiva con el error de medición en metros. De la información analizada se observa que las descargas con amplitudes relativamente elevadas poseen errores de medida bajos y esto es atribuible con la intensidad emitida por el evento. Sin embargo, eventos de amplitudes inferiores a 50kA en magnitud, suelen oscilar entre errores entre los 0 y los 20 metros.

La figura 65 ilustra el comportamiento del análisis observado durante las mediciones del mes de mayo. En esta grafica se logra identificar que el error registrado en los eventos detectados por el sistema suele presentar errores elevados en la medición para niveles bajos de amplitud de corriente independientemente de su amplitud.

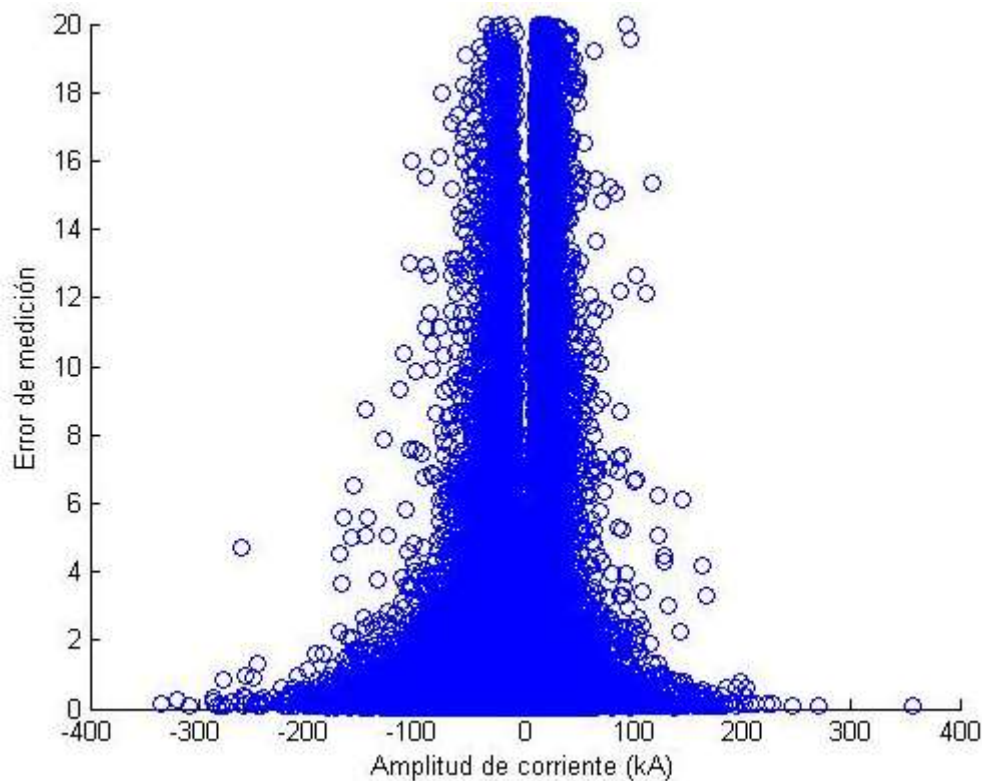


Figura 65. Relación de corriente kA Vs. Error de medición (m) para el mes de Mayo de 2012.

### 3.7. Eficiencia del sistema basado en información registrada

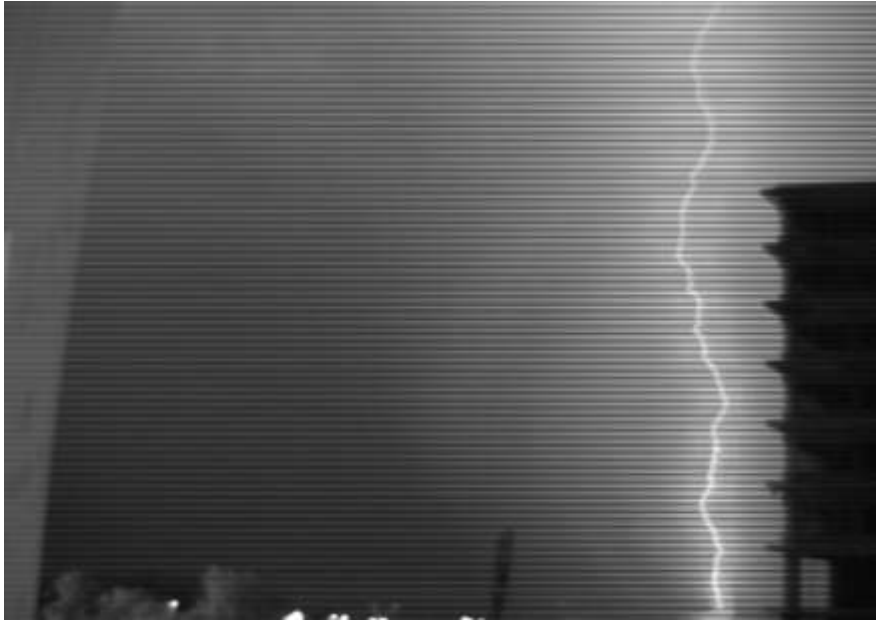
Para validar la información, se realizaron mediciones alrededor de la ciudad de Barranquilla a fin de identificar la eficiencia en la detección del sistema. La tabla 17

resume los eventos captados y registrados a través de la cámara WATEC 902H, el cual registra la información de manera continua. Dentro de la tabla se especifica la fecha, hora y lugar donde se identificaron los eventos, al igual que si esta información fue detectada o no por el sistema de detección de descargas.

**Tabla 17. Total de eventos registrados con cámara WATEC 902H**

No.	Fecha	Hora Inicio	Hora fin	Lugar	Identificado en el sistema (S=SI; N=NO)
1	22/09/2012	05:43	05:44	Padro	SI
2	22/09/2012	05:43	05:44	Padro	SI
3	22/09/2012	05:44	05:45	Padro	SI
4	22/09/2012	05:44	05:45	Padro	SI
5	25/09/2012	14:14:00	14:14:02	Uninorte	NO
6	27/09/2012	11:57:00	11:57:02	Uninorte	NO
7	05/10/2012	02:46:31	02:46:34	Uninorte	NO
8	05/10/2012	02:48:22	02:48:24	Uninorte	NO
9	05/10/2012	02:54:51	02:54:54	uninorte	NO
10	08/10/2012	18:29:55	18:29:59	Uninorte	NO
11	08/10/2012	19:28:00	19:28:02	Uninorte	NO
12	08/10/2012	19:29:42	19:29:45	Uninorte	NO
13	08/10/2012	19:31:19	19:31:22	Uninorte	NO
14	08/10/2012	19:31:30	19:31:33	Uninorte	NO
15	08/10/2012	19:55:00	19:55:03	Uninorte	NO
16	08/10/2012	19:57:05	19:57:09	Uninorte	NO
17	08/10/2012	20:00:06	20:00:09	Uninorte	NO
18	09/10/2012	05:55:13	05:55:15	Uninorte	NO
19	09/10/2012	18:03:28	18:03:31	Uninorte	NO
20	09/10/2012	18:11:30	18:11:32	Uninorte	NO
21	17/10/2012	00:14:26	00:14:28	Uninorte	NO

Como se presentó en la tabla anterior, muchos de los eventos registrados durante los momentos en que se realizaron las observaciones de los eventos atmosféricos, estos no aparecieron el sistema de detección de descargas que almacena la información. La mayoría de estas mediciones se registraron en observación hacia el mar Caribe como lo presentan las figuras 66 y 67, los cuales no fueron registrados por parte del sistema de medición LINET y que a su vez estas descargas coinciden con otros eventos que ocurrieron en tiempos similares pero en otra localización del mapa, lo que genera incertidumbre en el proceso de detección.



**Figura 66. Imagen registrada por sistema de vigilancia Imagen obtenida del sistema de monitoreo mediante UFO CAPTURE y el sistema CCD.**

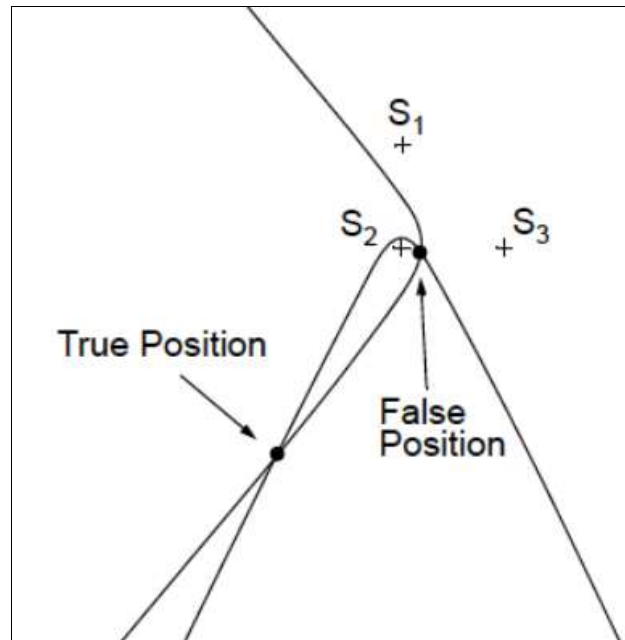


**Figura 67. Imagen registrada por sistema de vigilancia Imagen obtenida del sistema de monitoreo mediante UFO CAPTURE y el sistema CCD.**

Estos eventos al igual que los presentados en la tabla anterior no fueron detectados por LINET por lo que no es posible establecer un margen de eficiencia sin conocer exactamente la razón por la que estos eventos no son registrados de manera correcta.

De acuerdo con los operadores del sistema LINET en Colombia, se requiere mayor información estadística sobre el proceso de detección de las descargas atmosféricas en la región Caribe Colombiana, de tal manera que se permita identificar la eficiencia real del sistema. Este caso en particular es identificable para los eventos que presenta la base de datos, la cual únicamente ilustra los eventos que hayan sido detectados por tres antenas detectoras y que a su vez tengan un error en detección en 2D inferior a 20 km. De lo contrario el sistema no presenta la información.

La figura 68 presenta el proceso de detección de tres sensores que resultan en una intersección entre dos posibles puntos en los cuales se detecta un posible punto de detección de la descarga. Dentro de estos dos puntos existe un punto verdadero donde se presenta la descarga, mientras que el otro punto lleva a un punto erróneo, el cual es el resultado del proceso de intersección de los tres sensores que se encuentran operando mediante intersección hiperbólica [58], [59].



**Figura 68. Localización errónea usando tres sensores para detectar descargas atmosféricas usando el método de intersección hiperbólica<sup>40</sup> [59]**

Los sistemas de detección modernos basados en redes que operan a partir de tiempos de arribo realizan un proceso iterativo para determinar el tiempo de ocurrencia de la descarga registrada. Este proceso de detección se realiza empleando intersecciones

<sup>40</sup> Fuente: CP SeriesTM, CP7000TM, CP8000TMUser's Guide, Vaisala, Inc., 2004.

circulares. De esta manera se logra medir tanto el tiempo de descarga estimado, como el tiempo de arribo.

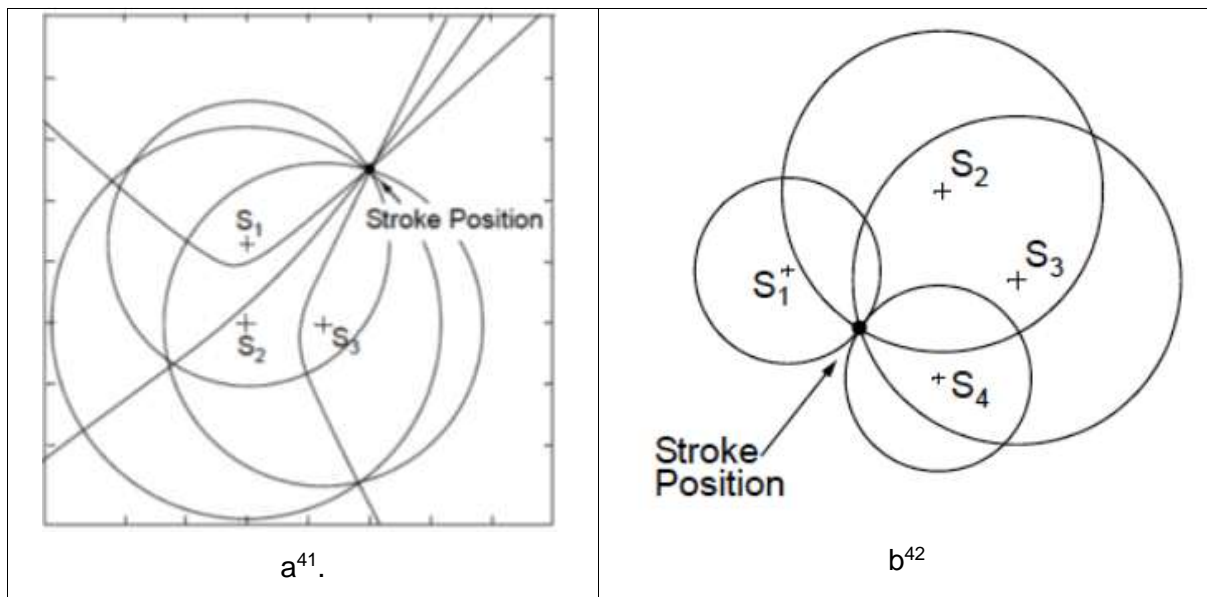


Figura 69. Detección de eventos utilizando intersecciones circulares. a) Medición con tres sensores. b) Medición con cuatro sensores

Los sistemas de detección moderna recomiendan realizar el proceso de detección con más de cuatro sensores para garantizar una mayor precisión en el proceso de detección. Es probable que la ausencia de sensores sobre el territorio de análisis no permita una detección correcta sobre la región Caribe, del año en los cuales el sensor localizado en Montería no se encontraba operando, es posible que la capacidad de detección en la región Caribe sea reducida, debido a que la información que no tenga al menos cuatro mediciones de antenas no es mostrada por el sistema LINET.

<sup>41</sup> Fuente: CP SeriesTM, CP7000TM, CP8000TMUser's Guide, Vaisala, Inc., 2004.

<sup>42</sup> Fuente: CP SeriesTM, CP7000TM, CP8000TMUser's Guide, Vaisala, Inc., 2004.

## CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos del presente trabajo de investigación en torno a la caracterización de descargas atmosféricas en la región Caribe Colombiana, se tienen las siguientes consideraciones respecto al fenómeno atmosférico y al sistema de detección de descargas utilizado actualmente:

- Se registró que para la región Caribe Colombiana el 84,4% de la actividad atmosférica son descargas nube-tierra. Se propone establecer que en promedio del 100% de posibles eventos registrados, el 84,4% de estos eventos pueden ser eventos nube tierra.
- A diferencia de la literatura e investigaciones realizadas en otras latitudes, se encontró una mayor actividad de descargas atmosféricas con polaridad positiva equivalente al 24,4% del total de descargas a tierras registradas.

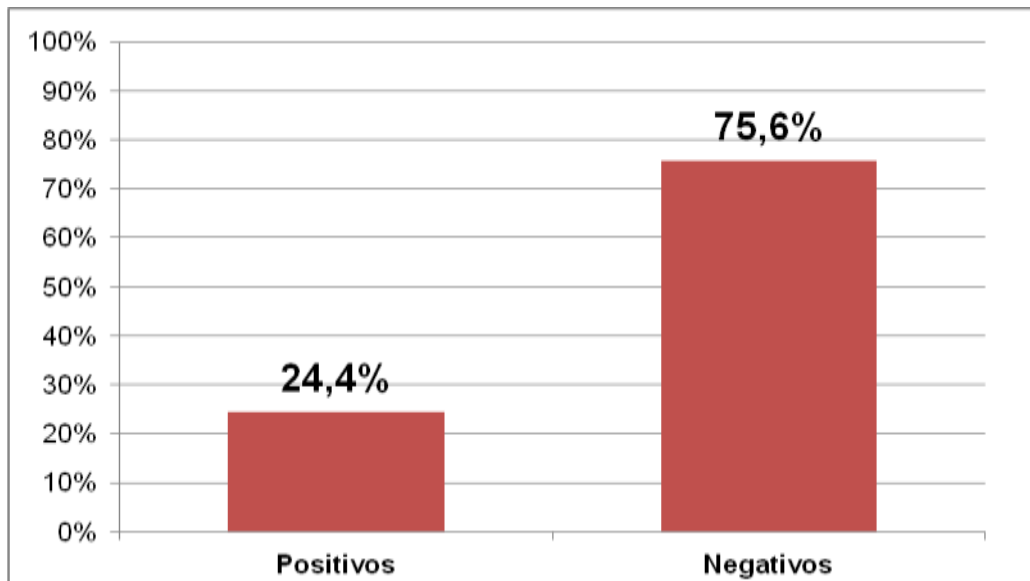


Figura 70. Relación porcentual de stokes registrados para la región Caribe Colombiana

- De acuerdo con las mediciones obtenidas, se tiene que en su gran mayoría las descargas atmosféricas registradas poseen un único Stroke y que este valor es aproximadamente el 99,63% de los casos. El resto de eventos son muy poco comunes lo que puede llevar a dos posibilidades: El sistema únicamente detecta



flashes y este valor porcentual pasará a representar la precisión del dispositivo. De no serlo, este comportamiento se debe continuar monitoreando a fin de validar el comportamiento de las descargas en función de su multiplicidad.

- La tabla 18 presenta la información media de la corriente registrada para la región Caribe Colombiana calculada para flashes y strokes, en donde se logra identificar que los valores medios tanto para descargas positivas, negativas y absolutas son aproximadamente las mismas. La figura 71 presenta el comportamiento acumulado de las descargas positivas, negativas y los valores absolutos de la corriente.

Tabla 18. Valor medio de la corriente registrada en kA

	POSITIVO	NEGATIVO	ABSOLUTO
FLASHES	15,37	23,2	21,29
STROKES	15,36	23,2	21,29

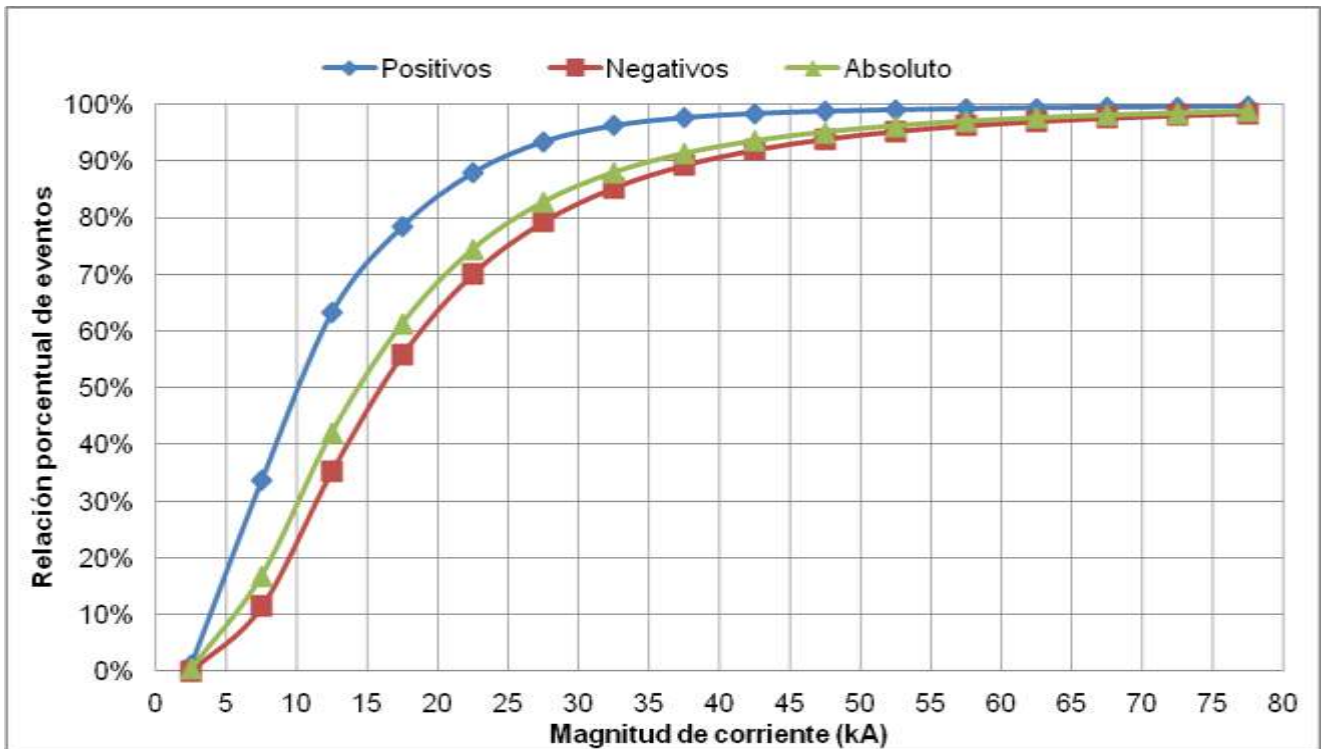


Figura 71. Distribución acumulada de corrientes para descargas a tierra con polaridad positiva, negativa y absoluta.

- Se identificaron valores máximos de descargas atmosféricas para descargas con polaridad positiva superiores a 400 kA. Estos valores son poco comunes y se encuentran alejados del valor medio esperado. Lo mismo ocurre para descargas

con polaridad negativa, en donde se detectaron corrientes que superan los 550 kA. Estos valores son expresados en la tabla 19.

**Tabla 19. Valores máximos y mínimos registrados para Strokes**

	<b>Máximos (kA)</b>	<b>mínimos (kA)</b>
<b>Positivas</b>	446,9	2,2
<b>Negativas</b>	554,3	2,0

- Se calculó la densidad de descargas a tierra, en donde se identificaron zonas con una alta actividad atmosférica como es el caso del sur de la región de Sucre y el lago de Maracaibo en Venezuela. En estos puntos se registra una actividad de descargas a tierra elevada. Por otra parte no se identifican mediciones en la sierra nevada de Santa Marta.
- Los valores de errores registrados por el sistema no exceden los 20 kilómetros de distancia 2D. Sin embargo la gran mayoría de eventos registrados posee un nivel de error bajo, en donde el 62,75 de los eventos registrados tienen un error inferior al 0,5%. Sin embargo, hay errores en el sistema de detección que se desconocen y que no permiten que el sistema detecte las descargas captadas en algunos puntos del mapa de la Región Caribe como lo señala la figura presentada en el apéndice C, la cual fue suministrada por los funcionarios e investigadores de KERAUNOS y LINET en Colombia.
- Aunque el sistema de monitoreo realizado durante el periodo de observación, logró captar el 30% de los eventos observados, no es posible calcular eficiencia debido a que se tienen muy pocos parámetros para lograr estimar si el sistema presenta una detección correcta, sin embargo se debe mejorar la robustez del sistema, debido a que entre mayor sea el número de antenas utilizadas para el proceso de detección como lo establecen las investigaciones realizadas hasta el momento, se tendrá una mejor estimación del comportamiento atmosférico.

Respecto a los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación y los aspectos señalados anteriormente es importante resaltar que esta investigación ha sido desarrollada por primera vez de manera exclusiva para la región Caribe y que a su vez es la primera investigación en que presenta resultados soportados con la información

suministrada por LINET. Lo anterior resulta innovador y permite que los resultados entregados en esta investigación sean un primer referente para futuras investigaciones en este tema.

Se obtuvieron resultados similares en comportamiento para las corrientes y polaridades de acuerdo a lo señalado por (Younes, 2002) y (Torres H, 2002), sin embargo los valores de DDT y multiplicad son elevados comparados con estudios previos realizados en la región Caribe<sup>43</sup>, es por lo anterior que se recomienda continuar observando el fenómeno atmosférico debido a que la investigación realizada pudo identificar que el comportamiento de las descargas puede estar afectado por condiciones tanto climáticas como orográficas como lo señalaron el mapa de DDT presentado (Figura 62), en donde no se registran descargas atmosféricas en la Sierra Nevada de Santa Marta, el comportamiento de las descargas atmosféricas para épocas de pocas lluvias (Figura 34) y los cambios en las variaciones altimétricas del terreno al relacionar los (Figura 63).

A nivel internacional los resultados obtenidos son significativos y sirven de soporte para continuar afirmando que las descargas atmosféricas poseen un comportamiento diferente en Colombia a como lo establece la bibliografía presentada hasta la fecha por investigadores que desarrollaron sus conclusiones con base a resultados obtenidos en regiones localizadas en otras latitudes [37], [60], [61]. Para lo anterior, los resultados se soportan en los investigadores Colombianos (Younes, 2002) y (Torres H, 2002), quienes en sus resultados obtenidos señalan (figura 15) un valor de polaridad superior al 20% y que para esta investigación fue de 24,4% como lo señala la figura 70.

Se resalta que a pesar de que la información obtenida para DDT en la región es alta, es posible de que esta sea mucho mayor para algunas áreas en particular debido a que el sistema está dejando de almacenar cierta información en algunos puntos de la región, que pueden contribuir a que algunas áreas tengan un comportamiento mucho más elevado. Se destaca también que el sensor de la ciudad de Montería estuvo inactivo por algunos periodos durante las mediciones, lo cual pudo influir en el proceso de detección del sistema.

---

<sup>43</sup> Estudios realizados con otros sistemas de detección que en su momento contemplaron el comportamiento total de las descargas atmosféricas en Colombia.

Finalmente, se recomienda la instalación de un mayor número de antenas sobre la región Caribe, las cuales permitan respaldar y aportar mayor confiabilidad a las mediciones obtenidas en LINET, tomando como referente el éxito de este en Europa [50], [62], [63]. También se recomienda continuar monitoreando los parámetros atmosféricos con el objetivo de lograr caracterizar el comportamiento de las descargas atmosféricas en esta zona del territorio colombiano, teniendo presente aspectos orográficos y condiciones climatológicas.

## APÉNDICE A: GLOSARIO DE TERMINOS

**Día tormentoso:** Un día tormentoso es aquel día en donde por lo menos ha sido escuchado un trueno.

**Electrosfera:** Capa de la tierra en donde la electricidad atmosférica forma un continuo y diferenciado potencial eléctrico constante. Comprende el espacio comprendido entre la superficie de la tierra y la ionosfera.

**Evento:** Cualquier fenómeno de descarga atmosférica presentado durante los análisis realizados<sup>44</sup>.

**Eventos de descargas atmosféricas:** cualquier evento sea nube-nube, nube-tierra o intranubes registrado<sup>1</sup>.

**Eventos nube – tierra:** Descargas atmosféricas nube – tierra<sup>1</sup>.

**Flash:** Evento completo de descarga atmosférica registrada nube – tierra.

**Orografía:** Rama de la geografía que estudia la superficie terrestre y las sistematiza según sus rasgos externos con independencia de su origen.

**Severidad tormentosa:** Relación del nivel Ceráunico para un área específica [29].

**TOA:** Tiempo de Arribo (Time of arrival)

**Trueno:** Sonido generado por la onda de choque causada por un rayo al moverse entre las nubes o entre las nubes y tierra debido a las variaciones de temperatura entre el evento (alta temperatura) y el entorno en que se mueve (baja temperatura).

---

<sup>44</sup> Definición propia

## APÉNDICE B: Errores de medición respecto a la magnitud de la corriente.

Las figuras de este anexo relacionan los errores de medición registrados por el sistema LINET en los meses bajos los cuales se realizó la observación sobre la región Caribe colombiana.

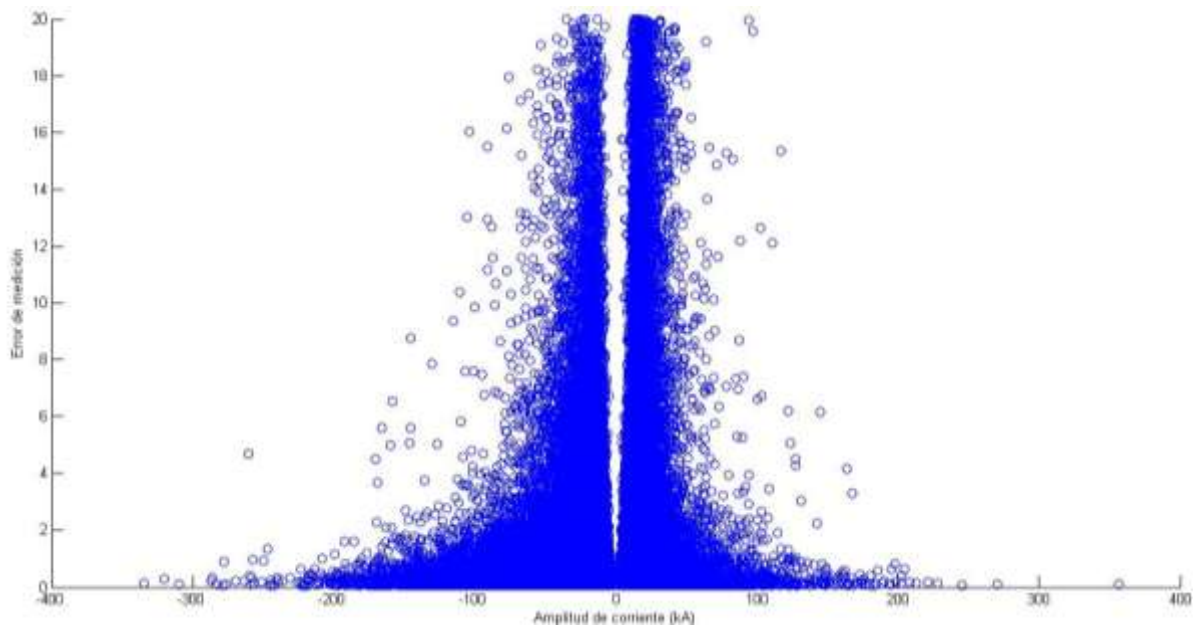


Figura 72. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Octubre de 2011

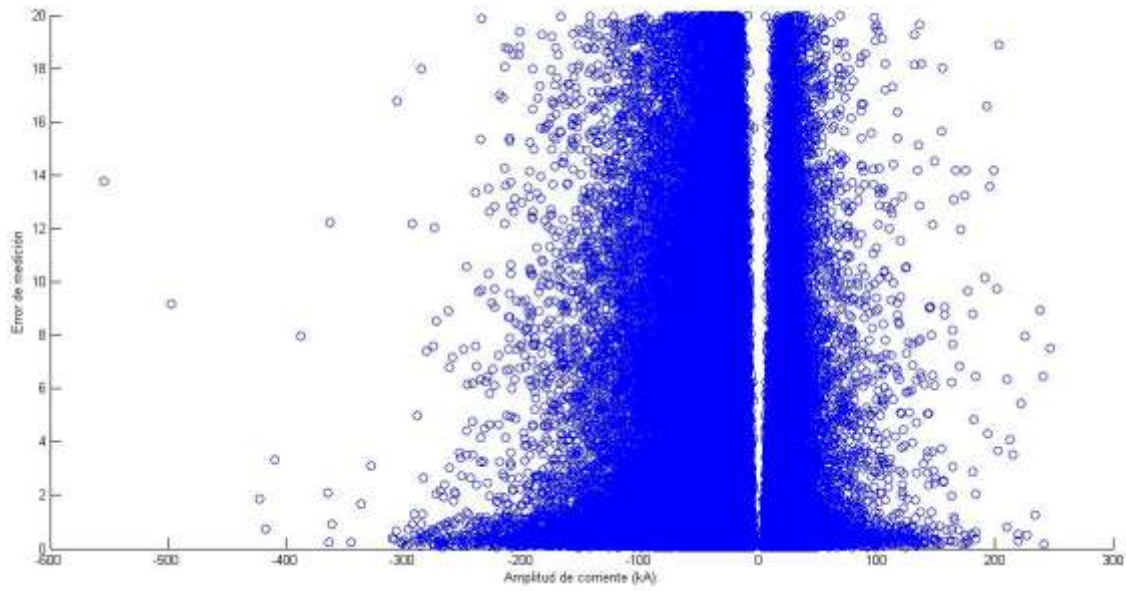


Figura 73. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Noviembre de 2011

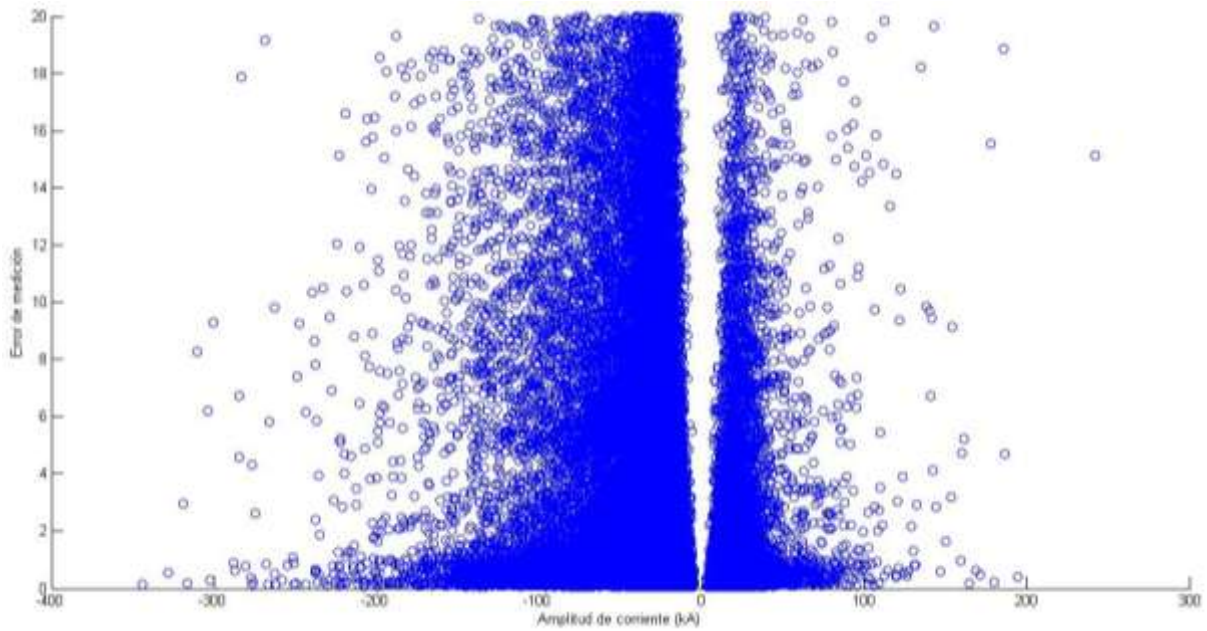


Figura 74. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Diciembre de 2011

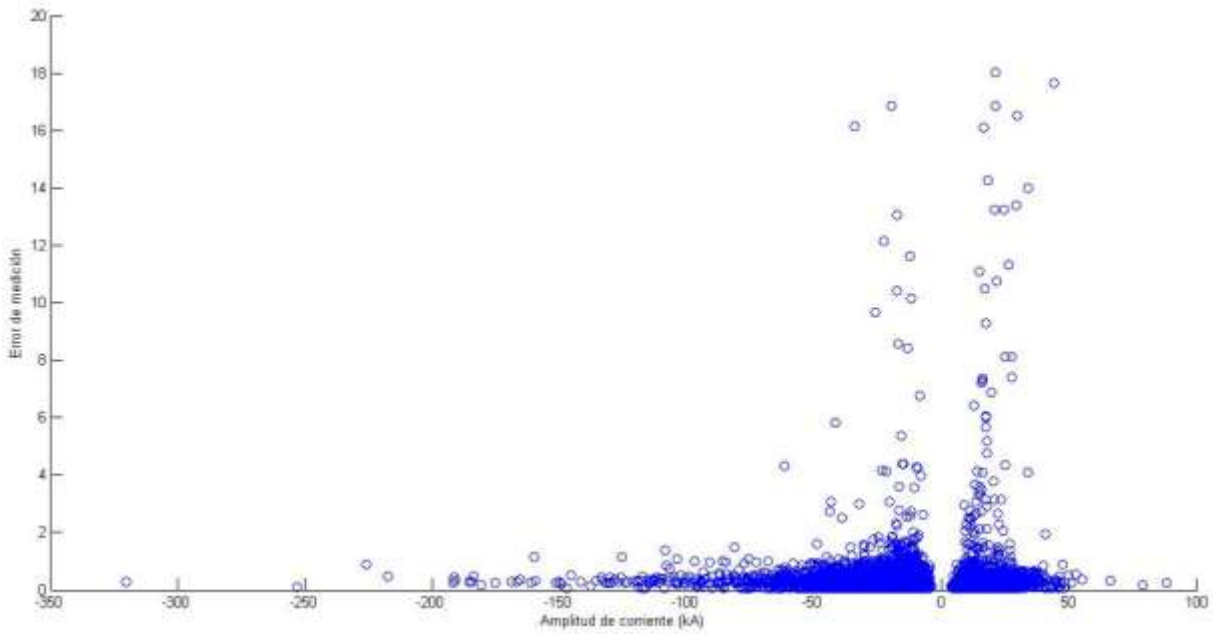


Figura 75. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Enero de 2012

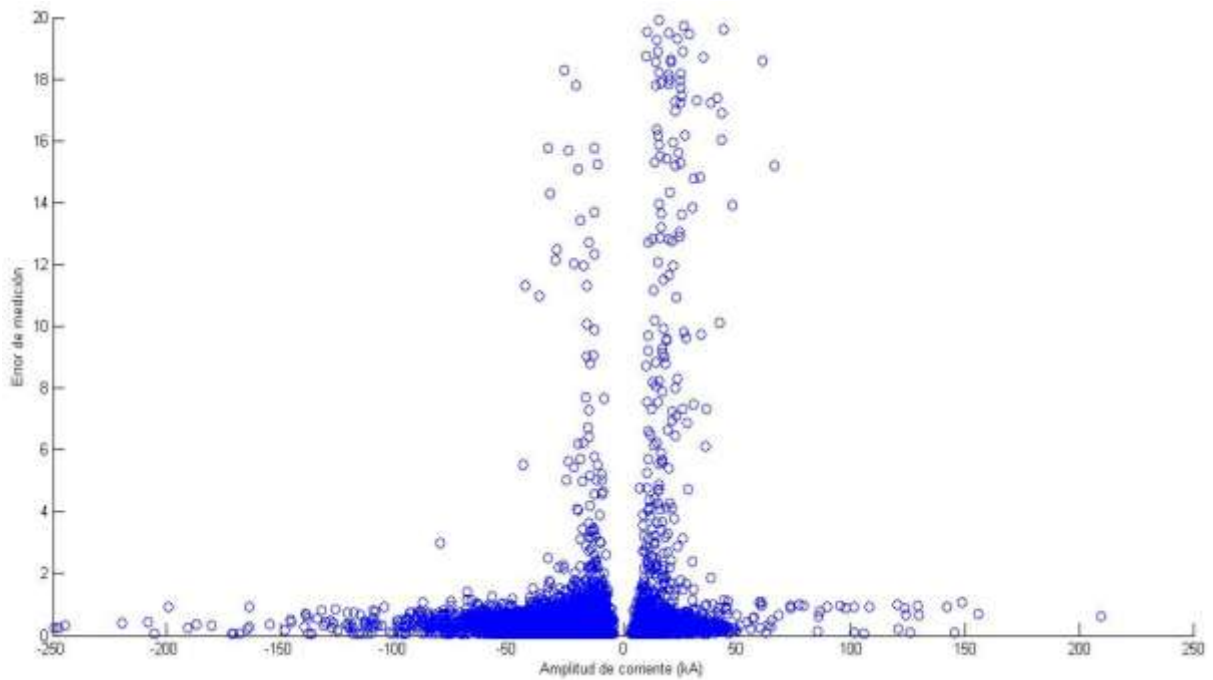


Figura 76. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Febrero de 2012



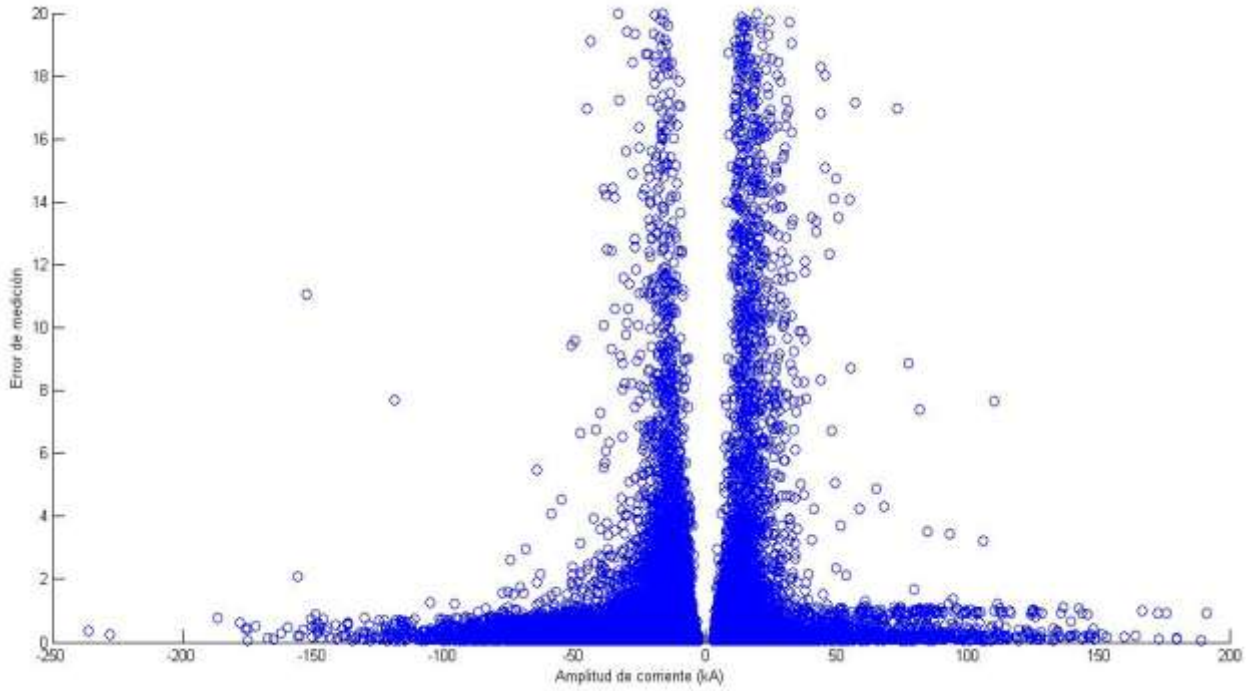


Figura 77. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Marzo de 2012

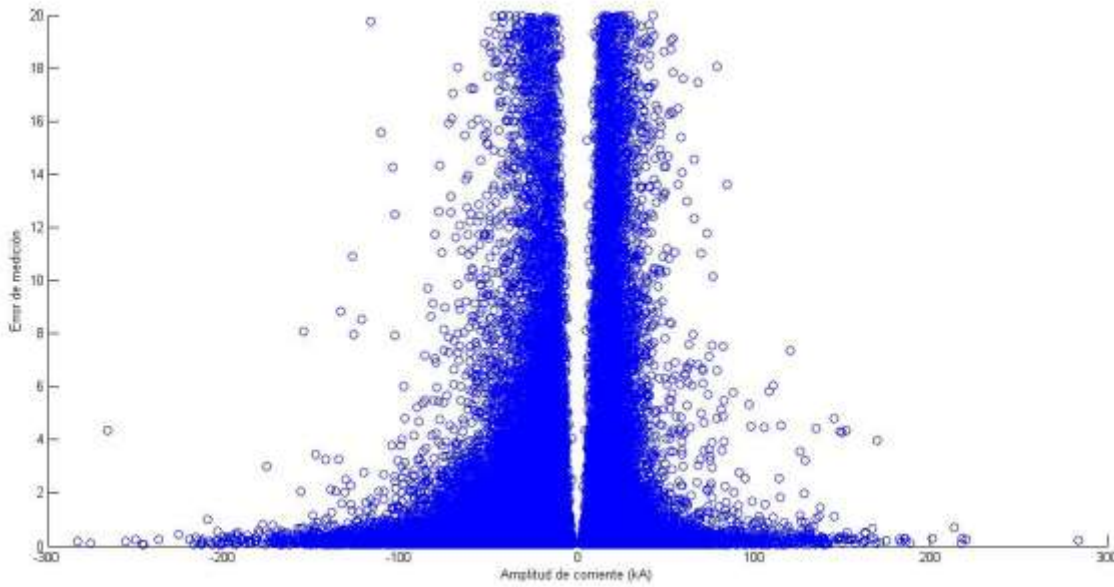


Figura 78. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Abril de 2012

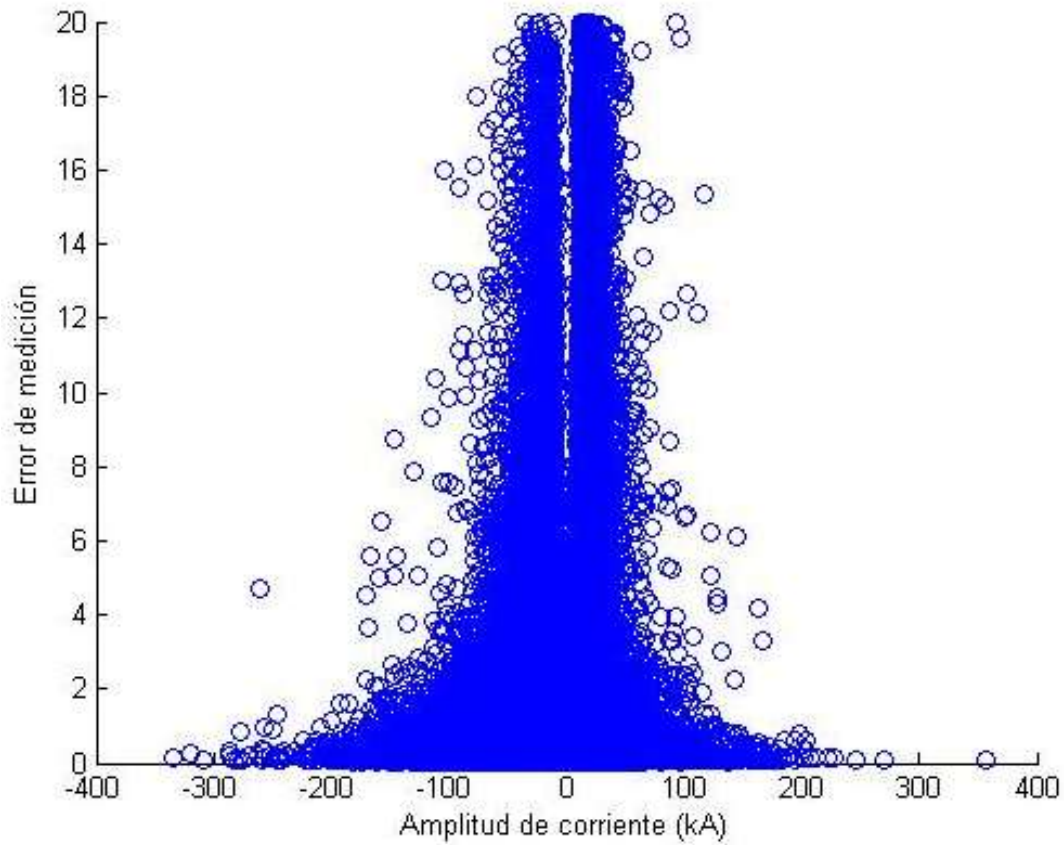


Figura 79. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Mayo de 2012

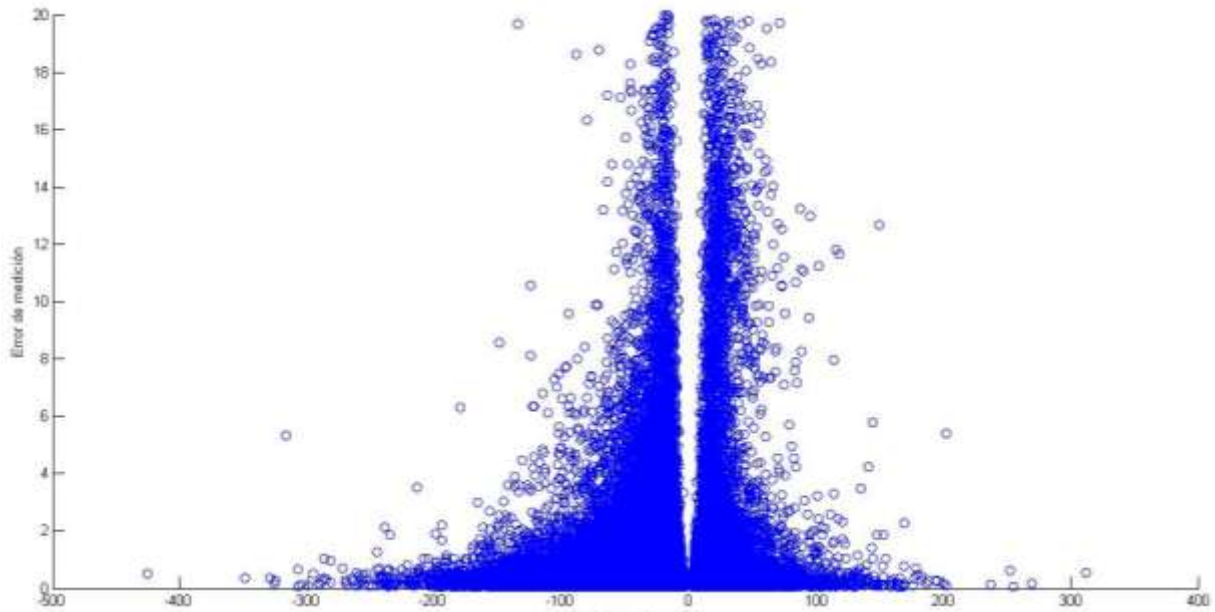


Figura 80. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Junio de 2012

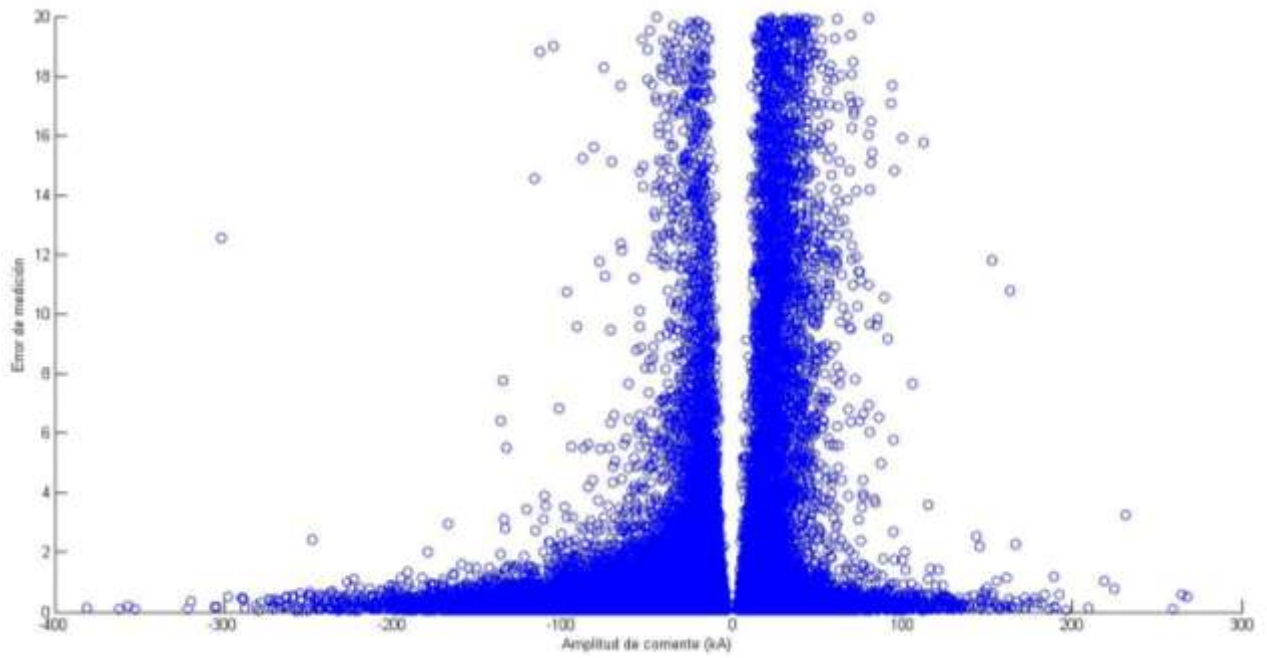


Figura 81. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Julio de 2012

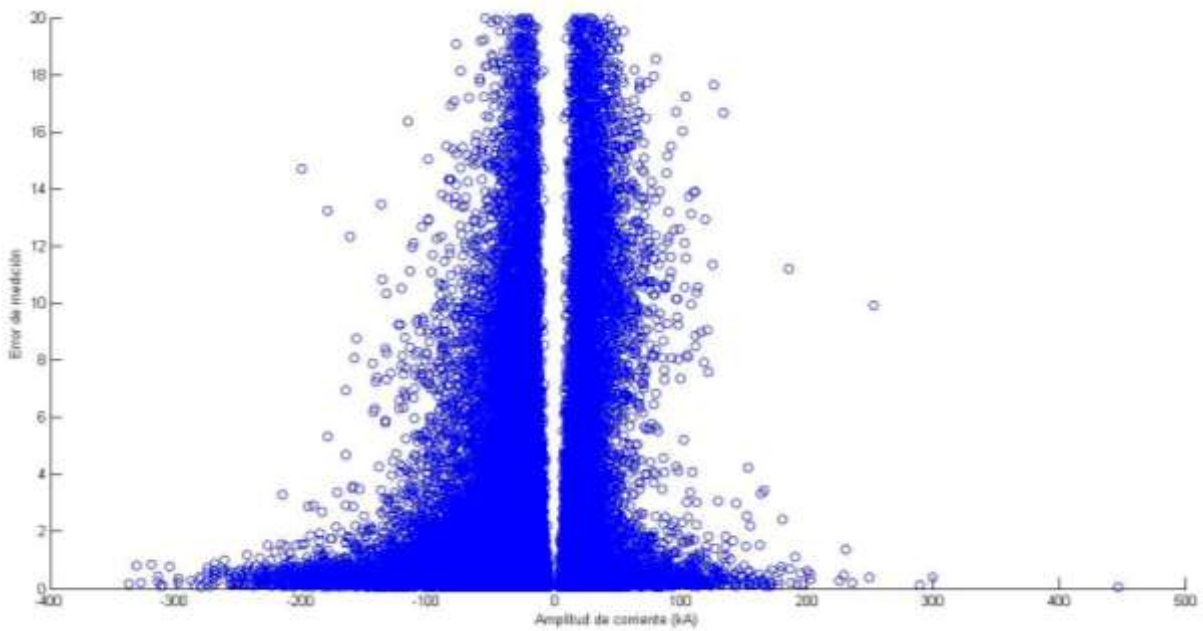


Figura 82. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Agosto de 2012.

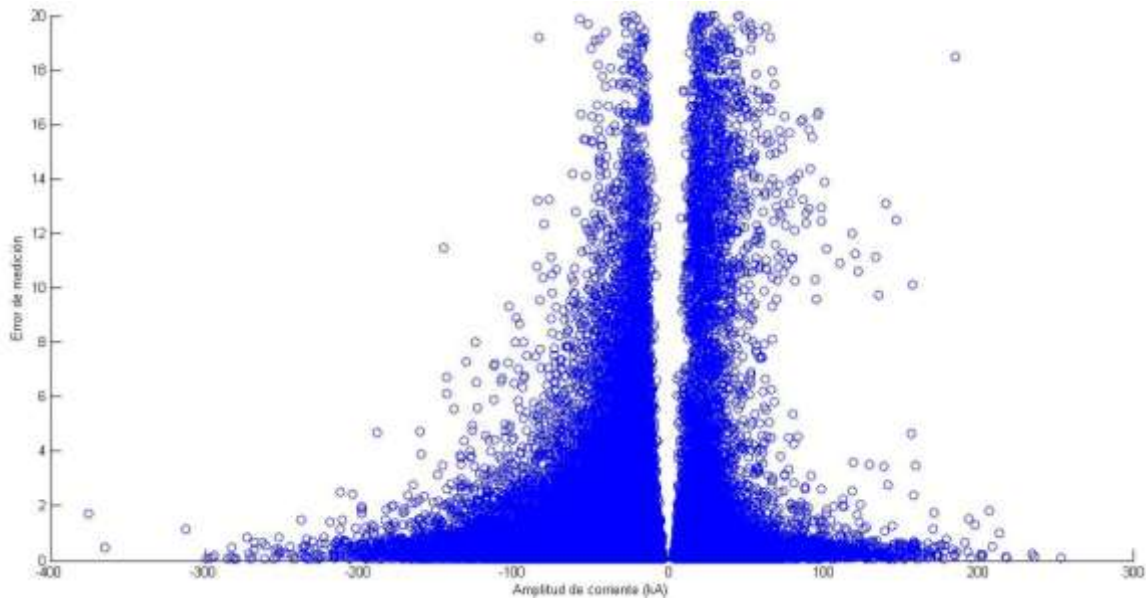


Figura 83. Relación de amplitud (kA) Vs. Error de medición para el mes de Septiembre de 2012



## APÉNDICE C: Mapa Colombiano Vs. Error en detección de LINET

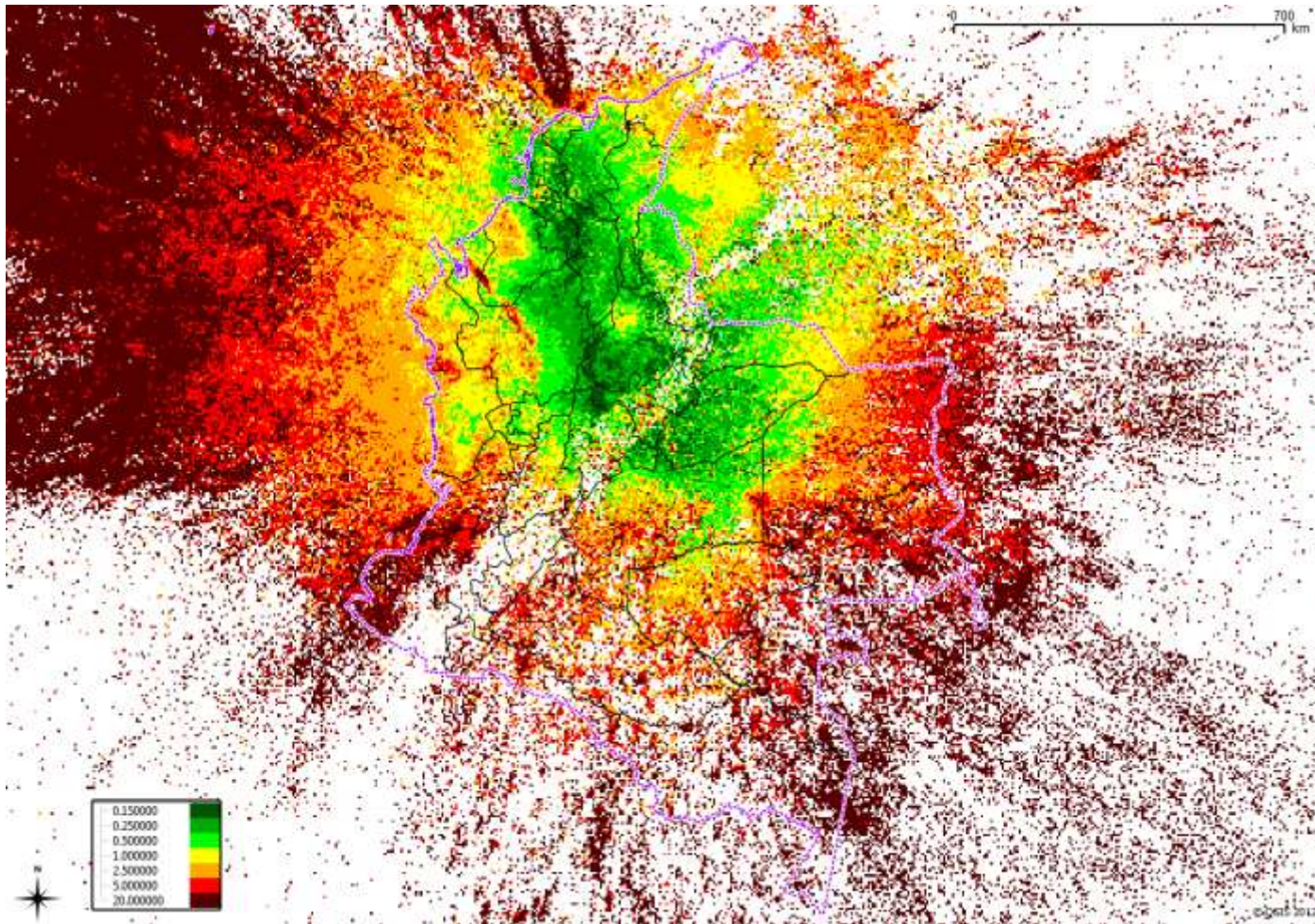


Figura 84. Comportamiento del Error 2D de LINET en Colombia<sup>45</sup>.

<sup>45</sup> Información suministrada por funcionarios de KERAUNOS y LINET en Colombia.

---

## APÉNDICE D: Bibliografía

- [1] H. Torres Sánchez, *El rayo: Mitos, leyendas, ciencia y tecnología*, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- [2] R. Pando, «Aspectos Básicos de las Descargas Atmosféricas,» 2005.
- [3] C. Younes Velosa, *Evaluación de parámetros del rayo con mediciones terrestres y satelitales*, Bogotá, Cundinamarca: Universidad Nacional, 2002.
- [4] L. d. J. Cardona y C. Y. Velosa, «Characterization of atmospheric discharges in El Valle de Aburra,» *IEEE*, 2008.
- [5] Keraunos, «Keraunos.co,» 01 01 2012. [En línea]. Available: [http://keraunos.co/index.php?option=com\\_content&view=article&id=71&Itemid=445](http://keraunos.co/index.php?option=com_content&view=article&id=71&Itemid=445). [Último acceso: 24 02 2013].
- [6] A. AASSIE ALI, «Time of Arrival Estimation for WLAN Indoor Positioning Systems using Matrix Pencil Super Resolution Algorithm,» *PROCEEDINGS OF THE 2nd WORKSHOP ON POSITIONING, NAVIGATION AND COMMUNICATION (WPNC'05) & 1st ULTRA-WIDEBAND EXPERT TALK (UET'05)*.
- [7] H. Torres Sanchez y D. Avila, «HIPOTESIS DE INVESTIGACIONES SOBRE VARIACION ESPACIAL Y TEMPORAL EN LOS PARAMETROS DEL RAYO,» *Meteorología Colombiana*, vol. 2, n° ISSN-0124-6984, pp. 3-8, 2000.
- [8] H. Torres Sánchez, *Protección contra rayos*, primera ed., vol. 1, Bogotá, Cundinamarca: Universidad Nacional de Colombia, 2008.
- [9] T. G. Chronis, «Evaluation of a Long-Range Lightning Detection Network With Receivers in Europe and Africa,» *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, vol. 44, n° 6, p. 1506, 2006.
- [10] R. B. Henares, *Protección contra rayos*, U. D. VALLADOLID, Ed., VALLADOLID: UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, 2010.
- [11] D. Ruiz y C. Torralba, «A new concept in lightning parameters measurement,» *Journal of Electrostatics*, n° 67, p. 496–500, 2009.
- [12] K. L. Cummins, «The U.S. National Lightning Detection Network and Applications of Cloud-to-Ground Lightning Data by Electric Power Utilities,» *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY*, vol. 40, n° 4, pp. 465 - 480, 1998.
- [13] V. A. Rakov y M. A. Uman, *Lightning Physics and Effects*, C. U. Press, Ed., Florida,

- 2003.
- [14] V. A. Rakov y G. R. Huffines, «Return-stroke multiplicity of negative cloud-to-ground lightning flashes,» *Journal of Applied Meteorology*, vol. 42, nº 10, pp. 1455-1462, 2003.
- [15] C. Younes Velosa y H. Torres Sánchez, Caracterización de los parámetros del rayo en Colombia, Manizales: Universidad Nacional, 2010.
- [16] C. Younes Velosa y Ó. G. Duarte Velasco, Correlación de parámetros del rayo con características geográficas y meteorológicas, Manizales: Universidad Nacional, 2010.
- [17] J. F. Correoso y E. Hernández, «A 3-year study of cloud-to-ground lightning flash characteristics of Mesoscale convective systems over the Western Mediterranean Sea,» *Atmospheric Research*, nº 79, pp. 89-107, 2006.
- [18] R. E. Bürgesser, M. G. Nicora y E. E. Ávila, «Characterization of the lightning activity of “Relámpago del Catatumbo”,» *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 77, nº 0, pp. 241 - 247, 2012.
- [19] W. A. Lyons, «Final Report: Sensor System to monitor Cloud - to - Stratosphere Electrical Discharges,» National Aeronautics and Space Administration (NASA), Florida, 1996.
- [20] NATIONAL SEVERE STORMS LABORATORY (NOAA), «NATIONAL SEVERE STORMS LABORATORY (NOAA),» NOAA, 11 May 2012. [En línea]. Available: <http://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/lightning/types/>. [Último acceso: 11 May 2013].
- [21] CIGRE WG 33.01, Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines, Technical Brochure ed., CIGRE, 1991.
- [22] F. Heidler, F. Zischank, Z. Flisowski, C. Bouquegneau y C. Mazzetti, «Parameters of Lightning Current Given in IEC 62305 Background, Experience and Outlook,» *International Conference on Lightning Protection*, vol. 29, 23 - 26 June 2008.
- [23] G. Carrasco H., «LIGHTNING PERFORMANCE OF TRANSMISSION LINE LAS CLARITAS – SANTA ELENA UP 230 KV,» *International Conference on Power Systems Transients*, 2003.
- [24] L. a. I. S. o. t. T. Co, «Parameters of Lightning Strokes: A Review,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 20, nº 1, pp. 346 - 358, 2005.
- [25] G. Diendorfer, W. Schulz, V. Rakov, F. De La Rosa, A. M. Hussein y F. Rachidi,



- «Review of CIGRE Report “Cloud-to-Ground Lightning Parameters Derived from Lightning Location Systems – The Effects of System Performance”,» *Review of CIGRE Report*, 2009.
- [26] J. M. L. Dahl, H. Höller y U. Schumann, «Modeling the Flash Rate of Thunderstorms. Part I: Framework,» *Monthly Weather Review*, vol. 139, n° 10, pp. 3093-3111, 2011.
- [27] IEEE 998, IEEE Guide for Direct Lightning Stroke Shielding of Shielding of Substations, 1996.
- [28] National Lightning Safety Institute, «Measured Lightning Activity Worldwide,» National Lightning Safety Institute, [En línea]. Available: [http://www.lightningsafety.com/nlsi\\_info/world-lightning-activity.html](http://www.lightningsafety.com/nlsi_info/world-lightning-activity.html). [Último acceso: 10 May 2013].
- [29] H. Torres-Sánchez, «¿Que Rayos Sabemos?,» *REV. ACAD. COLOMB. CIENC*, vol. XXXIV, n° 131, pp. 193-208, 06 2010.
- [30] V. Bourscheidt, «The influence of topography on the cloud-to-ground lightning density in South Brazil,» *Atmospheric Research*, n° 91, pp. 508 - 513, 2009.
- [31] M. Gijben, «The lightning climatology of South Africa,» *South African Journal of Scienc*, vol. 108, n° 3, pp. 1-10, 2012.
- [32] S. F. Abarca, K. L. Corbosiero y T. J. Galarneau, «An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth,» *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, n° 18, 2010.
- [33] S. A. Prentice y D. Mackerras, «The ratio of cloud to cloud-ground lightning flashes in thunderstorms.,» *Journal of Applied Meteorology*, vol. 16, n° 5, pp. 545 - 550, 1977.
- [34] IEEE 1243, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE, Ed., New York: IEEE Standards Board, 1997.
- [35] R. E. Orville, G. R. Huffines y W. Burrows, «The North American Lightning Detection Network (NALDN)-Analysis of Flash Data,» *Monthly Weather Review of American Meteorological Society*, vol. 139, n° 5, pp. 1305-1322, 2011.
- [36] S. D. Rudlosky y H. E. Fuelberg, «Pre- and Postupgrade Distributions of NLDN Reported Cloud-to-Ground Lightning Characteristics in the Contiguous United States,» *Monthly Weather Review*, vol. 138, n° 11, pp. 3623-3633, 2010.
- [37] M. A. Uman, The lightning discharge, Toronto: Courier Dover Publications, 2001.
- [38] E. P. R. Institute, Transmission Line Reference Book 345 kV and above, Segunda ed.,



- 1987.
- [39] A. M. Mousa y K. D. Srivastava, «The implications of the electrogeometric model regarding effect of height of structure on the median amplitudes of collected lightning strokes,» *IEEE transactions on Power Delivery*, vol. 4, n° 2, pp. 1450-1460, 1989.
- [40] C. F. Ramirez, *Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión*, Medellín, Antioquia: Mejia Villegas S.A., 1991.
- [41] V. Cooray, *The Lightning Flash*, London: Institution of Engineering and Technology (IET), 2008.
- [42] N. Abdullah, «Implementation and Use of Lightning Detection Network in Malaysia,» *2nd IEEE International Conference on Power and Energy*, 2008.
- [43] N. I. Petrov, «Quantification of the Probability of Lightning Strikes to Structures Using a Fractal Approach,» *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 10, n° 4, pp. 641 - 654, 2003.
- [44] K. W. Forsythe, «Utilizing Waveform Features for Adaptive Beamforming and Direction Finding with Narrowband Signals,» *Lincoln Laboratory Journal*, vol. 10, n° 2, pp. 99 -126, 1997.
- [45] B. Siuru, «The national lightning detection network,» *Electronics Now*, vol. 69, n° 8, pp. 17-18, 1998.
- [46] H. Höller, H. Betz y K. Schmidt, «Lightning characteristics observed by a VLF/LF lightning detection network (LINET) in Brazil, Australia, Africa and Germany,» *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 9, p. 7795–7824, 2009.
- [47] S. Vahabi Mashak, «Simulation of Lightning Flash and Detection Using Time of Arrival Method Based on Four Broadband Antennas,» *IEEE computer society*, 2011.
- [48] F. Rachidi y J. Bermudez, «On the estimation of lightning peak currents from measured fields using lightning location systems,» *Journal of Electrostatics*, n° 60, p. 121–129, 2004.
- [49] J. A. López Trujillo, *METODOLOGÍA PARA PREDICCIÓN DE TORMENTAS ELÉCTRICAS A PARTIR DE MEDICIONES DE CAMPO ELECTROSTÁTICO AMBIENTAL Y SISTEMAS DE LOCALIZACIÓN DE RAYOS EN ZONA MONTAÑOSA*, Manizales: Universidad Nacional, 2011.
- [50] H. D. Betz, K. Schmidt, P. Laroche, P. Blanchet, W. P. Oettinger, E. Defer, Z. Dziewit y J. Konarski, «LINET—An international lightning detection network in Europe,»

- Atmospheric Research*, vol. 91, n° 4, pp. 564 - 573, 2009.
- [51] C. Hugh y R. Blakeslee, *Science Data Validation Plan for the Lightning Imaging Sensor (LIS)*, Huntsville: NASA, 2000.
- [52] V. Shostak, «Electric field within lightning protection volume in presence of a descending leader,» *Electric Power Systems Research*, n° 85, p. 82– 89, 2012.
- [53] E. B. Y. R. N.L. Aleksandrov, «Initiation and development of first lightning leader: The effects of coroneae and position of lightning origin,» *Atmospheric Research*, vol. 76, n° 4, pp. 307 - 329, July 2005.
- [54] O. Pinto y N. N. Solorzano, «Return stroke peak current observations of negative natural and triggered lightning in Brazil,» *Atmospheric Research*, vol. 01300, p. 10, 2005.
- [55] R. E. Walpole, R. H. Myers y S. L. Myers, *Probabilidad y Estadística para Ingenieros*, Sexta ed., P. E. Roig Vasquez, Ed., Mexico DF, Mexico: Prentice Hall, 1998, p. 752.
- [56] G. Hernandez, *Cámara CCD y señal de video*, Puebla: Universidad de las Americas, 2009.
- [57] G. Calderón, «Sistema de Correlación de Parámetros de Descargas Atmosféricas con la Actividad Meteorológica en la Región Caribe Colombiana,» *Repositorio de articulos de grado universidad del Norte*, vol. 1, n° 1, pp. 1-4, 2012.
- [58] I. UGLEŠIĆ y J. HORVAT, «Establishment of a new lightning location system in Croatia,» *CIGRE C4 Colloquium on Lightning and Power System*, vol. 4, n° 1, pp. 1-12, 2010.
- [59] J. D. Pulgarín Rivera, «Propagation of LF and VLF Lightning electromagnetic waves: The ground effects. Applications to Lightning Locating Systems in Mountainous Regions,» Universidad Nacional, Manizales, 2013.
- [60] L. Yong, «Study on Lightning Parameters of Transmission Line Porch Based on Lightning Location System,» *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 2010.
- [61] T. A. Warner, K. L. Cummins y R. E. Orville, «Upward lightning observations from towers in Rapid City, South Dakota and comparison with National Lightning Detection Network data,» *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, vol. 117, n° 19, 2012.
- [62] L. Rivas Soriano y F. De Pablo, «Ten-year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula,» *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol.

- 67, p. 1632–1639, 2005.
- [63] Red Eléctrica de España, «La red eléctrica de alta tensión: Ahorro y Seguridad,» Red Eléctrica de España, Madrid, 2010.
- [64] M. Nayel, «Significant parameters affecting a lightning stroke to a horizontal conductor,» *Journal of Electrostatics*, nº 68, pp. 439 - 444, 2010.
- [65] D. Helman, «Catching lightning for alternative energy,» *Renewable Energy*, nº 36, pp. 1311-1314, 2011.
- [66] D. P. Santamaría, «¿Como Protegerse de las Descargas Electricas?,» *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, 06 2008.
- [67] E. A. Soto Ríos, CÁLCULO DE CAMPO ELECTROMAGNÉTICO PRODUCIDO POR RAYO PARA TERRENO NO PLANO Y SU EFECTO EN LAS TENSIONES INDUCIDAS EN LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN, U. Nacional, Ed., Manizales: Universidad Nacional, 2010.
- [68] S. Hidayat, «LIGHTNING CHARACTERISTICS ON JAVA ISLAND, OBSERVED BY LIGHTNING LOCATION NETWORK,» *High Voltage Engineering Symposium*, vol. 467, nº 467, pp. 22-27, 1999.
- [69] T. Yamada, A. Mochizuki y J. Sawada, «EXPERIMENTAL EVALUATION OF A UHV TOWER MODEL FOR LIGHTNING SURGE ANALYSIS,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, nº 1, 1995.
- [70] G. Diendorfer y W. Schulz, «Lightning Characteristics Based on Data from the Austrian Lightning Locating System,» *IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY*, vol. 40, nº 4, pp. 452 - 464, 1998.
- [71] B.-J. Kuk, H.-I. Kim, J.-S. Ha y H.-K. Lee, «Intercomparison Study of Cloud-to-Ground Lightning Flashes Observed by KARITLDS and KLDN at South Korea,» *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 50, nº 1, pp. 224-232, 2011.
- [72] A. T. Pessi y S. Businger, «The Impact of Lightning Data Assimilation on a Winter Storm Simulation over the North Pacific Ocean,» *Monthly Weather Review*, vol. 10, nº 3177-3195, p. 137, Octubre 2009.
- [73] A. T. Pessi y S. Businger, «Relationships among Lightning, Precipitation, and Hydrometeor Characteristics over the North Pacific Ocean,» *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 48, nº 4, pp. 833-848, April 2009.
- [74] A. T. Pessi, S. Businger, K. L. Cummins, N. W. S. Demetriades, M. Murphy y B. Pifer,

- «Development of a Long-Range Lightning Detection Network for the Pacific: Construction, Calibration, and Performance,» *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 26, n° 2, pp. 145-163,165-166, Feb 2009.
- [75] M. J. Murphy y R. L. Holle, «Where Is the Real Cloud-to-Ground Lightning Maximum in North America?,» *Weather and Forecasting*, vol. 20, n° 2, pp. 125-133, April 2005.
- [76] R. E. Orville, G. R. Huffines, W. R. Burrows, R. L. Holle y K. L. Cummins, «The North American lightning detection network (NALDN)--first results: 1998-2000,» *Monthly Weather Review*, vol. 130, n° 8, p. 2098, August 2002.
- [77] D. Lanken, «Struck by lightning: primal and powerful, lightning is one of nature's gravest hazards,» *Canadian Geographic*, Julio 2000.
- [78] N. Flanagan, «Data from national network traveling at lightning speed [Canada's first lightning detection network],» *Technology in Government*, vol. 4, n° 10, 4 Oct 1997.
- [79] Y. Yair, B. Lynn, C. Price, V. Kotroni, K. Lagouvardos, E. Morin, A. Mugnai y M. d. Carmen Llasat, «Predicting the potential for lightning activity in Mediterranean storms based on the Weather Research and Forecasting (WRF) model dynamic and microphysical field,» *Journal of Geophysical Research. Atmospheres*, vol. 115, n° 4, p. Washington, 2010.
- [80] International Electrotechnical Commission, IEC 62305-4 (Protection Against Lightning), Switzerland: IEC, 2006.
- [81] International Electrotechnical Commission, IEC 62305 - 1 (General Principles), Switzerland: IEC, 2010.
- [82] E. Olarte, I. Santoyo, D. Aranguren, E. Pérez, J. Herrera y H. Torres, «Sistema Colombiano de Información de Tormentas Eléctricas Soportado en RENATA,» RENATA, Bogotá, 2010.
- [83] AT3W (Aplicaciones tecnológicas), «Sistemas de protección Interna,» AT3W, Valencia, 2012.
- [84] Y. Kuleshov, «Thunderstorm and Lightning Climatology of Australia,» de *Modern Climatology*, INTECH, 2012.
- [85] L. Rodríguez Ojeda, Probabilidad y Estadística para Ingenieros, Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), 2007.