

Estudio de la interacción de rayos con estructuras elevadas en Colombia con base en información
de la red DABEIBA-LMA

Brandon Steven Ardila Murillo

Trabajo de Grado para Optar al Título de Magíster en Ingeniería Eléctrica

Director

Edison Andrés Soto Ríos

Doctor en Ingeniería - Línea Automática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Maestría en Ingeniería Eléctrica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Primeramente, dedico este trabajo a Dios, que con su inmenso amor y misericordia ha iluminado mi camino y me ha traído hasta aquí. Toda la gloria a Él. ¡Mashallah!

A mi madre por su incondicionalidad, porque con su resiliencia y amor me inspira y me bendice cada día.

A mi hermana Sara que es mi motor y mi motivación en todo lo que emprendo. Porque su vida es un milagro que me mantiene agradecido.

A mis familiares que en todo momento se preocupan por mí y me dan su apoyo, consejos e invaluable compañía.

A mis amigos por su hermandad, confianza y lealtad; por permanecer a lo largo de todos estos años.

A todas las personas que hicieron parte de este proceso, mil gracias.

Agradecimientos

A Dios primeramente por darme la vida y la oportunidad de crecer como profesional.

A mi director de tesis, mentor, colega y amigo, profesor Edison Soto por la confianza que depositó en mí, por encaminarme hacia la investigación y por todas sus enseñanzas.

Al profesor Diego Del Río por sus asesorías en cuanto a la variación de los parámetros del rayo.

A la escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones E3T por darme la oportunidad de ejercer como docente.

A mi alma máter la Universidad Industrial de Santander por la financiación a lo largo de la maestría.

A la Universitat Politècnica de Catalunya por trabajar en conjunto temas relacionados con la red LMA.

A la empresa Keraunos S.A.S. por suministrarnos la información de la red LINET.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen.....	15
Introducción	18
Descripción general del trabajo de investigación.....	20
1.1 Planteamiento del problema.....	20
1.2 Justificación	21
1.3 Objetivos	23
1.3.1 Objetivo general.....	23
1.3.2 Objetivos específicos	23
1.4 Estructura del documento	23
1.5 Productos académicos	24
1.5.1 Artículos científicos	24
1.5.2 Ponencias	25
Marco teórico	26
2.1 Mecanismo de formación de una descarga atmosférica	26
2.2 Actividad de rayos en Colombia.....	27
2.3 Sistema Lightning Mapping Array – LMA	30
2.5 Observaciones de rayos empleando el sistema LMA	32
2.6 Interacción de rayos con estructuras elevadas	34

Estudios previos	37
3.1 Resumen.....	38
1.2 Introducción	39
1.3 Metodología	43
1.3.1 Zona de estudio	43
1.3.2 Datos y software	44
1.3.3 Procesamiento	44
1.3.4 Determinación de la DDT	45
1.4 Resultados	45
1.4.1 Variación espacial.....	45
1.4.2 Variación temporal.....	49
1.4.3 Multiplicidad.....	51
1.4.4 Corriente pico de la descarga de retorno.....	51
1.4.5 Densidad de Descargas a Tierra (DDT).....	53
1.5 Discusión.....	55
1.6 Conclusiones	58
Metodología para la ubicación de Hotspots.....	60
4.1 Resumen.....	60
1.7 Introducción	61
1.8 Metodología	64

4.3.1 Base de datos: Red Colombiana de Detección Total de Rayos con tecnología LINET	64
4.3.2 Procesamiento de datos de la Red LINET	66
4.3.3 Estructuras elevadas, clasificación y radio de influencia.....	66
4.3.4 Localización de impactos y recuadros de 600 m de lado en los municipios a analizar	67
4.3.5 Determinación del total de impactos por cuadrícula y por estructura	68
4.4 Resultados	68
4.4.1 Estructuras elevadas	68
4.4.2 Hotspots	75
4.5 Conclusiones	79
Interacción de rayos con estructuras elevadas en zonas tropicales.....	81
5.1 Resumen.....	81
1.9 Introducción	82
1.10 Metodología	86
1.10.1 Determinación de la estructura de carga	86
1.10.2 Visualización de datos.....	88
1.10.3 Red Colombiana de Detección Total de Rayos LINET	89
1.10.4 Análisis tiempo-distancia de descargas (velocidad de propagación)	90
1.11 Resultados	90
1.11.1 Tormenta del 23 de noviembre de 2018.....	90

5.4.2. Tormenta del 27 de noviembre de 2018	100
1.12 Discusión.....	111
1.13 Conclusiones	114
1.14 Resumen.....	116
1.15 Introducción	117
1.16 Metodología	119
1.16.1 Estructuras de estudio.....	119
1.16.2 Estructuras de carga de nubes de tormenta	120
1.16.3 Interacción de rayos	122
1.17 Resultados	123
1.17.1 Estructuras con mayor interacción	123
1.17.2 Estructuras de carga eléctrica.....	124
1.17.3 Caracterización de descargas	126
1.18 Conclusiones	131
Parámetros para el diseño de protecciones contra rayos en zonas tropicales.....	132
1.1 Resumen.....	132
1.2 Introducción	132
1.3 Metodología	135
1.3.1 Zona de estudio	135
1.3.2 Datos	136
1.3.3 Estructuras elevadas y radio de influencia.....	137

1.3.4	Determinación de la DDT	138
1.3.5	Correlación entre la DDT y la altitud del terreno	140
1.3.6	Construcción del modelo	141
1.4	Resultados	141
1.4.1	Flashes en estructuras elevadas.....	141
1.4.2	Correlación entre la DDT y la altura del terreno	142
1.4.3	Formulación del modelo	144
1.4.4	Diagnóstico del modelo	146
1.5	Discusión.....	148
1.6	Conclusiones	149
	Conclusiones generales	151
	Referencias.....	154

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Municipios con mayor actividad de rayos en Santander.	46
Tabla 2. Municipios con menor actividad de rayos en Santander	48
Tabla 3. Actividad de rayos en los municipios del área metropolitana de Bucaramanga.	48
Tabla 4. Sitios de mayor valor de Densidad de Descargas a Tierra en Santander.....	55
Tabla 5. Estructuras con mayor número de impactos en Barrancabermeja-Yondó.....	72
Tabla 6. Impactos de rayo en estructuras y dentro del radio de inf entre noviembre de 2018 y 2019.	74
Tabla 7. Días de mayor cantidad de impactos en estructuras elevadas	74
Tabla 8. Sitios con mayor cantidad de impactos de rayo.....	77
Tabla 9. Resumen de resultados.....	113
Tabla 10. Corrientes de impactos en Estructuras Elevadas	131
Tabla 11. Estadísticas de la regresión	145

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Esquema de funcionamiento de una estación LMA	31
Figura 2. Mapeo de tormenta eléctrica usando la red LMA	34
Figura 3. Tipos de interacciones de descargas atmosféricas con estructuras elevadas.....	35
Figura 4. Relieve de Santander. Fuente: Sociedad Geográfica de Colombia, Atlas de Colombia, IGAC, 2002.....	47
Figura 5. Comportamiento de la incidencia de flashes nube tierra en Santander.	49
Figura 6. Cantidad de flashes nube tierra por meses de 2014 a 2016.	50
Figura 7. Cantidad de flashes nube tierra promedio por horas de 2014 a 2016.....	50
Figura 8. Multiplicidad de flashes nube tierra promedio anuales.	51
Figura 9. Corriente pico promedio de la descarga de retorno por mes.	52
Figura 10. Histograma de corrientes de descarga de retorno durante el periodo de estudio.	53
Figura 11. Mapa de la Densidad de Descargas a Tierra de los 3 años de estudio	54
Figura 12. Ubicación geográfica de las estaciones de la red LINET	65
Figura 13. Área de análisis empleada para encontrar hotspots	67
Figura 14. Ubicación geográfica de estructuras elevadas	69
Figura 15. Caracterización de estructuras elevadas según la cantidad de impactos de rayo recibidas	70
Figura 16. Estructuras elevadas con mayor número de impactos de rayo	71
Figura 17. Impactos de rayo en estructuras elevadas el 23 de noviembre de 18	73

Figura 18. Sitios con mayor cantidad de impactos de rayo en los municipios de Barrancabermeja y Yondó.....	75
Figura 19. Principales hotspots en Barrancabermeja y Yondó	77
Figura 20. Estructuras elevadas presentes en los sitios de mayor cantidad de impactos de rayo .	79
Figura 21. Ubicación de los sensores de la red Dabeiba - LMA en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, Santander.	85
Figura 22. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:12:43.689 y las 7:12:44.313 UTC.	88
Figura 23. Diez minutos de actividad de una tormenta mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:10:00 y 7:20:00 UTC.....	91
Figura 24. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:11:42,027 y las 7:11:42,417 UTC.	92
Figura 25. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 4.	94
Figura 26. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:11:00,974 y las 7:11:01,753 UTC.	95
Figura 27. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 6.	96
Figura 28. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:12:43,689 y las 7:12:44,313 UTC.	97
Figura 29. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 8.	98
Figura 30. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:14:14,353 y las 7:14:14,749 UTC.	99
Figura 31. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 10.	100

Figura 32. Diez minutos de actividad de una tormenta mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:00:00 y 10:10:00 UTC	101
Figura 33. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:01:26,617 y las 10:01:27,344 UTC.	103
Figura 34. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 13.	105
Figura 35. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:01:58,663 y 10:01:59,234.....	106
Figura 36. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 15.	107
Figura 37. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:02:06,843 y las 10:02:07,281 UTC.	108
Figura 38. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 17.	109
Figura 39. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:06:38,393 y las 10:06:39,193 UTC.	110
Figura 40. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 19.	111
Figura 41. Diagramas de cajas y bigotes para las alturas de iniciación y de propagación de los líderes mapeados en las tormentas del 23 y 27 de noviembre de 2018.	114
Figura 42. Estructuras elevadas dentro del radio de influencia de la red LMA.....	120
Figura 43. Determinación de la estructura de carga de nubes de tormenta a partir de líderes bidireccionales	121
Figura 44. Variación mensual de impactos de rayo en estructuras elevadas.	123
Figura 45. Estructuras con mayor interacción con rayos en la zona de estudio.	124
Figura 46. Gráfico de tiempo – distancia de un rayo que impacta en una estructura elevada.	125

Figura 47. Estructuras de carga de tormentas eléctricas en las que se registraron rayos en estructuras elevadas.	126
Figura 48. Histograma de alturas de iniciación de rayos que impactaron alguna estructura elevada.	127
Figura 49. Descarga individual mapeada el 23 de noviembre de 2018 a las 07:05: 56,605 UTC.	128
Figura 50. Representación tridimensional de un rayo que impacta una estructura elevada.	129
Figura 51. Longitudes de líderes de rayos que interactuaron con estructuras elevadas.	130
Figura 52. Ubicación de la zona de estudio	135
Figura 53. Ubicación de las estructuras elevadas de estudio	137
Figura 54. Cuadrícula para el cálculo de la DDT	138
Figura 55. Subáreas en el área de estudio y su actividad de rayos	141
Figura 56. Número de flashes en estructuras de transmisión.....	142
Figura 57. Correlación entre la DDT y la altura del terreno	143
Figura 58. Variación de flashes como función de la DDT	147

Glosario

ASIM: Atmosphere-Space Interactions Monitor

COLLMA: Colombia Lightning Mapping Array

EE: Estructura Elevada

LIS: Lightning Imaging Sensor

LMA: Lightning Mapping Array

VHF: Very High Frequency

Resumen

Las estructuras elevadas son más propensas a recibir un mayor número de impactos de rayo. Este fenómeno natural se ha caracterizado a través del uso de redes de mapeo de rayos en el rango de muy alta frecuencia (VHF) con sistemas Lightning Mapping Array - LMA en estudios realizados principalmente en zonas templadas y por tanto no se conoce cómo es su interacción con estructuras elevadas ubicadas en regiones tropicales, lo que dificulta la validación de protecciones contra rayos de torres de transmisión y antenas de telecomunicaciones allí presentes.

Es importante caracterizar la interacción que existe con objetos de gran altitud que son frecuentemente impactados por rayos entendiendo que la protección contra descargas atmosféricas de estructuras elevadas resulta fundamental teniendo en cuenta que el 70% de las salidas de líneas de transmisión y la mayoría de daños en antenas de telecomunicaciones en Colombia son atribuibles a impactos de rayo y debido a que hasta el momento no se han realizado estudios de interacción de estructuras elevadas con información de redes de alta resolución como el LMA en zona tropical.

En este trabajo de investigación, con base en la información suministrada por la red DABEIBA-LMA, se investigó por primera vez cómo es la interacción de descargas atmosféricas con estructuras elevadas como torres de transmisión y antenas de telecomunicaciones ubicadas en el trópico. Para el desarrollo de la investigación se hallaron los sitios con mayor cantidad de impactos de rayo (hostpots) en la zona de influencia de la red y se determinará la existencia de estructuras elevadas presentes en ellos, así mismo, partiendo de la teoría del líder bidireccional, de las diferencias en la propagación de líderes y mediante la identificación de líderes ascendentes y descendentes, se encontró el mecanismo de impacto del rayo con las estructuras nombradas

anteriormente. Adicionalmente se planteó un modelo matemático para encontrar el número de impactos directos de rayo en estructuras de transmisión, lo anterior con el fin de aportar a parámetros de protección como la tasa de fallas por flameo inverso BFR.

Palabras clave

Actividad de rayos, parámetros de rayos, densidad de descargas a tierra GFD, hotspots, estructuras elevadas, red LINET, red LMA, interacción, líder de rayos, protección contra rayos, tasa de flameos inversos.

Abstract

Elevated structures are more likely to receive a greater number of lightning strikes. Studies conducted mainly in temperate zones have characterized this natural phenomenon using lightning mapping networks in the very high frequency (VHF) range with Lightning Mapping Array - LMA systems. Therefore, how it interacts with elevated structures in tropical regions needs to be discovered, making it difficult to validate the lightning protection of transmission towers and telecommunications antennas.

It is essential to characterize the interaction that exists with high-altitude objects that are frequently struck by lightning, understanding that the protection against atmospheric discharges of elevated structures is critical, taking into account that 70% of the outputs of transmission lines and the majority of damages in telecommunication antennas in Colombia are attributable to lightning strikes and because up to now no studies have been carried out on the interaction of elevated structures with information from high-resolution networks such as the LMA in the tropical zone.

In this research work, based on the information provided by the DABEIBA-LMA network, the interaction of atmospheric discharges with elevated structures such as transmission towers and telecommunications antennas located in the tropics was investigated for the first time.

For the development of the investigation, the sites with the greatest number of lightning strikes (hotspots) were found in the area of influence of the network, and the existence of elevated structures present in them will be determined, likewise, based on the theory of the bidirectional leader. The lightning strike mechanism with the previously named structures was found from the differences in the propagation of leaders and through the identification of ascending and descending leaders. Additionally, a mathematical model was proposed to see the number of direct lightning strikes in transmission structures, the above, to contribute to protection parameters such as the BFR inverse flashover failure rate.

Keywords

Lightning activity, lightning parameters, ground flash density GFD, hotspots, elevated structures, LINET network, LMA network, interaction, lightning leader, protection against lightning, back flashover rate.

Introducción

Las estructuras elevadas EE son más propensas a recibir impactos de rayo dado que responden (interactúan) con líderes ascendentes que se conectan a los líderes escalonados descendentes originados en las nubes de tormenta que se propagan a través de la atmósfera mediante procesos de ionización y causan uno o varios picos de corriente conocidos como descargas de retorno (Rakov & Uman, 2003). A su vez, estructuras que superan los 100 metros de elevación sobre su entorno son proclives a iniciar líderes ascendentes que pueden desencadenar descargas de retorno al alcanzar la estructura de carga de nubes de tormenta (Berger, 1967). Este fenómeno natural se ha caracterizado a través del uso de redes de mapeo de rayos en el rango de muy alta frecuencia (VHF) usando redes Lightning Mapping Array (LMA) en estudios realizados principalmente en zonas templadas como España, China y Estados Unidos (Fuchs & Rutledge, 2018; van der Velde & Montanyà, 2013; Zhang et al., 2010).

En 2018 se instaló en Barrancabermeja una red de mapeo de rayos denominada DABEIBA – LMA la cual está conformada por seis estaciones que garantizan un radio de alta eficiencia en la detección de 45 km. Esta red detecta fuentes en VHF emitidas por líderes de rayo al propagarse y emplea el método de tiempo de llegada (TOA) para representarlos en el tiempo y en el espacio, permitiendo por primera vez realizar el mapeo de líderes en el trópico de forma similar como se ha hecho recientemente en Europa.

Se espera que en el trópico los rayos interactúen de forma distinta con EE, y muestra de ello es que en estas regiones la mediana de la corriente de descarga alcanza los 45 kA (Torres-Sánchez, 2017), y por tanto, es importante caracterizar la interacción que existe con objetos de gran altitud como torres de transmisión, antenas de telecomunicaciones y otras estructuras las

cuales son frecuentemente impactadas por rayos. Debido a lo anterior en este trabajo de investigación, con base en la información suministrada por la red DABEIBA-LMA, se investiga por primera vez cómo es la interacción de descargas atmosféricas con EE como torres de transmisión y antenas de telecomunicaciones ubicadas en el trópico y se validan los parámetros de diseño que se tienen en cuenta para proteger estas estructuras frente a impactos de rayo.

Para el desarrollo de la primera parte de la investigación se propone una metodología basada en la ocurrencia temporal de impactos de rayo usando información de descargas a tierra suministrada por la red LINET con el fin de hallar los sitios de mayor actividad de rayos (hostpots) en la zona de influencia de la red LMA. Se determina para cada uno de ellos la existencia de EE y con base en ello se analiza la influencia de objetos de gran altura en la ubicación de un hotspot. En cuanto a la caracterización de la interacción, basados en mapeos de líderes de rayo realizados por la red LMA y partiendo de la teoría del líder bidireccional, de las diferencias en la propagación de líderes positivos y negativos y mediante la identificación de líderes ascendentes y descendentes, se diseñó una metodología que permite asociar a cada evento de rayo mapeado por la red LMA un impacto a tierra registrado por la red LINET. Con lo anterior se encontró el mecanismo de impacto de rayos en EE previamente halladas, esto es, naturaleza ascendente o descendente, longitudes y velocidades de propagación de líderes, polaridades, cantidad de impactos, corrientes de descarga de retorno y altura de los centros de carga (bipolar o tripolar).

Con esta investigación se validan parámetros importantes a tener en cuenta en el diseño de sistemas de protección como la cantidad de flashes en estructuras elevadas el cual afecta directamente el cálculo de la tasa de fallas por flameo inverso BFR.

Descripción general del trabajo de investigación

1.1 Planteamiento del problema

Mientras que en las tormentas de invierno en latitudes medias las estructuras elevadas inician líderes ascendentes formando puntos de muy alta actividad de rayos, las regiones tropicales como Colombia presentan densidades de descargas a tierra muy elevadas y por tanto no resulta evidente la identificación de estos hotspots y tampoco la influencia de estructuras elevadas allí ubicadas en la cantidad de impactos de rayo. Lo anterior dado que estos sitios se han determinado usando metodologías basadas en la ocurrencia espacial de rayos y no en la temporal. Además, debido a que la mayoría de estudios de rayos utilizando redes de mapeo de alta resolución como el LMA se ha realizado en regiones templadas, no se conoce cómo es su interacción con estructuras elevadas ubicadas en regiones tropicales, lo que dificulta la validación de protecciones contra rayos de las mismas.

Por estas razones en este trabajo se investiga la interacción de rayos con estructuras elevadas ubicadas en zonas tropicales usando el sistema avanzado de alta resolución Lightning Mapping Array (LMA) y se da respuesta a las siguientes preguntas de investigación: ¿Cómo es la interacción de los rayos con estructuras elevadas (torres de telecomunicaciones y torres de transmisión) en zona tropical? ¿Se deben proteger de manera diferente las estructuras elevadas ubicados en una zona tropical como la de Colombia? En las hipótesis se estima lo siguiente:

- La estructura elevada responderá a los líderes descendentes procedentes de la nube con líderes ascendentes de captura.
- La conexión de los líderes ascendentes iniciados por la torre con los líderes descendentes de la nube será favorecida por la carga eléctrica de estos últimos. Se espera que líderes asociados a potenciales mayores produzcan impactos a la torre con mayor corriente.

- La torre puede iniciar líderes ascendentes como respuesta a impactos de rayos cercanos. Por ejemplo, impactos de rayos positivos a tierra cercanos a la nube neutralizan carga positiva (resultando la nube con mayor carga negativa) favoreciendo el inicio de líderes ascendentes en las torres elevadas.

1.2 Justificación

En el área de estudio correspondiente a los municipios de Barrancabermeja y Yondó hay una importante presencia de estructuras elevadas como antenas de telecomunicaciones y torres de transmisión, estas últimas permiten transportar la energía necesaria para las actividades de extracción de crudo en los diferentes campos petroleros presentes en la zona y tienen especial relevancia en el despacho nacional y en la confiabilidad del servicio de energía eléctrica puesto que la mayor parte de las torres de transmisión forman parte del Sistema de Transmisión Nacional STN y corresponden a líneas de extra alta tensión como Barranca–Comuneros 230 kV, Comuneros–La Cira 230 kV, Comuneros–Merilétrica 230 kV y de alta tensión como Barranca–Lizama 115 kV, Barranca–San Silvestre 115 kV, San Silvestre–Lizama 115 kV y Barranca–Puerto Wilches 115 kV.

La protección contra rayos de estructuras elevadas resulta fundamental teniendo en cuenta que según (Cruz Mosquera, 2015) entre 2010 y 2015 se reportaron 189 casos de daños físicos y fallas en sistemas eléctricos debido a impactos de rayo en estructuras o líneas de transmisión, que más del 40% de las pérdidas en la producción de petróleo en Colombia se deben a fallas causadas por rayos en sistemas de energía y que el 70% de las salidas de líneas de transmisión en Colombia son atribuibles a descargas atmosféricas (Mejía, 2005) que impactan directamente en la torre o en

los conductores, provocando la salida de estos activos ya sea por fallas en el apantallamiento cuando la descarga impacta los conductores de fase y causa fallas tipo serie y por flameo inverso cuando la descarga impacta en el cable de guarda y la onda de corriente fluye a través de la impedancia de puesta a tierra de la torre más cercana, lo que aumenta la diferencia de potencial entre el brazo de la torre y los conductores de fase que excede la tensión disruptiva del aislador provocando flameo (Torres & Castaño, 1991). Así mismo las instalaciones de repetidores, los cables de potencia y los cables coaxiales de las antenas de telecomunicaciones son propensos a sufrir sobretensiones inducidas por rayos. Éstos tienen parte de su trazado por el exterior, lo que los hace aún más propensos a inducir sobretensiones. En segundo lugar, los cables de alimentación pueden también ser la vía de propagación de las sobretensiones transitorias dado que al tener una longitud de cable muy larga el grado de inducción es muy elevado. Además, los conductores pueden transferir un segundo tipo de sobretensión llamadas sobretensiones permanentes, que corresponden a una ampliación superior al 10% de la tensión eficaz de la red durante un periodo de tiempo indefinido (Ferrando Miguel; Valero Alejandro, 2005). Las antenas de comunicaciones suelen estar ubicadas en zonas de alta exposición. Su altura, relieve irregular y su naturaleza metálica provocan una alta atracción a los impactos directos del rayo y cuando esto sucede, la energía propia del rayo no sólo provoca sobretensiones inducidas, sino también conducidas, las cuales son mucho más intensas.

Luego por lo anterior y teniendo en cuenta que hasta el momento no se han caracterizado descargas atmosféricas en zonas tropicales usando redes de mapeo de rayos en alta resolución justifica que se realice una investigación para validar los parámetros que se deben tener en cuenta en la protección contra rayos de las estructuras nombradas

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Investigar la interacción de rayos con estructuras elevadas ubicadas en zonas tropicales usando el sistema avanzado de alta resolución Lightning Mapping Array (LMA).

1.3.2 Objetivos específicos

- Establecer una metodología que permita identificar los sitios con mayor actividad de rayos (hotspots) en la zona de influencia de la red DABEIBA-LMA.
- Encontrar el tipo de respuesta de estructuras elevadas tales como torres de transmisión y antenas de telecomunicaciones, ante la propagación de líderes de rayo.
- Validar los parámetros que se consideran para el diseño de protecciones contra rayos de estructuras elevadas ubicadas en zona tropical.

1.4 Estructura del documento

Este trabajo se divide en seis capítulos. El capítulo 1 establece la descripción de la investigación en cuanto a planteamiento del problema, justificación, objetivos y productos académicos obtenidos. El capítulo 2 presenta a modo de marco teórico los conceptos principales sobre los cuales se construyó esta tesis. El capítulo 3 presenta los resultados de un trabajo de investigación previo realizado en la zona de estudio de esta tesis. Con el fin de abordar el primer objetivo del trabajo, el capítulo 4 muestra la metodología diseñada para encontrar sitios de alta actividad de rayos o Hotspots. En cuanto al desarrollo del segundo objetivo el capítulo 5 se divide en dos partes, en la primera se determina la estructura de carga eléctrica de nubes de tormenta y en la segunda se caracteriza la interacción de rayos con estructuras elevadas. Con respecto al tercer

objetivo, el capítulo 6 presenta un modelo para determinar el número de flashes en estructuras de transmisión el cual se usa para calcular la tasa de fallas por flameo inverso. Finalmente, en el capítulo 7 se establecen las conclusiones generales del trabajo de investigación.

1.5 Productos académicos

1.5.1 Artículos científicos

- Ardila Murillo, B. S., & Soto Ríos, E. A. (2022). Metodología para identificar zonas y estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayos en Barrancabermeja-Yondó. *Tecnura*, 26(73). <https://doi.org/10.14483/22487638.17679>
- Ardila Murillo, B. S., Soto Ríos, E. A., Argüello Barbosa, D., Tello Rodríguez, H., López Trujillo, J., & Montanyà, J. (2022). Análisis de estructuras de carga de dos tormentas eléctricas registradas por la red Lightning Mapping Array en el Magdalena Medio colombiano. *Ingeniería*, 27(2), e17925. <https://doi.org/10.14483/23448393.17925>
- Ardila Murillo, B. S., Soto Ríos, E. A., & Velandia López, K. A. . (2022). Actividad de rayos en el departamento de Santander entre 2014 y 2016. *Ingeniería*, 26(3), 419–435. <https://doi.org/10.14483/23448393.17585>
- J. . Mora, J. . Rojas-Avellaneda, B. S. Ardila-Murillo, y E. . Soto-Ríos, «Determinación de zonas y estructuras elevadas con la mayor cantidad de impactos de rayos», *TecnoL.*, vol. 25, n.º 54, p. e2376, ago. 2022. <https://doi.org/10.22430/22565337.2376>

1.5.2 Ponencias

- Ardila, B., Soto, E., Mora, J., Rojas, J. (2021). Identification of areas and elevated structures with the greatest amount of lightning impacts (Hotspots). Simposio Internacional Sobre Calidad de La Energía Eléctrica (X SICEL).
- Ardila, B., Soto, E., López, J., Montanyà, J. (2022). Lightning interaction with tall structures in tropical zones. 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2022).
- Ardila, B., Soto, E., Zamora, J. (2023). Modeling lightning flashes in transmission structures. International Conference on Power Systems Transients (IPST 2023)

Marco teórico

2.1 Mecanismo de formación de una descarga atmosférica

Las descargas atmosféricas se inician entre regiones de carga en nubes de tormenta cuando se tienen condiciones de campo eléctrico que favorecen la formación y propagación de streamers corona desde las partículas de agua suspendidas en la atmósfera (Initial breakdown). Estos procesos de streamers suceden secuencialmente hasta que se logra una mejora del campo eléctrico necesaria para iniciar el líder escalonado (Stepped leader), un canal de plasma cargado negativamente con un gradiente de potencial que excede el umbral de disrupción propiciando la ionización del aire circundante en pasos escalonados a $V_{prom}=2\times 10^5$ m/s. El líder crea un camino conductor entre la nube y la tierra y distribuye parte de la carga de la nube a lo largo del canal. A medida que este se acerca al suelo, el campo eléctrico en la superficie de objetos sobresalientes aumenta hasta exceder la tensión disruptiva del aire por lo que se inicia un líder ascendente de conexión en respuesta al líder descendente (Attachment process).

Cuando ambos líderes se enlazan, el canal formado adquiere el potencial de la tierra y ocurre la descarga de retorno (Return stroke), una onda de campo eléctrico que asciende hasta la base de la nube de tormenta y drena parte de la carga almacenada en el canal y en las ramas del líder causando corrientes con una mediana de hasta 30 kA medida en zonas templadas (BERGER K, 1971). Esta onda calienta el canal y aumenta su presión, lo que hace que se expanda y provoque una radiación óptica y una onda de choque o trueno. A menudo el canal es atravesado por líderes en forma de dardo (Dart leader) que se propagan de forma continua a través de canal previamente ionizado por el líder escalonado a $V_{prom}=1\times 10^7$ m/s y producen un nuevo proceso de enlace, lo que causa descargas de retorno subsecuentes que registran corrientes entre 10 y 15 kA.

El componente impulsivo de la corriente en una descarga de retorno subsecuente es a menudo seguido por una corriente continua cuya fuente es la carga de la nube. Esta corriente presenta unos picos que se asocian con mejoras en la luminosidad del canal y son conocidos como procesos M (M component). Durante el intervalo de tiempo entre la finalización de la primera descarga de retorno y el inicio de un nuevo líder dardo ocurren en la nube los procesos J y K (J and K processes) que sirven para transportar carga negativa a lo largo del canal, pero no logran llegar al suelo y por tanto se conocen como intentos de líderes dardo. Los procesos J equivalen a una redistribución de la carga en la nube en respuesta a la anterior descarga de retorno y los procesos K son transitorios que ocurren durante los procesos J más lentos.

2.2 Actividad de rayos en Colombia

El rayo es un fenómeno electromagnético que puede afectar los sistemas eléctricos, electrónicos, de comunicaciones y el transporte, ocasionando pérdidas económicas, de bienes culturales, servicios públicos y vidas humanas (Rakov & Uman, 2003; Torres Sánchez, 2002). Estudios realizados han mostrado que los lugares de mayor ocurrencia del fenómeno del rayo en el mundo están ubicados en la zona tropical (Albrecht et al., 2016; Aranguren et al., 2014; Herrera et al., 2018; Torres, Perez, Younes, Aranguren, Montaña, et al., 2015; Torres, Perez, Younes, Aranguren, Montana, et al., 2015). Así mismo se ha mostrado que la actividad eléctrica atmosférica es elevada comparada con latitudes templadas y que los parámetros del rayo varían espacial y temporalmente (Torres, 2010).

Investigaciones demuestran que siete de los diez lugares con mayor actividad de rayos en Suramérica están en Colombia, donde su relieve y la convergencia de los vientos alisios del sureste

y del noreste favorecen la formación de tormentas (Albrecht et al., 2016), por lo que parámetros como la Densidad de Descargas a Tierra(DDT) toman valores de hasta 60 descargas/km²/año (Torres, Perez, Younes, Aranguren, Montana, et al., 2015). Diferentes estudios se han realizado para caracterizar los parámetros del rayo durante los últimos años. La publicación del primer mapa de nivel cerámico construido en 1974 entre el HIMAT (Hoy IDEAM) y la Universidad Nacional de Colombia permitieron identificar zonas de muy alta actividad como los valles del río Cauca y el Río Magdalena, el Catatumbo, y el Pacífico entre otros, luego, en 1990 se realizó una actualización teniendo en cuenta los promedios aritméticos multianuales entre 1974 y 1988 (Torres Sánchez, 2002).

En 1997 se instaló el primer sistema de localización de rayos LLS en Colombia (por sus siglas en inglés, Lightning Location System), conocido como Red Colombiana de Medición y Localización de Descargas Eléctricas Atmosféricas – RECMA (Torres Sánchez, 2002). La RECMA estuvo en operación durante el periodo de 1997 a 2001, y estaba conformada de 6 sensores LPATS (Lightning Position and Tacking System), que se instalaron en el territorio colombiano en lugares estratégicos con el fin de dar cubrimiento a la red de transmisión propiedad de ISA. Esta red detectaba rayos tipo nube-tierra (CG - Cloud to Ground) entregando datos de día, mes, año, minuto, segundo, milisegundo, latitud, longitud, y corriente de cada stroke detectado por la red (Pulgarín-Rivera et al., 2014; Torres Sánchez, 2002).

Con base en los registros de la RECMA se pudo realizar una primera caracterización del rayo, permitiendo obtener la variación espacio-temporal de parámetros como la DDT, polaridad, multiplicidad y valores de corriente pico en el territorio colombiano (Inampué et al., 2009). Uno de los resultados relevantes fue que zonas como la del Magdalena Medio, presentaban mayor

actividad eléctrica atmosférica y que algunas como en la sabana de Bogotá la actividad no era alta. La DDT obtenida con esta red en algunos lugares superaba los referentes internacionales que se tenían para el año 2002 (Herrera et al., 2018; Torres Sánchez, 2002). A pesar de los grandes aportes que se obtuvieron a través de la RECMA, esta presentaba algunas limitaciones en la localización de las descargas debido a que algunos sensores se encontraban alineados (Torres Sánchez, 2002). Luego en el año 2007 la red fue actualizada con los sensores LS7001 (por sus siglas en inglés LS - Lightning Sensor) y se convirtió en el Sistema de información de Descargas Atmosféricas – SID (Herrera et al., 2018). Esta red estaba en la capacidad de detectar rayos tipo CG y estuvo en operación hasta el año 2016.

En el año 2011 entró en operación en Colombia el sistema localizador de rayos, basado en tecnología LINET (Aranguren et al., 2013). Éste es un sistema compuesto de antenas de campo magnético que operan en la franja de baja frecuencia (LF) y muy baja frecuencia (VLF). Actualmente cuenta con más de 19 sensores distribuidos en todo el país. Ofrece errores de localización por debajo de los 300 metros y eficiencias de detección por encima de 90 % (Keraunos S.A.S, 2015). Con esta red se han podido construir mapas actualizados de la densidad de descargas a tierra a nivel nacional y se han hecho importantes estudios en los que se relaciona la variación de la DDT con la topografía, mostrándose que los sitios de más alta actividad coinciden con los pie de montes y los valles. Adicionalmente existe una considerable dependencia de la actividad de las tormentas con variaciones de altitud, donde la DDT crece hasta valores máximos a 1000 m.s.n.m y decrece a partir de este valor (Aranguren et al., 2014).

2.3 Sistema Lightning Mapping Array – LMA

Gracias al mejoramiento en las técnicas de detección de tormentas eléctricas, en la actualidad muchos parámetros derivados de la actividad de rayos se vienen caracterizando con una alta resolución temporal y espacial. Una de estas técnicas se basa en el mapeo de radiaciones electromagnéticas producidas por rayos en rangos de muy alta frecuencia (Very High Frequency - VHF) basado en métodos de interferometría. En la actualidad, uno de los sistemas de mapeo VHF más reconocido (por su desarrollo altamente científico y experimental), es el sistema Lightning Mapping Array - LMA (Rison et al., 1999a). El LMA fue desarrollado en la Universidad de New Mexico Tech, el cual detecta radiaciones en VHF (típicamente entre 60 MHz a 66 MHz) de rayos en tres dimensiones y tiempo. Dichas radiaciones son producto de líderes de rayos propagándose a través de regiones eléctricamente activas durante una tormenta. Cada fuente de radiación de líderes de rayos se localiza a partir del método Time-of-Arrival (Cummins et al., 1998), obteniendo cada 100 micro-segundos la fuente de mayor umbral de potencia emitida. A su vez, cada emisión cuenta con una presión temporal de 50 ns. De esta forma, miles de fuentes de radiación pueden ser detectadas para así reconstruir temporal y espacialmente una descarga eléctrica atmosférica (Krehbiel et al., 2000; Rison et al., 1999a; Thomas et al., 2004). Cuando un evento de radiación impulsiva ocurre en la posición (x,y,z) en el momento t, el tiempo de llegada de la señal a una estación i es:

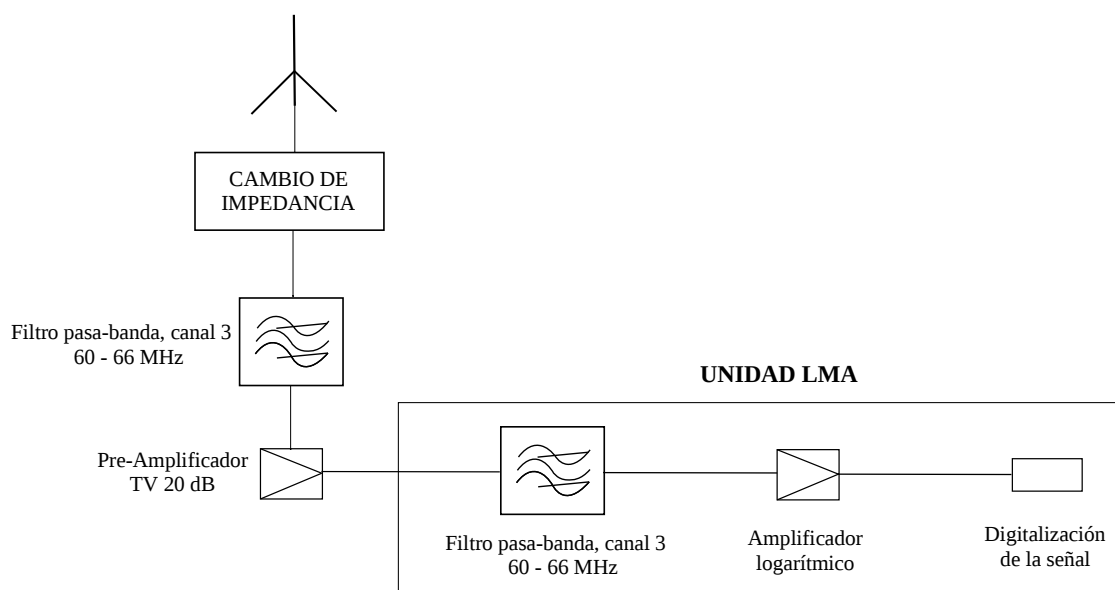
$$t_i = t + \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}}{c} \quad (1)$$

Donde, (x_i, y_i, z_i) representan la posición de las estación y c es la velocidad de las ondas electromagnéticas que en este caso son ondas de radio, equivalentes a la velocidad de la luz.

Midiendo el tiempo de llegada de la radiación en cuatro o más estaciones, se pueden determinar las cuatro incógnitas (x, y, z, t) (Thomas et al., 2004).

En la Figura 1 se muestra el esquema de funcionamiento de una estación LMA. Cada estación recibe las señales mediante una antena en un canal de televisión no utilizado localmente en la banda inferior de VHF (normalmente canal de TV 3, 60–66 MHz). Posteriormente viene la etapa de ajuste de impedancia que es necesaria para evitar el problema de ondas estacionarias y mantener la calidad de las señales que se reciben. Se realiza el proceso de filtrado de las señales que se reciben usando un filtro pasa banda de 6 MHz y se pre-amplifican las señales. Luego en la unidad de proceso del LMA, se realiza una segunda fase de filtrado, después mediante un amplificador logarítmico se provee la potencia de RF de la señal VHF y por último se digitaliza la señal de RF a una velocidad de 25 MHz y se marca el tiempo de los picos por medio de la señal de temporización del GPS, este tiempo es almacenado en el disco duro de cada estación.

Figura 1. Esquema de funcionamiento de una estación LMA



2.5 Observaciones de rayos empleando el sistema LMA

La teoría del líder bidireccional (Kasemir, 1960) afirma que la gran mayoría de descargas atmosféricas se inician entre regiones de carga con polaridad opuesta debido al elevado campo eléctrico que existe entre ellas y se extienden como árboles de doble extremo, uno negativo (líder negativo) que se propaga sobre regiones de carga positiva y uno positivo (líder positivo) que se propaga en dirección contraria sobre regiones de carga negativa (Wiens et al., 2005; Williams, 2006).

Como se ha mencionado, el sistema LMA detecta fuentes de emisiones electromagnéticas en el rango de muy alta frecuencia (60 – 66 MHz) debido a procesos de disrupción eléctrica (en inglés breakdown-process) durante propagaciones de líderes del rayo. Como resultado de la localización de dichas fuentes, la reconstrucción tridimensional y temporal de estructuras de rayos durante el ciclo de vida de una tormenta eléctrica se lleva a cabo (Krehbiel et al., 2000; Rust & MacGorman, 2002)

El LMA principalmente detecta líderes negativos ya que estos son más visibles que los líderes positivos en las frecuencias de radio usadas por la red, lo que da como resultado líderes negativos densamente mapeados en comparación con los líderes positivos (Krehbiel et al., 2000; MacGorman et al., 2014; Rison et al., 1999a). Esto indica que una descarga atmosférica tiene un número relativamente mayor de fuentes mapeadas dentro de las regiones de carga positiva involucradas en su desarrollo en comparación con las fuentes mapeadas en regiones de carga negativa (Wiens et al., 2005).

Por otro lado, líderes positivos son débilmente detectados por el sistema LMA, pero son a menudo detectados debido a procesos de recoil (Mazur, 2002) o líderes de retroceso, que son

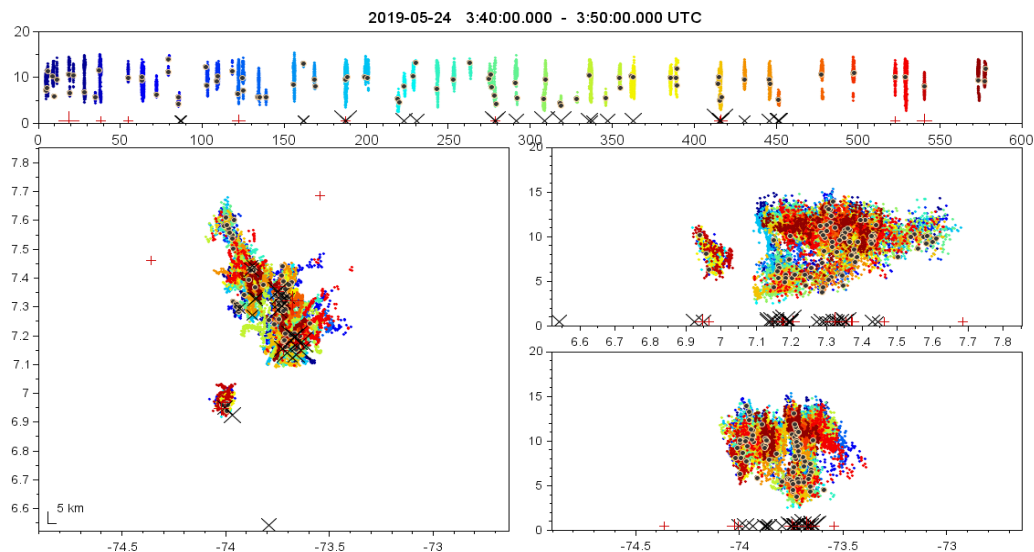
líderes negativos que se desplazan hacia el origen de la descarga a través de los canales ionizados que dejan los líderes positivos cuando no logran seguirse propagando (Mazur & Ruhnke, 1993). Estos líderes intentan reionizar el canal dejado por el líder positivo pero a menudo se descomponen después de formarse.

Teniendo en cuenta lo anterior y entendiendo que los líderes positivos no producen una radiación significativa que detecte la red LMA, se usa la hipótesis de que los líderes de retroceso vuelven a trazar partes de los canales dejados por líderes positivos, lo que sirve para determinar parcialmente regiones de carga negativa (Mazur, 1989). Estas regiones se caracterizan por presentar una reducida cantidad de fuentes mapeadas. De esta forma, la densidad de fuentes VHF localizadas por el LMA revelan en detalle las regiones eléctricamente activas durante el ciclo de vida de una tormenta eléctrica como también permite la identificación de sus estructuras eléctricas y su evolución temporal. Adicionalmente, información de líderes como velocidades, alturas de propagación y dirección de desplazamiento pueden ser deducidas a partir del LMA.

Un ejemplo de detección de tormenta del sistema LMA se muestra en la Figura 2. En esta se muestran 10 minutos de actividad eléctrica atmosférica el 24 de mayo de 2018 donde los símbolos ‘X’ y ‘+’ representan las descargas nube-tierra con polaridad negativa y positiva respectivamente registradas por la red LINET. En el panel superior de la misma figura, gráficos de tiempo versus altura para cada flash (secuencia de puntos verticales) representan la propagación vertical y el desarrollo bidireccional de líderes de rayos. En este caso particular, líderes entre 3 km y 15 km aproximadamente fueron detectados. A su vez, el panel inferior izquierdo muestra una vista de planta (latitud vs longitud) de los 10 minutos de actividad eléctrica donde los triángulos negros denotan la ubicación de las seis estaciones LMA. Los paneles de localizados a la derecha

son proyecciones de localización latitud y longitud versus altura. Ésta última proyección nos permite analizar el desarrollo vertical de las tormentas como también una aproximación a las distribuciones de carga eléctrica mediante métodos de inspección.

Figura 2. Mapeo de tormenta eléctrica usando la red LMA

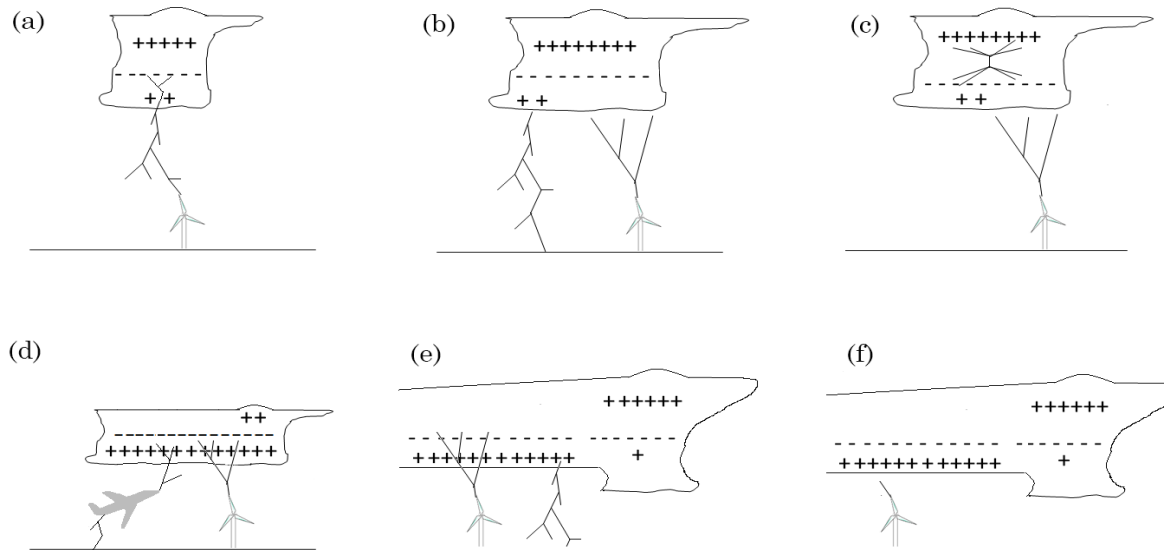


2.6 Interacción de rayos con estructuras elevadas

Se conoce como interacción a la respuesta que presentan las estructuras elevadas ante los líderes escalonados que se propagan a través de la atmósfera o de nubes de tormenta. El primer tipo de respuesta (ver Figura 3a) es un líder ascendente de conexión causado por un líder descendente que proviene de la estructura de carga. Este tipo de interacción se conoce como descarga descendente (Downward lightning) dado que a medida que el líder descendente se acerca al suelo, el campo eléctrico en la superficie o en objetos sobresalientes aumenta hasta que se excede el umbral de ruptura, lo que propicia la iniciación de un líder ascendente que se conecta con una de las ramas del líder descendente. Las descargas descendentes son las más frecuentes y su

cantidad dependerá de la exposición de la estructura elevada y de la densidad de descargas a tierra DDT del sitio (Montanyà, Fabró, et al., 2016).

Figura 3. Tipos de interacciones de descargas atmosféricas con estructuras elevadas.



El segundo tipo de respuesta son los líderes ascendentes inducidos (Upward lightning). Se usa el término inducido para referirse a líderes ascendentes que son causados por descargas que no impactan en la estructura como una descarga nube tierra (Figura 3b) o una descarga intra nube (Figura 3c), las cuales proporcionan las condiciones necesarias para el inicio de un líder ascendente debido a la rápida neutralización de carga. En general, cuando las regiones de carga de la nube son más bajas se mejora el campo eléctrico en estructuras elevadas y con ello aumenta la posibilidad de que inicien un líder ascendente (Montanyà et al., 2014).

Otros tipos de respuesta no muy comunes son los líderes ascendentes inducidos por un líder bidireccional iniciado por una aeronave (Figura 3d), líderes ascendentes inducidos por descargas positivas descendentes en sistemas convectivos de mesoescala SCM (Figura 3e) o líderes

ascendentes iniciados por descargas corona debidas a la rotación de las aspas en aerogeneradores (Figura 3f).

Según (Uman, 2008), para objetos de altura inferior a unos 100 m, se espera que todos los impactos de rayo sean iniciados por líderes descendentes provenientes de la estructura de carga de una nube de tormenta. Haciendo un cálculo aproximado, se supone que cualquier líder descendente que se haya propagado aleatoriamente directamente sobre una estructura o dentro de una distancia horizontal desde el borde igual al doble de su altura será interceptado por un líder de conexión ascendente.

La interacción de rayos en estructuras elevadas se ha estudiado en aerogeneradores en zonas templadas (Montanyà et al., 2014; Montanyà, Fabró, et al., 2016). Las tormentas de invierno en Europa muestran que, debido a la baja altitud del nivel de congelación de la nube, el centro de carga positivo inferior desaparece y por tanto no se producen rayos descendentes. Estos últimos son más frecuentes en tormentas de verano en el hemisferio norte y en zona tropical. Sin embargo, objetos elevados en tierra y en filos de montañas tienen condiciones para favorecer la aparición de líderes ascendentes (Montanyà, Fabró, et al., 2016). Las tormentas de invierno pueden aumentar el riesgo de exposición de las turbinas a rayos ascendentes y exponer los sistemas de protección contra rayos del sistema a eventos inesperados que pueden reducir la vida útil y los periodos de mantenimiento. De esta manera las turbinas eólicas pueden producir descargas eléctricas más fácilmente que los objetos estáticos de alturas similares, esto se da debido a que las aspas están expuestas a campos eléctricos locales más fuertes y a que están fabricadas con materiales compuestos aislantes que pueden acumular carga (Montanyà et al., 2014). Recientemente, la ubicación de un sistema LMA alrededor de la torre Santis en el monte del mismo nombre ubicado

en los Alpes Suizos permitió caracterizar 33 descargas ascendentes con sus correspondientes medidas de corriente directa en la torre de donde se concluyó que la descarga que golpea las torres altas es principalmente de tipo ascendente, que se caracteriza por la ausencia de un primer golpe de retorno y la presencia de una corriente continua inicial (ICC) con o sin pulsos superpuestos (Mostajabi et al., 2018). Así mismo se pudieron identificar e interpretar los distintos procesos durante el desarrollo de líderes positivos ascendentes de estructuras altas en Kansas, Musuri en donde se concluyó que un fenómeno del rayo llamado componente M se produce cuando se una el canal de un líder positivo ascendente con un líder de retroceso en descargas CG negativas (iniciadas líderes escalonados negativos). Este tipo de eventos no se presenta en descargas CG positivas (iniciadas por líderes escalonados positivos) dado que los líderes de retroceso no se hacen presentes en líderes negativos ascendentes (Mazur & Ruhnke, 2011).

En zona tropical el estudio de rayos sobre estructuras elevadas se ha llevado a cabo con base en las mediciones de corrientes directas realizadas en una torre instrumentada de 60 m ubicada en el Morro do Cachimbo en Belo Horizonte-Brasil (Guimarães et al., 2014; Visacro et al., 2004, 2012). La mayoría de los rayos medidos en esta torre son descendentes negativos, siendo más raros los ascendentes, fenómeno atribuible entre otras a la ubicación de la isoterma de -10°C a una altura superior a la que se encuentra en zona templada (Guimarães et al., 2014). Además, es de destacar que los parámetros del rayo medidos en esta estructura presentan valores por encima de las medias encontradas a nivel mundial, con una mediana de la corriente pico de 45 kA.

Estudios previos

Los resultados mostrados en este capítulo fueron presentados en el artículo “Actividad de rayos en el departamento de Santander entre 2014 y 2016” publicado en el Vol. 26 No. 3 (2021): Septiembre – Diciembre de la revista Ingeniería.

3.1 Resumen

Contexto: En este artículo se determinó el parámetro de densidad de descargas a tierra (DDT) en Santander y se hizo un estudio de la actividad de rayos en el departamento entre 2014 y 2016.

Método: El territorio departamental se dividió en recuadros de 1 km² y, mediante información de descargas a tierra obtenida de la Red Colombiana de detección total de rayos LINET, se halló la cantidad de flashes promedio anuales por recuadro, lo que corresponde al parámetro de DDT. Así mismo, usando métodos estadísticos, se analizó la variación espacial, temporal, multiplicidad y corriente pico de descarga de retorno de los flashes que incidieron en el departamento.

Resultados: Las zonas con mayores valores de DDT se ubican en los municipios de Suaita, Gámbita, Bolívar, Oiba y Charalá. En promedio, se registraron 183.199 flashes anuales, de los cuales el 54,1% tienen multiplicidad igual a uno. Se observaron picos de actividad de rayos en los meses de abril, mayo, septiembre y octubre entre las 16:00 y 18:00 y las 22:00 y 4:00, así como valores de corriente anual media de 33,6 kA para descargas negativas con valores máximos promedio en los meses de octubre, noviembre y diciembre y de 25,7 kA para descargas positivas con valores máximos promedio en los meses de abril, octubre y noviembre.

Conclusiones: Se encontró una marcada influencia de la topografía y de la altitud del terreno en la incidencia de descargas atmosféricas en el departamento, ya que los municipios con mayor actividad de rayos se ubican a los costados de altas cadenas montañosas a alturas menores que 1.500 msnm y los municipios de menor actividad se sitúan sobre páramos y cerros a alturas entre 3.000 y 3.500 msnm.

Palabras clave: actividad de rayos, densidad de descargas a tierra, descargas atmosféricas, red LINET

1.2 Introducción

El rayo es un fenómeno electromagnético que puede afectar los sistemas eléctricos, electrónicos, de comunicaciones y el transporte, ocasionando pérdidas económicas, de bienes culturales, servicios públicos y vidas humanas (Rakov & Uman, 2003; Torres Sánchez, 2002). Estudios realizados han mostrado que los lugares de mayor ocurrencia del fenómeno del rayo en el mundo están ubicados en la zona tropical (Albrecht et al., 2016; Aranguren et al., 2014; Herrera et al., 2018; Torres, Perez, Younes, Aranguren, Montaña, et al., 2015; Torres, Perez, Younes, Aranguren, Montana, et al., 2015). Así mismo se ha mostrado que la actividad eléctrica atmosférica es elevada comparada con latitudes templadas (Torres, 2010) y que los parámetros del rayo varían espacial y temporalmente, muestra de ello es que la mediana de la corriente de descarga medida en zonas templadas alcanza los 30 kA (BERGER K, 1971) mientras en regiones tropicales llega a 45 kA (Torres-Sánchez, 2017). Investigaciones demuestran que siete de los diez lugares con mayor actividad de rayos en Suramérica están en Colombia, en donde su relieve y la convergencia de vientos favorecen la formación de tormentas (Albrecht et al., 2016), por lo que parámetros como

la Densidad de Descargas a Tierra (DDT) son de hasta 60 flashes/km²/año (Torres, Perez, Younes, Aranguren, Montana, et al., 2015).

Para determinar el parámetro de densidad de descargas a tierra se han utilizado ecuaciones que lo relacionan con el nivel cerámico (Rakov & Uman, 2003), el cual corresponde a la cantidad de días tormentosos al año. También se han empleado sistemas de localización de rayos LLS (por sus siglas en inglés, Lightning Location System), los cuales fueron implementados gracias al avance de los sistemas electrónicos. Estos sistemas capturan las señales electromagnéticas emitidas por el rayo y determinan la ubicación a través de diferentes algoritmos que relacionan al menos tres sensores que han detectado la señal, permitiendo determinar la ubicación espacio-temporal de la descarga (Fernando & Trujillo, 2018).

En 1997 se instaló el primer LLS en Colombia, conocida como Red Colombiana de Medición y Localización de Descargas Eléctricas Atmosféricas – RECMA (Torres Sánchez, 2002). La RECMA estuvo en operación durante el periodo de 1997 a 2001, y estaba conformada de 6 sensores LPATS (Lightning Position and Tracking System), que se instalaron en el territorio colombiano en lugares estratégicos con el fin de dar cubrimiento a la red de transmisión propiedad de ISA. Esta red detectaba rayos tipo nube-tierra (CG - Cloud to Ground) entregando datos de día, mes, año, minuto, segundo, milisegundo, latitud, longitud, y corriente de cada stroke detectado por la red (Inampué et al., 2009; Torres Sánchez, 2002).

Con base en los registros de la RECMA se pudo realizar una primera caracterización del fenómeno, permitiendo obtener la variación espacio-temporal de parámetros como la DDT, polaridad, multiplicidad y valores de corriente pico en el territorio colombiano (Pulgarín-Rivera et al., 2014). Uno de los resultados relevantes fue que zonas como la del Magdalena Medio,

presentaban mayor actividad eléctrica atmosférica y que algunas como en la sabana de Bogotá la actividad no era tan alta. La DDT obtenida con esta red en algunos lugares superaba los referentes internacionales que se tenían para el año 2002 (Pulgarín-Rivera et al., 2014; Torres Sánchez, 2002). A pesar de los grandes aportes que se obtuvieron a través de la RECMA, esta presentaba algunas limitaciones en la localización de las descargas debido a que algunos sensores se encontraban alineados (Torres Sánchez, 2002).

Luego en el año 2007 la red fue actualizada con los sensores LS7001 (por sus siglas en inglés LS - Lightning Sensor) y se convirtió en el Sistema de información de Descargas Atmosféricas – SID (Herrera et al., 2018). Esta red estaba en la capacidad de detectar rayos tipo CG y estuvo en operación hasta el año 2016. En el año 2011 entró en operación la Red Colombiana de Detección Total de Rayos LINET propiedad de la empresa Keraunos E.S.P. la cual permite detectar rayos nube-tierra e intra-nube. Desde su instalación septiembre de 2011 hasta finales de 2018 la red ha detectado más de 64.000.000 de descargas (López et al., 2019).

La actividad de rayos en Colombia se ha presentado a través de mapas, inicialmente en 1974 se elaboró el primer mapa de nivel isoceraúnico realizado por el HIMAT (IDEAM). Luego, en 1990 se realizó una actualización teniendo en cuenta los promedios aritméticos multianuales entre 1974 y 1988 (Torres Sánchez, 2002). Luego con la entrada en operación de los LLS, se han elaborado distintos mapas de DDT, en el 2002 el trabajo realizado por Younes, presenta un mapa de DDT del área de mayor eficiencia de detección de la RECMA. Después en la norma de protección contra rayos NTC 4552 de 2008, se actualizaron el mapa de niveles isoceraúnicos y se presentaron valores de DDT para algunas ciudades y municipios del país con base en la información de la RECMA.

Después en la norma de protección contra rayos NTC 4552 de 2008, se actualizaron el mapa de niveles isoceráunicos y se presentaron valores de DDT para algunas ciudades y municipios del país. Trabajos posteriores presentaron un mapa nacional de DDT para 2012 usando áreas de 3x3 km en donde se ubicaron las zonas más activas en cuanto a rayos que corresponden al Valle del río Magdalena y al Catatumbo (Aranguren et al., 2013). En 2014 se actualiza este mapa para 2012 y 2013 usando la misma resolución espacial y se relaciona el cambio de este parámetro con la altitud (Aranguren et al., 2014). En 2018 se publicó un estudio de 14 años de actividad de rayos en el periodo de 1997 a 2001 y de 2007 a 2015 en el cual se muestra la variación de parámetros como multiplicidad, polaridad, corriente pico de descarga de retorno y DDT (Herrera et al., 2018). En 2019 se presentó un mapa de DDT para regiones naturales de Colombia en el periodo entre 2012 y 2017 usando la misma dimensión de recuadros (Carlos Alberto Cruz Mosquera, 2015).

Conocer el valor de la Densidad de Descargas a Tierra es de suma importancia para determinar el indicador de exposición al rayo en estructuras elevadas con el fin de diseñar sistemas de protección óptimos y eficientes y de esta manera disminuir el nivel de riesgo ante descargas atmosféricas. Así mismo, usar datos exactos de este parámetro es fundamental para garantizar la confiabilidad de líneas de transmisión y distribución puesto que realizar diseños usando valores generalizados puede sobredimensionar los cálculos debido a la variación de la DDT con la altitud del terreno mostrada en (Aranguren et al., 2014).

Hasta el momento no se han realizado estudios en Santander que presenten la variación espacial y temporal de descargas atmosféricas ni se han caracterizado parámetros como la multiplicidad y la corriente pico de descarga de retorno. Tampoco se han realizado mapas de

Densidad de Descargas a Tierra usando recuadros de 1x1 km ni se ha explicado el comportamiento de este parámetro con base en la influencia de las cadenas montañosas del departamento. Teniendo en cuenta lo anterior, este artículo presenta un estudio sobre la actividad de rayos en el departamento de Santander entre los años 2014 a 2016 determinando los municipios con mayor y menor densidad de descargas a tierra promedio y el comportamiento mensual y horario de los flashes registrados, así como la variación de la multiplicidad y de la corriente de descarga de retorno. Finalmente se presenta el mapa de DDT del departamento y se determinan los veinte sitios para los cuales este parámetro presenta los valores máximos.

1.3 Metodología

1.3.1 Zona de estudio

El departamento del Santander está compuesto por 87 municipios y se encuentra ubicado en la zona noreste de Colombia formando parte de la región Andina, tiene aproximadamente 2.090.854 habitantes en 2018 siendo el séptimo departamento más poblado del país y el cuarto en cuanto a desarrollo económico. Su relieve se ve influenciado al oeste por el valle medio del río Magdalena y al este por la cordillera oriental con mesetas de gran extensión como Bucaramanga, Ruitoque, Berlín y Los Santos y montañas de mediana elevación separadas del cuerpo de la cordillera que hacen parte de la Serranía de los Yariguíes así como montañas que superan los 4000 msnm en donde se encuentran los páramos Anagá y El Almorzadero, este último con picos que llegan hasta los 4500 msnm.

1.3.2 Datos y software

La información de descargas a tierra empleada en este estudio proviene de la Red Colombiana de detección to-tal de rayos con tecnología LINET (H. Betz et al., 2007; H. D. Betz et al., 2004, 2009; Höller et al., 2009). Esta red “Total Lightning” que opera en los rangos de frecuencia VLF/LF entrega para cada evento datos como fecha, hora, latitud, longitud, altura, tipo, corriente y error. LINET está compuesta por sensores que detectan el campo magnético generado por los impulsos electromagnéticos del rayo a través de un arreglo de dos antenas de lazo ortogonales entre sí. Esta red emplea la técnica de tiempo de arribo (por sus siglas en Time of Arrival – TOA) para entregar los datos de posición de cada evento (Betz). El conjunto de datos que se empleó para realizar el análisis de la actividad de rayos del departamento de Santander corresponde a los eventos detectados entre 2014 y 2016. Se usó el software QGIS que es un sistema de información Geográfica (SIG) de código abierto licenciado bajo GNU - General Public License, siendo un proyecto de la Open Source Geospatial Foundation (OSGeo).

1.3.3 Procesamiento

Con base en información de actividad de rayos brindada por la red LINET se ubicaron geográficamente las descargas (strokes) que incidieron en el recuadro que contiene al departamento de Santander (Margen inferior izquierdo LA: 5,474, LO: -74,654; Margen superior derecho LA: 8,623, LO: -72,395). Usando las herramientas de selección por localización se descartaron las descargas que impactaron fuera del recuadro y se logró individualizar la actividad dentro del departamento y para cada municipio de Santander para realizar un estudio más específico.

Se procesaron los strokes mediante un script desarrollado en (Fernando & Trujillo, 2018) que permite agruparlos en flashes y asigna un valor de multiplicidad a cada evento de acuerdo a la cantidad de descargas subsecuentes que contenga (para que un conjunto de strokes formen parte de un flash deben estar separados en el espacio por distancias menores a 10 km y tiempos menores a 1 segundo entre el primer y segundo stroke y 500 ms a partir del segundo). De esta forma se logra obtener una base de datos de los flashes en Santander la cual se redujo a un tercio del tamaño original. En adelante la cantidad de rayos se medirá en flashes.

1.3.4 Determinación de la DDT

Ubicando los datos procesados de la Red LINET, se encerró la superficie del departamento de Santander dentro de una cuadrícula donde cada recuadro tiene un área de 1km², según QGIS Santander tiene una extensión de 30.537 km². Se realizó el conteo de los flashes promedio anuales que inciden dentro de cada uno de estos recuadros con la opción contar puntos en polígonos de las herramientas de análisis de la pestaña vectorial del software; por motivos de la no visualización de los números dentro de cada uno de los pequeños recuadros se le dio un color en una rampa de color espectral donde los valores van desde 0 hasta los 60 flashes dependiendo del año para luego sacar un promedio entre los tres años de estudio.

1.4 Resultados

1.4.1 Variación espacial

La Tabla 1 muestra los municipios con mayor actividad de rayos en el departamento de Santander de acuerdo al parámetro de Densidad de Descargas a Tierra promedio (Aranguren et al.,

2013), el cual se calcula mediante el cociente $\text{Flashes promedio} / \text{Área del municipio}$ y se interpreta como la cantidad de flashes anuales que se registrarían en cada kilómetro cuadrado del municipio si la totalidad de flashes incidentes en el mismo se distribuyeran de manera uniforme sobre su superficie. Este parámetro se halla con el único fin de realizar comparaciones en la actividad de rayos entre los municipios y no corresponde a la Densidad de Descargas a Tierra DDT la cual se hallará posteriormente determinando el número de flashes anuales que impactan en un área de 1 km^2 , es decir, un conteo de flashes por cada recuadro ubicado a lo largo del departamento (Oliver, 2013).

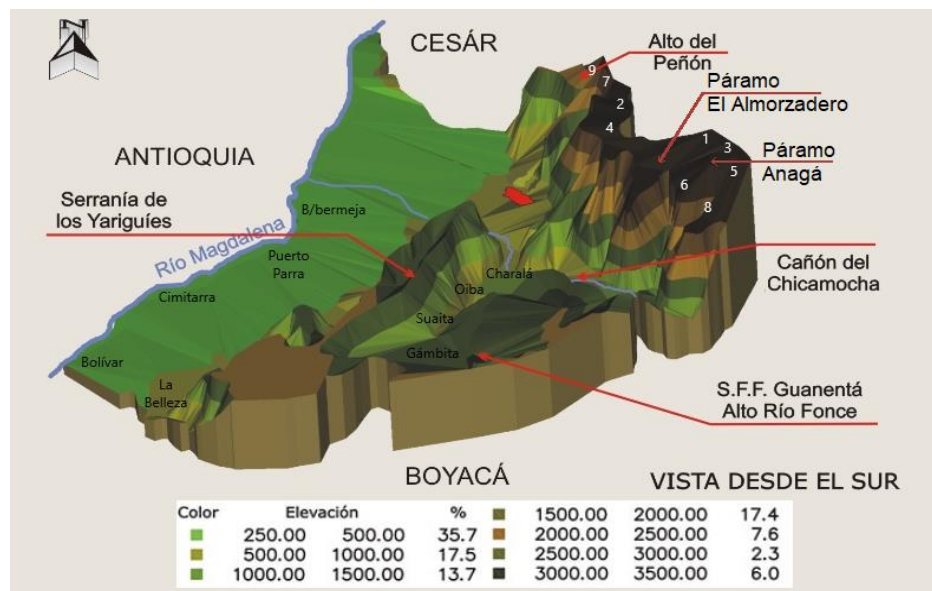
Tabla 1. Municipios con mayor actividad de rayos en Santander.

Municipio	Flashes Promedio	Área [km^2]	DDT promedio flashes/km^2/año
Bolívar	12047	957,2	12,6
Cimitarra	373123	3165,6	11,8
Gámbita	6856	606,7	11,3
Suaita	3341	296	11,3
Oiba	3210	285	11,3
La Belleza	2726	259	10,5
Puerto Parra	7427	745	10,0
Charalá	3976	411	9,7
Barrancabermeja	11146	1154	9,7

Es así como municipios ubicados al oeste del departamento que limitan con el río Magdalena como Bolívar, Cimitarra, Barrancabermeja y Puerto Parra, presentan una importante actividad de rayos. Lo anterior se puede explicar dado que estos municipios, como lo muestra la Figura 4, se encuentran al costado occidental de la Serranía de los Yariguíes o también llamada Cordillera de los Cobardes y estas montañas, que alcanzan alturas de hasta 3475 msnm actúan como barrera natural para los vientos húmedos y cálidos que circulan por la zona forzándolos a

subir, lo que favorece la transferencia de carga por colisión entre partículas de hielo y granizo presentes en la atmósfera y por tanto la formación de tormentas eléctricas en los municipios nombrados en los cuales la mayoría de su territorio se ubica a alturas menores a 150 msnm. Ese mismo efecto ocurre al costado oriental de dicha Serranía, en donde municipios como Charalá, Suaita, Gámbita y Oiba ubicados en una pequeña zona al suroriente del departamento que limita con Boyacá, muestran una importante actividad de rayos que también se ve afectada por el Páramo Carnicerías de Guanque ubicado al oriente de los municipios nombrados y que alcanza alturas hasta de 4170 msnm.

Figura 4. Relieve de Santander. Fuente: Sociedad Geográfica de Colombia, Atlas de Colombia, IGAC, 2002.



En la Tabla 2 se presentan los municipios con la menor actividad de rayos de acuerdo a la Densidad de Descargas a Tierra promedio. Estos nueve municipios se ubican sobre el Alto del Peñón, el Páramo El Almorzadero y el Páramo Anagá a alturas que oscilan entre 3000 y 3500

msnm como se muestra en la Figura 1, lo que infiere la influencia de parámetros como la altitud en la disminución de la cantidad de impactos de rayo en zonas que se ubican en relieves elevados. Esto se puede explicar porque en estas zonas, al ser páramos, no existen barreras naturales que permitan que el aire se eleve, además a mayor altitud la presión atmosférica disminuye y por tanto el aire se expande y disminuye su temperatura, lo que causa ambientes más fríos en los cuales tiende a disminuir la formación de tormentas (Aranguren et al., 2013).

Tabla 2. Municipios con menor actividad de rayos en Santander

Municipio	ID	Flashes promedio	Área [km ²]	DDT promedio flashes/km ² /año
Cerrito	1	88	416	0,2
Vetas	2	26	93	0,3
Concepción	3	141	333	0,4
Tona	4	158	342	0,5
Carcasí	5	132	259,8	0,5
Enciso	6	49	79	0,6
California	7	36	52,6	0,7
Capitanejo	8	57	81	0,7
Suratá	9	263	368	0,7

En general el área metropolitana de Bucaramanga conformada por los municipios mostrados en la Tabla 3, presentan una baja actividad de rayos dado que se tienen en promedio entre 1,9 y 0,8 flashes/km²/año.

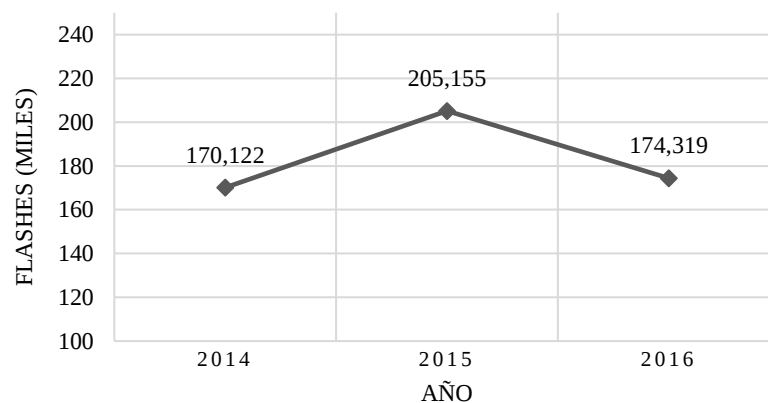
Tabla 3. Actividad de rayos en los municipios del área metropolitana de Bucaramanga.

Municipio	Flashes Promedio	Área [km ²]	DDT promedio flashes/km ² /año
Girón	889	745,1	1,9
Bucaramanga	167	162	1,0
Piedecuesta	408	481	0,9
Floridablanca	76	101	0,8

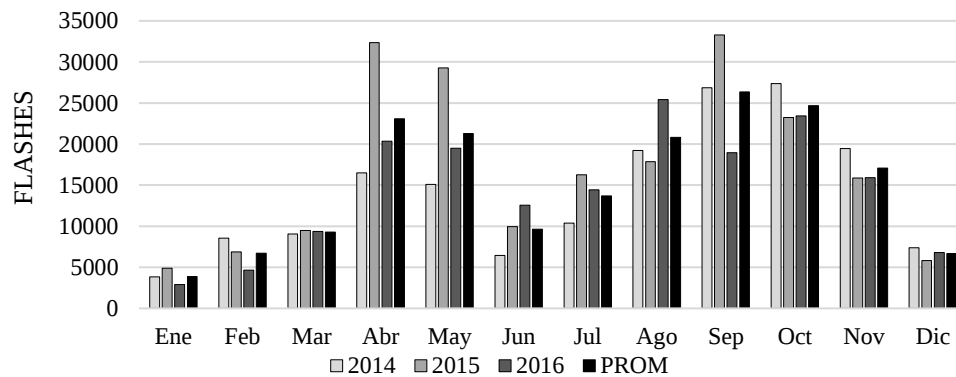
1.4.2 Variación temporal

La actividad de rayos en el departamento de Santander fue en promedio de 183.199 flashes por año de los cuales el 76,5% son de polaridad negativa y presentó un pico de 205.155 en 2015 aumentando un 20% con respecto al 2014 año en el cual hubo 170.122. El 2016 se registraron 174.319 flashes y un crecimiento de la actividad del 2,5% con respecto al primer año de estudio. La información anterior se observa en la Figura 5.

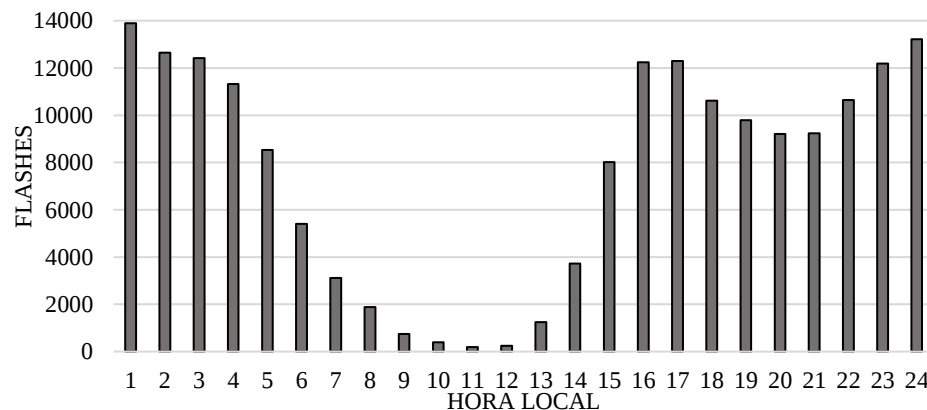
Figura 5. Comportamiento de la incidencia de flashes nube tierra en Santander.



La Figura 6 muestra la incidencia de rayos por mes y el promedio mensual de los tres años de estudio en donde se evidencia un comportamiento bimodal con valores máximos en Abril, Mayo, Septiembre y Octubre, de los cuales los tres primeros corresponden a los meses tormentosos del año en donde se registraron en promedio más de 23.000 flashes. Lo anterior es congruente con la actividad de rayos en regiones centrales del país estudiadas en. El periodo de baja incidencia se presenta entre los meses de Diciembre y Enero con un promedio menor a 6.700 flashes.

Figura 6. Cantidad de flashes nube tierra por meses de 2014 a 2016.

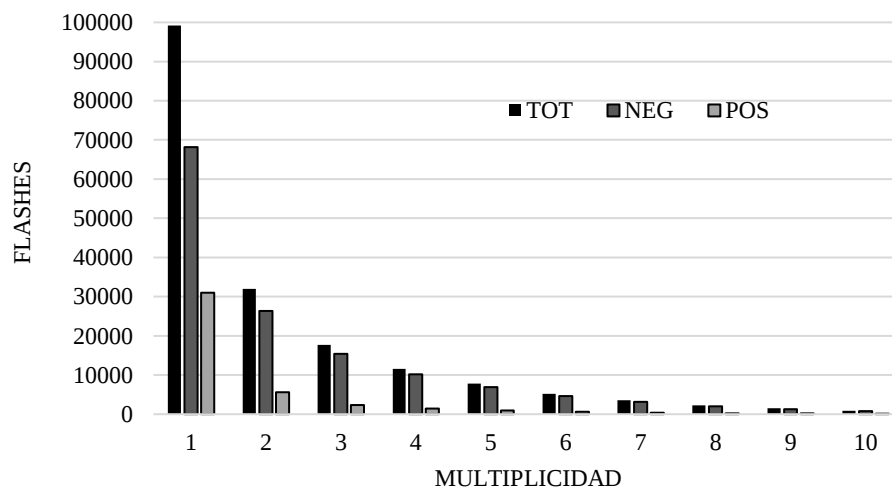
La Figura 7 muestra la variación en la cantidad de flashes promedio según la hora local colombiana UTC-5. Se evidencian dos franjas de alta actividad, una de ellas entre las 16:00 y 18:00 h en donde se registra un pico de 12.300 flashes a las 17:00 h; la otra entre las 22:00 y las 4:00 h con un valor máximo de 13.894 flashes a las 1:00 h, lo anterior, según (Carlos Alberto Cruz Mosquera, 2015) se presenta dado que en zonas montañosas puede haber tormentas de corta duración en horas de la tarde, las cuales en zonas de baja altitud se extienden hasta la madrugada. Entre las 8:00 y las 13:00 h se reduce al mínimo la actividad con menos de 2.000 flashes por hora.

Figura 7. Cantidad de flashes nube tierra promedio por horas de 2014 a 2016

1.4.3 Multiplicidad

La Figura 8 muestra el promedio de flashes anuales en función de su multiplicidad. El 54% de los flashes anuales promedio tienen multiplicidad igual a uno, 17% igual a dos, 9% igual a tres y 6% igual a cuatro. Solo un promedio de 1559 flashes al año presenta más de diez descargas subsecuentes y un promedio de 25 flashes presentan más de veinte. La multiplicidad máxima en 2014 fue de 24, en 2015 de 41 y en 2016 de 32. En cuanto a la polaridad se tiene que el 14% de flashes negativos presentan más de cuatro descargas subsecuentes mientras que solo el 6% de los flashes positivos presentan esta misma característica.

Figura 8. Multiplicidad de flashes nube tierra promedio anuales.

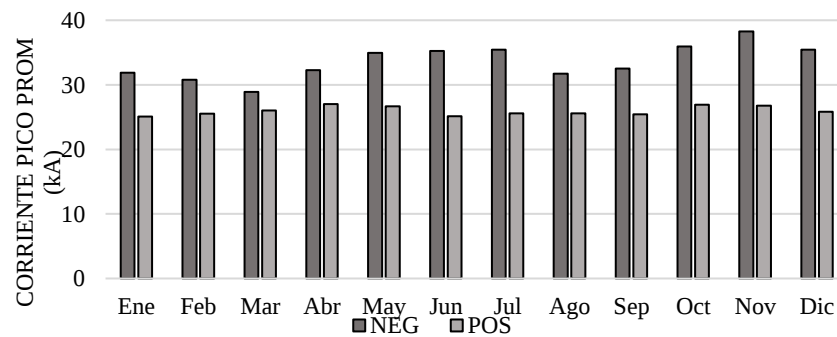


1.4.4 Corriente pico de la descarga de retorno

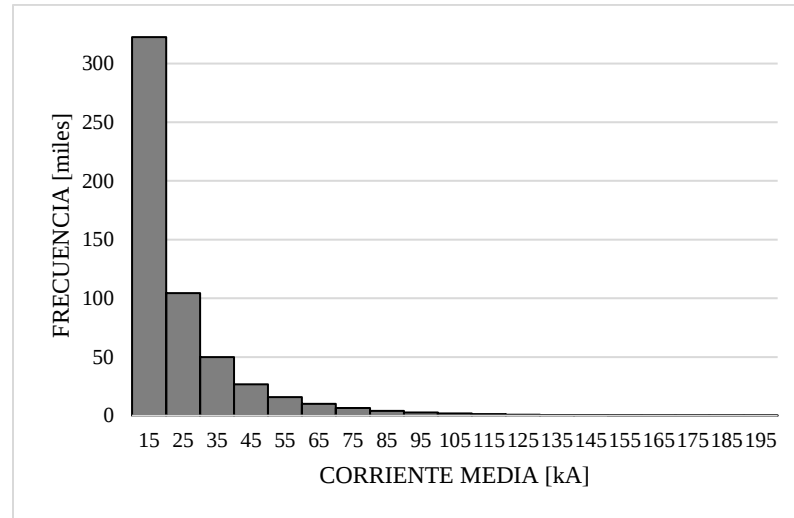
La Figura 9 presenta la variación mensual de la corriente pico promedio de la descarga de retorno, para ello se tuvieron en cuenta corrientes pico de descargas positivas y negativas de más de 15 kA con el fin de tener resultados comparables con otros artículos como (Aranguren et al., 2013).

Se tiene una corriente anual media de 33,6 kA para descargas negativas con valores máximos promedio en los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre que varían entre 35,4 kA y 38,3 kA y valores mínimos promedio en Febrero y Marzo de 30,7 kA y 28,9 kA respectivamente. En cuanto a descargas positivas se observa un comportamiento uniforme cuya corriente media anual fue de 25,7 kA con valores máximos promedio en los meses de Abril, Octubre y Noviembre que varían entre 26,8 kA y 27 kA y valores mínimos promedio de 25,1 kA en los meses de Enero y Junio.

Figura 9. Corriente pico promedio de la descarga de retorno por mes.



La Figura 10 muestra el histograma de corrientes pico de descarga de retorno para los flashes entre 2014 a 2016 con corrientes mayores a 10 kA con el fin de comparar con los resultados hallados en (Herrera et al., 2018). Las marcas de clase corresponden a la corriente media de cada intervalo. Se tiene que el 58,7% de los flashes presentaron corrientes pico entre 10 y 20 kA, el 19% entre 20 y 30 kA, el 9% entre 30 y 40 kA y el 4,9% entre 40 y 50 kA. Flashes con corriente de descarga de retorno mayores a 50 kA se presentaron en un 8,3%. Así mismo los valores máximos de corriente registrados corresponden a seis flashes con picos entre 305,3 y 345,1 kA.

Figura 10. Histograma de corrientes de descarga de retorno durante el periodo de estudio.

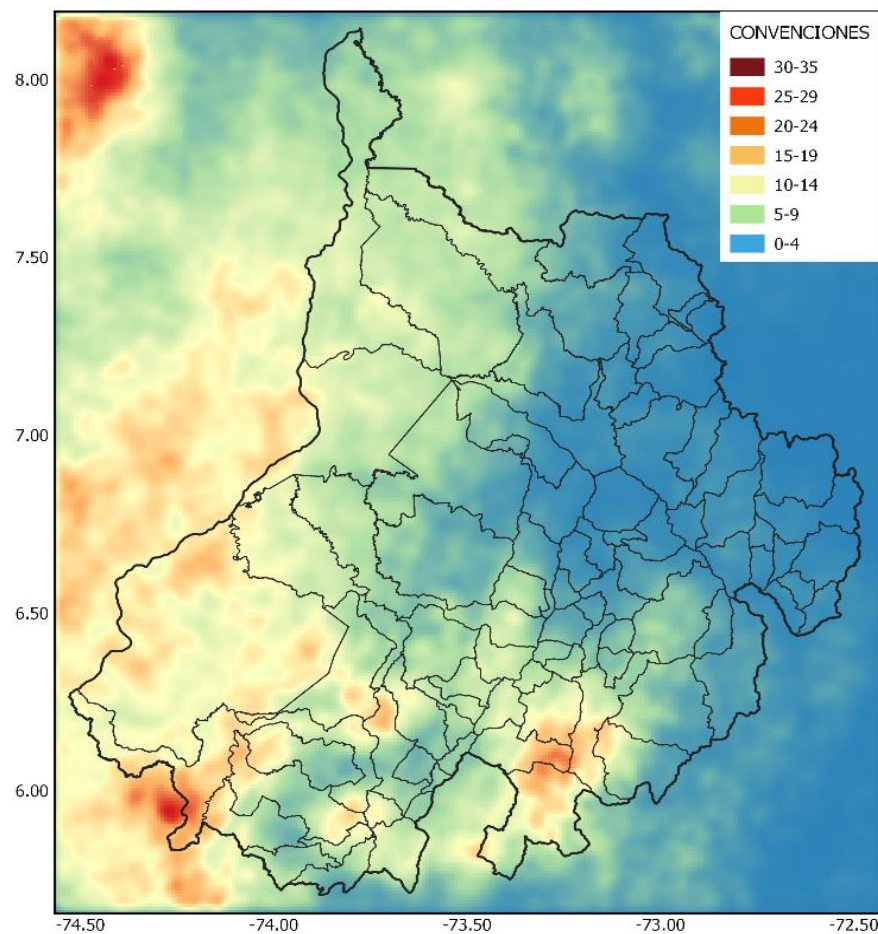
1.4.5 Densidad de Descargas a Tierra (DDT)

En la Figura 11 se ilustra el mapa de la Densidad de Descargas a tierra en el departamento de Santander de los años 2014 al 2016, la cual se obtuvo de los flashes registrados por la red LINET en este periodo. En promedio en el 90% del territorio santandereano incide al menos un rayo al año. En los tres años de estudio 549.596 flashes incidieron en el departamento de Santander.

Se evidencia que al sur oriente del departamento hay una zona de altos valores de Densidad de Descargas a Tierra que oscilan entre 27 y 39 flashes/km²/año, comprendida por los municipios de Charalá, Gámbita, Suaita y Oiba igualmente que al occidente del departamento en la mayoría de territorio de Bolívar y Cimitarra y una pequeña parte del municipio de La Belleza, lo que es congruente con la actividad de rayos analizada mediante el parámetro de Densidad de Descargas a Tierra promedio que para estos municipios varía entre 9,7 y 12,6 flashes/km²/año.

Áreas reducidas de los municipios de Sucre, El Playón, Vélez, Landázuri, Puerto Parra y Barrancabermeja presentan valores elevados de DDT como se observa en las tonalidades más oscuras de la figura en mención.

Figura 11. Mapa de la Densidad de Descargas a Tierra de los 3 años de estudio



La Tabla 4 muestra los diez municipios con los valores más elevados de DDT en el departamento, esto es, los recuadros con mayor incidencia de flashes al año de los cuales cinco se ubican en el municipio de Suaita, cuatro en Gámbita, tres en Bolívar, dos en La Belleza, dos en Landázuri y uno en Oiba, Vélez, Charalá y La Paz respectivamente.

Tabla 4. Sitios de mayor valor de Densidad de Descargas a Tierra en Santander

Municipio	DDT flashes/km²/año	Municipio	DDT flashes/km²/año
Suaita	39,3	Landázuri	28,7
Gámbita	30,3	La Paz	28
La belleza	30,3	Oiba	27,7
Charalá	30	Vélez	27,7
Bolívar	30	Barrancabermeja	24,7

En cuanto a valores, Suaita presenta la zona con más alta DDT del departamento con 39,3 flashes/km²/año, seguida por La Belleza y Gámbita con 30,3, Bolívar y Charalá con 30, Landázuri con 28,7, La Paz con 28, Oiba y Vélez con 27,7 y Barrancabermeja con 24,7. Estos valores no corresponden a algún año en específico sino al promedio hallado en el periodo de estudio. De los nueve municipios mencionados anteriormente, seis de ellos se encuentran en la Tabla 1 en donde se mide la actividad de rayos, y no aparecen Landázuri, Vélez y La Paz dado que estos últimos a pesar de que tienen zonas con elevados valores de DDT no cuentan con un promedio de flashes alto en la totalidad de su superficie lo que si sucede con Barrancabermeja, Cimitarra y Puerto Parra.

1.5 Discusión

Las regiones con mayor actividad de rayos del departamento de Santander corresponden a los municipios de Bolívar, Cimitarra, Gámbita, Suaita, Oiba, La Belleza, Puerto Parra, Charalá y Barrancabermeja con valores de DDT que superan los 25 flashes/km²/año, estas zonas coinciden con las presentadas en (Aranguren et al., 2014) y en (Aranguren et al., 2013) donde se observa una marcada actividad de rayos en la zona suroeste y centro sur del departamento y se hallaron valores cercanos al valor dado. Lo anterior se evidencia también en (Carlos Alberto Cruz

Mosquera, 2015) al sureste de la región del Magdalena Medio y al suroeste de la región montañá noreste. Así mismo los resultados encontrados son congruentes con la tasa de rayos (Flash Rate Density FRD) mostrada por el sensor óptico LIS donde se observa que al suroeste del departamento hay zonas con más de 50 flashes/km²/año, este último valor es mayor a los encontrados el presente trabajo debido a que se tienen en cuenta flashes nube-tierra, nube-nube e intra-nube (Oliver, 2013). Por su parte, regiones en municipios como Cerrito, Vetás, Concepción, Tona, Carcasí, Enciso, California, Capitanejo y Suratá, muestran la mínima actividad de rayos que es consecuente con los estudios nombrados en donde predomina una baja actividad de rayos en el extremo oriental del departamento y como se muestra también en (Herrera et al., 2018) donde estas zonas cuentan con menos de 3 flashes/km²/año.

En cuanto a la variación temporal se tiene que la actividad de rayos aumentó un 20% en 2015 con respecto al año anterior y un 2,5% en 2016 con respecto al primer año de estudio, con picos marcados en los meses de Abril, Mayo y Septiembre de 2015 que superan los 29.000 flashes y valores máximos promedio en Abril – Mayo y Septiembre - Octubre que superan los 21.000. Este último comportamiento bimodal también se presenta en (Torres Sánchez, 2002) en donde los meses de actividad eléctrica máxima son Abril y Octubre, en (Herrera et al., 2018) donde para el periodo entre 1997 y 2001 los picos de actividad se registraron en Mayo y Septiembre y para el periodo entre 2007 y 2015 en Abril y Septiembre y también en (Aranguren et al., 2013) con la diferencia en que el segundo pico de actividad se presenta en los meses de Octubre y Noviembre. Así mismo el sensor óptico LIS muestra picos de actividad en los meses de Septiembre, Octubre y Noviembre (Oliver, 2013).

Las franjas horarias de mayor actividad se presentan entre las 16:00 y 18:00 h con un pico de 12.300 flashes a las 17:00 h y entre las 23:00 y las 3:00 h con un valor máximo de 13.894 flashes a las 1:00 h, este último intervalo coincide con el pico de máxima actividad mostrado en (Herrera et al., 2018) , difiere con (Aranguren et al., 2013) en donde la máxima actividad se mantiene entre las 17:00 y las 2:00 h y es congruente con datos mostrados por el sensor óptico LIS donde predomina la actividad nocturna (Oliver, 2013). De igual manera hay una variación en la hora de actividad pico en regiones de Cundinamarca, Valle del Cauca y Antioquia donde según (Torres Sánchez, 2002) se presenta a las 15:30 hora local; esta diferencia, según el autor, se explica dado que en zonas del magdalena medio son más frecuentes las precipitaciones con rayos en la noche y de madrugada. Entre las 8:00 y las 13:00 h se reduce al mínimo la actividad con menos de 2.000 flashes promedio por hora lo que coincide exactamente con los resultados en (Aranguren et al., 2013).

El 76,5% de los flashes registrados son de polaridad negativa y el 23,5% positivos, estos valores son similares a los hallados en (Herrera et al., 2018) donde el porcentaje anual es en promedio de 74,0% para flashes negativos y 25,9% para flashes positivos. El comportamiento encontrado es similar al de regiones de Antioquia y Caldas en donde los flashes negativos corresponden al 73,7% y 76,9% y menor al de regiones de Cundinamarca y Atlántico con 89,9% y 84,2% respectivamente, según polaridades promedio multianuales presentadas en (Albrecht et al., 2016).

De los flashes negativos el 14% presentan más de cuatro descargas subsecuentes mientras que solo el 6% de los flashes positivos presentan esta misma característica. El 54,1% de los flashes anuales promedio tienen multiplicidad igual a uno y el 87.6% menos de cuatro, estos porcentajes

son más bajos a los presentados en (Aranguren et al., 2013) que corresponden al 66% y 91% respectivamente, lo que indica que en el departamento de Santander es más frecuente que se presenten flashes con más de cuatro descargas subsecuentes.

Se obtuvo una media anual de corriente pico de descarga de retorno para flashes negativos de 33,6 kA con máximos en Octubre, Noviembre y Diciembre y de 26,0 kA para flashes positivos con valores máximos en Abril, Octubre y Noviembre, estas medias son mayores a las encontradas en (Herrera et al., 2018) para el periodo entre 1997 y 2001 con valores de 32,1 kA y 20,2 kA respectivamente y para los flashes positivos en el periodo entre 2007 y 2015 cuya media anual es 18 kA, en este último intervalo la media para flashes negativos fue mayor a la encontrada en el presente estudio y tomó un valor de 36,2 kA. Se tiene que el 97,6% de flashes positivos tienen corrientes pico menores a 50 kA lo que es congruente con (Herrera et al., 2018).

1.6 Conclusiones

En el departamento de Santander es más frecuente que los rayos tengan corrientes pico de descarga de retorno menores a 20 kA, lo que indica que los sistemas de protección contra rayos se deben dimensionar no solo para evitar daños causados por corrientes grandes sino para proteger también de estas corrientes menores. Esto es primordial al momento de escoger el nivel de protección contra rayos y determinar el radio de la esfera rodante en los diseños de sistemas de captación. Así mismo se obtuvo un máximo promedio de corriente pico de descarga de retorno de 38,3 kA en el mes de Noviembre.

El mapa de DDT presentado permite evaluar con exactitud el indicador de exposición y consigo el nivel de riesgo ante impactos de rayo en estructuras elevadas a ubicar en cualquier punto

del departamento. Lo anterior es de gran trascendencia en la determinación de la necesidad de implementar sistemas de protección contra rayos y acciones que permitan disminuir el riesgo de daños y pérdidas humanas causadas por descargas atmosféricas.

Se encontró una marcada influencia de la topografía del terreno y de la altitud en la incidencia de descargas atmosféricas en el departamento ya que los municipios con mayor actividad de rayos se ubican a los costados de altas cadenas montañosas a alturas menores a 1500 msnm y los municipios de menor actividad se sitúan sobre páramos y cerros a alturas entre 3000 y 3500 msnm. Muestra de ello es que los municipios de Suaita, Gámbita, Charalá, La Belleza, y Bolívar, los cuales se ubican en los flancos de la Serranía de los Yariguíes y del Páramo Carnicerías de Guanque, presentan los sitios con mayor Densidad de Descargas a Tierra con variaciones entre 30 y 39,3 *flashes/km²/año* así mismo, en la mayoría del territorio de los municipios ubicados en el costado oriental del departamento sobre el Alto del Peñón, el Páramo El Almorzadero y el Páramo Anagá se presentan los menores valores de DDT lo que es congruente con el parámetro de Densidad de Descargas a Tierra promedio.

Como trabajos futuros, entendiendo la dependencia geográfica encontrada en el departamento, se plantea estudiar las variaciones temporales de parámetros como las corrientes de pico, la polaridad, la multiplicidad a través de análisis meteorológicos y climáticos. Así mismo determinar la influencia de las alturas de los centros de carga en nubes de tormenta en la determinación de los parámetros nombrados anteriormente.

Metodología para la ubicación de Hotspots

Los resultados correspondientes al presente objetivo fueron publicados en el artículo “Metodología para identificar zonas y estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayos en Barrancabermeja-Yondó” publicado en la edición de la revista Tecnura.

4.1 Resumen

Objetivo: Este trabajo presenta una metodología para determinar los sitios y las estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayo (*hotspots*) en Barrancabermeja y Yondó.

Metodología: Se parte de la división de la superficie de estos dos municipios en polígonos de 600 metros. De esta forma, a través de la información de actividad de rayos (impactos nube-tierra) proporcionada por la Red Colombiana de Detección Total de Rayos - LINET entre enero de 2016 y febrero de 2020, se determinó el número de impactos por polígono, lo que permitió identificar los *hotspots* en las zonas de estudio. Así mismo, se identificaron y localizaron estructuras elevadas como torres de transmisión, antenas de telecomunicaciones y edificaciones, y se estableció para cada una de ellas un radio de influencia de 300 m, teniendo en cuenta el error medio de localización de la Red LINET, de esta manera se determinaron las 20 estructuras con mayor número de impactos de rayo.

Resultados: Se encontraron los polígonos con mayor actividad de rayos, de los cuales 34 se ubican en Barrancabermeja y 235 en Yondó, lo que concuerda con mapas de *densidad de descargas a tierra* hechos en la zona en donde se presenta un aumento en la cantidad de descargas por kilómetro cuadrado por año en Yondó, en comparación con Barrancabermeja. Se localizaron 616 estructuras elevadas en los municipios de Barrancabermeja y Yondó de las cuales se

escogieron las 20 con mayor cantidad de impactos de rayo que corresponden en un 50 % a torres de transmisión, siendo la estructura de mayor número de impactos una torre de transmisión de 70 m de altura localizada en límites de los dos municipios de estudio con un total de 68 impactos.

Conclusiones: De las 27 estructuras elevadas encontradas en Yondó, solo 6 se ubican en algún *hotspot*, lo que muestra que en este municipio la presencia de alguna estructura elevada no garantiza un *hotspot* y que los sitios de mayor actividad de rayos no se ven influenciados por la presencia de estructuras elevadas. Ahora bien, para el caso de Barrancabermeja se hallaron 10 estructuras elevadas en un *hotspot*, de las cuales 7 están en el casco urbano donde se encontraron 9 *hotspots*, de donde se infiere que, en este municipio, el urbanismo y la presencia de estructuras elevadas si aumentan la actividad de rayos.

Financiamiento: Universidad Industrial de Santander.

Palabras clave: descargas atmosféricas, densidad de descargas a tierra (DDT), nivel cerámico (NC), estructuras elevadas, *hotspots*, Red LINET.

1.7 Introducción

Estudios demuestran que de los 500 *hotspots* o lugares de mayor actividad de rayos en el globo terrestre, 283 de ellos se ubican en África, 87 en Asia, 67 en Suramérica, 53 en Norteamérica y 10 en Oceanía. Sin embargo, el sitio con mayor tasa de densidad de rayos (FRD) se encuentra sobre el lago de Maracaibo, al norte de Venezuela, en donde se registran en total 233 descargas/km²/año (Albrecht et al., 2016), seguido por el *hotspot* hallado en la cuenca del Congo con un total de 205 descargas/km²/año (Christian et al., 2003). Siete de los 10 sitios de mayor actividad de rayos en Suramérica se encuentran en Colombia, ya que su territorio se ubica

en la zona de convergencia intertropical, donde confluyen los vientos alisios del sureste y del noreste, para los cuales las tres cordilleras que atraviesan la superficie del país sirven como barrera natural (Albrecht et al., 2016), lo que favorece la formación de tormentas eléctricas a altitudes entre 500 y 1500 m s. n. m., en donde se presentan los valores máximos de densidad de descargas a Tierra (DDT) (Aranguren et al., 2017).

De esta manera, en la totalidad del territorio nacional se presentan alrededor de 8 millones de descargas atmosféricas nube-tierra al año (Torres Sánchez, 2002). A pesar de que la densidad de descargas a Tierra varía de un año a otro, los lugares con alta actividad de rayos en Colombia se ubican siempre en regiones como el valle central del río Magdalena, el Catatumbo y el valle del río Cauca, en donde se registraron entre 1999 y 2013 valores máximos promedio de 34,6 descargas/km²/año (Herrera et al., 2018).

Las descargas atmosféricas son uno de los fenómenos naturales de mayor impacto en la sociedad en general, dado que hacen vulnerables a sistemas de soporte y asistencia vital y edificaciones con gran afluencia de personas o que contengan equipos frágiles, ocasionan salidas de líneas de distribución y transmisión, causan daños en sistemas eléctricos y generadores eólicos, y problemas de compatibilidad electromagnética en los sistemas de comunicaciones y afectación directa a sistemas de aviación (Rakov & Uman, 2003). Con lo que se producen pérdidas económicas y de vidas humanas y se afectan los indicadores de calidad de energía eléctrica como el SAIDI y el SAIFI. Por ello, el entendimiento de este fenómeno natural y su caracterización son de suma importancia para poder diseñar sistemas de protección más robustos, y elaborar planes encaminados a proteger vidas humanas y a mitigar daños materiales y pérdidas económicas (Del Río Trujillo, 2018).

Las estructuras elevadas tienen más probabilidad de ser impactadas por rayos que sus alrededores (Rachidi et al., 2008), dado que responden con líderes ascendentes de captura a los líderes escalonados que descienden de la atmósfera (Rakov & Uman, 2003). Así mismo, mientras que en las tormentas de invierno en latitudes medias se observa claramente cómo las estructuras elevadas inician líderes ascendentes, formando puntos de muy alta actividad de rayos (Candela Garolera et al., 2015; Montanyà et al., 2014; Mostajabi et al., 2018), las regiones tropicales como Colombia presentan DDT muy elevadas, por lo que es difícil que la actividad en un punto concreto, o sobre alguna estructura, pueda sobrepasar la media de la región y por tanto no resulta evidente la identificación de *hotspots* y tampoco la influencia de estructuras elevadas allí ubicadas en la cantidad de impactos de rayo. Hasta el momento, los sitios de alta actividad de rayos se han determinado con base en la ocurrencia espacial de descargas nube-tierra a través del parámetro de la DDT. La metodología planteada se basa en la ocurrencia temporal de descargas nube-tierra CG; es decir, para que una región sea un *hotspot*, se debe repetir el número de rayos y conservarse en el tiempo, o lo que es igual, se debe presentar de manera recurrente.

En este trabajo se determinan los lugares y las estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayo en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, a partir de información proporcionada por la Red Colombiana de Detección Total de Rayos, con tecnología LINET y se estudia la influencia de estructuras elevadas como torres de transmisión, antenas de telecomunicaciones y edificaciones en la actividad de rayos en esta región. Luego, presenta la metodología usada para la determinación de *hotspots* y estructuras, los cuales se agrupan en la sección de resultados. Por último, a modo de conclusiones, se da el número de sitios de mayor actividad de rayos por municipio y la presencia de estructuras elevadas en cada uno de ellos. Se

espera que los sitios en donde se ubica alguna estructura elevada correspondan a un *hotspot* o que, en general, tengan un número significativo de impactos de rayo.

1.8 Metodología

4.3.1 Base de datos: Red Colombiana de Detección Total de Rayos con tecnología LINET

En 2011 entra en operación la red de localización y detección de rayos (LINET), propiedad de Keraunos S. A. S. Esta red opera en rangos de frecuencia VLF/LF y es un sistema *Total Lightning* que entrega parámetros para cada *stroke* como el tiempo de ocurrencia, latitud, longitud, amplitud de la corriente de retorno, polaridad, tipo de descarga y altura de emisión, usando técnicas de tiempo de arribo (TOA, por su sigla en inglés) (Aranguren et al., 2014). Para la obtención de estos datos, se ubicaron 19 sensores en lugares estratégicos del territorio nacional, como se muestra en la figura 12, donde la separación entre sensores varía entre 90 km y 140 km (Aranguren et al., 2017).

Con esta distribución se logra una eficiencia en la detección de descargas nube-tierra del 99 % en zonas centrales del país; del 95 %, para regiones más alejadas como el Pacífico, la Caribe, la Orinoquía occidental y el bajo Cauca; del 90 %-80 %, para la Orinoquía oriental y el suroeste del país, y del 60 %, para la Amazonía. Para descargas intranube, estos valores de eficiencia disminuyen considerablemente y varían entre el 80 % y el 20 % (Keraunos S.A.S, 2015).

Figura 12. Ubicación geográfica de las estaciones de la red LINET

Cuando ocurre una descarga eléctrica, cada estación registra la forma de onda del campo magnético y su estampa de tiempo. Los datos de la detección son enviados en tiempo real por cada estación a una Unidad de Procesamiento Central, en la cual se ejecuta el algoritmo de detección de rayos que realiza la identificación y determinación de los parámetros de la descarga. Cada estación de medida se conforma de una antena de campo magnético que opera en las frecuencias VLF/LF, una antena GPS y una unidad de procesamiento de señal (Aranguren et al., 2013).

4.3.2 Procesamiento de datos de la Red LINET

La Red LINET cataloga las descargas nube-tierra como tipo 1, y las intranube como tipo 2. En este estudio solo se tuvieron en cuenta las descargas tipo 1 (*strokes*), lo que permite encontrar los sitios y estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayo. Teniendo en cuenta que hay zonas en el país en donde la amplitud mínima detectable de la corriente pico de descarga es de 10 kA (Aranguren et al., 2013; Williams, 2001), no se consideraron los impactos con corrientes menores a este valor. Los datos procesados de la Red LINET se encuentran desde enero de 2016 hasta febrero de 2020.

4.3.3 Estructuras elevadas, clasificación y radio de influencia

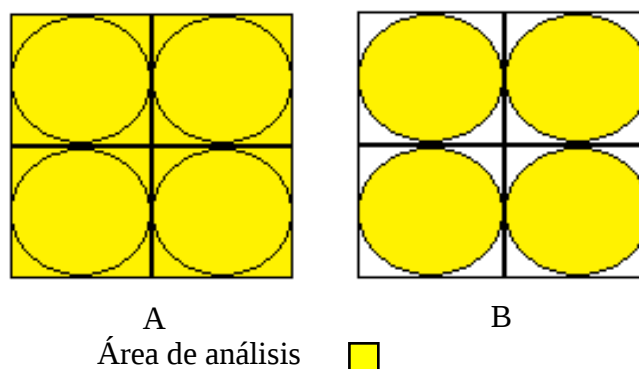
Mediante *Google Earth* y *Google Street View* se encontraron las coordenadas geográficas de un total de 616 estructuras elevadas ubicadas en los municipios de Barrancabermeja y Yondó. La totalidad de estructuras halladas se dividió en cuatro grupos: torres de transmisión de más de 20 m, antenas de telecomunicaciones de más de 30 m, edificios de más de 10 pisos de altura y otras estructuras como tanques elevados y reflectores de estadio. Para cada estructura se establece un radio de influencia de 300 m, teniendo en cuenta el error medio de localización la Red LINET; entonces, si una descarga CG se ubica dentro de dicho radio, se considera que impactó la estructura. La totalidad de estructuras halladas se encuentran dentro de la zona de alta eficiencia en la detección de la red Lightning Mapping Array (LMA), instalada en Barrancabermeja en 2018 y que detecta fuentes de radio en VHF emitidas por líderes de rayo en sus procesos de ionización. De esta manera, es posible reconstruir la propagación espacial y temporal de descargas atmosféricas (Rison et al., 1999a, 1999b) y establecer su interacción con alguna estructura elevada.

La red está compuesta por 6 estaciones, 4 de ellas ubicadas en campos petroleros de Ecopetrol, como Lisama, La Cira, Llanito y Casabe, y 2 en universidades como la Unipaz y la sede UIS Barrancabermeja, desde donde se establece la zona de alta eficiencia que corresponde a un radio de 45 km; en esta se pueden mapear las fuentes emitidas en los procesos de propagación de líderes de rayo y por tanto se minimiza el error en la localización de estas.

4.3.4 Localización de impactos y recuadros de 600 m de lado en los municipios a analizar

Para la caracterización de las zonas con mayor incidencia de rayos nube-tierra se ubicó cada *stroke* registrado por la Red LINET como un punto en el espacio, y se creó una cuadrícula de 600 m de lado sobre la superficie de los municipios de interés donde cada recuadro se aproxima a circunferencias con radio de 300 m que corresponde a la exactitud promedio de la Red LINET en la zona de estudio. Se evita el uso de circunferencias, ya que al ubicar círculos tangentes entre sí quedarían zonas por fuera de ellos, las cuales no se analizarían; en cambio, se traza una cuadrícula donde se circunscribe cada círculo y también se analiza la zona que queda por fuera de este. La figura 13 ilustra la metodología utilizada.

Figura 13. Área de análisis empleada para encontrar hotspots



Nota. A) recuadros de 600 m de lado; B) círculos tangentes de 300 m de radio

Además, la cuadrícula da resultados más exactos, dado que el área del recuadro es menor que la que se ha usado en la determinación de la DDT, lo que muestra con menor incertidumbre la influencia de la topografía del terreno en la actividad de rayos

4.3.5 Determinación del total de impactos por cuadrícula y por estructura

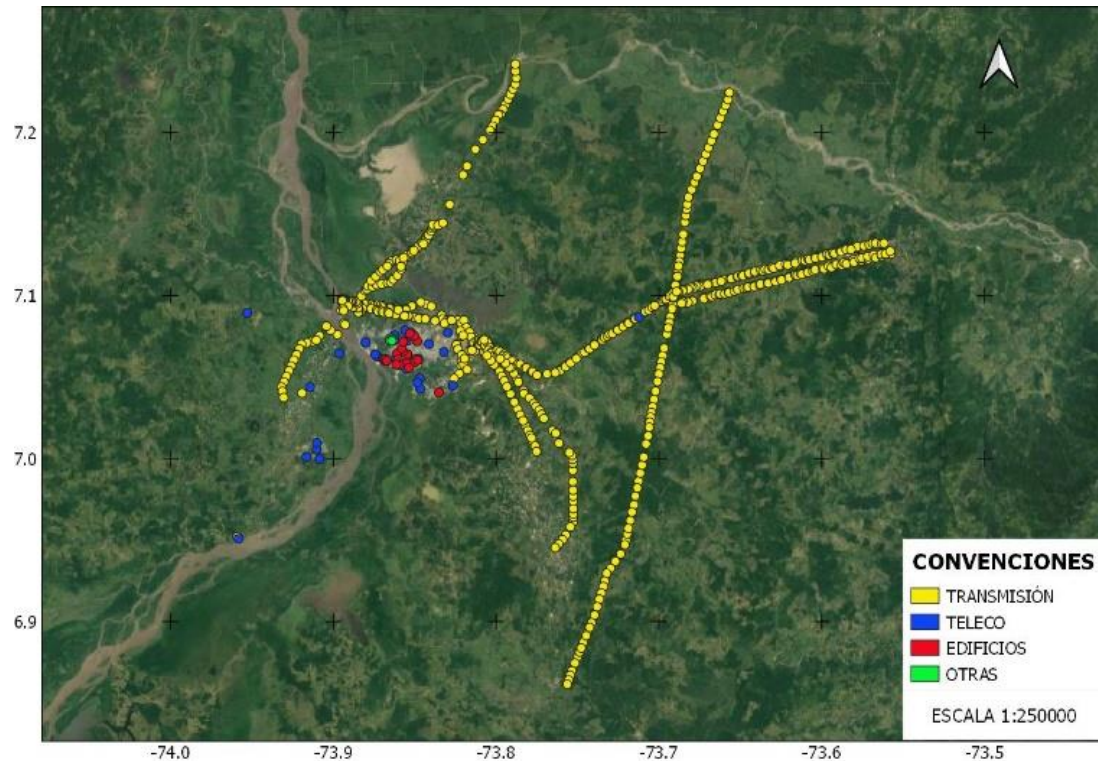
Mediante la herramienta análisis de puntos del programa *QGIS*, que permite cuantificar la cantidad de puntos dentro de cada polígono rectangular, se determina el número de impactos por cuadrícula, de esta manera se localizan mediante un centroide las zonas de mayor cantidad de impactos de rayo o *hotspots*.

En cuanto al análisis de estructuras elevadas, la información de la Red LINET se procesó diariamente para así determinar los días en que hubo una mayor interacción de descargas atmosféricas con estructuras elevadas. Para cada día se determinaron y cuantificaron las descargas que estuvieron dentro del radio de influencia de cada estructura y, finalmente, se escogieron las veinte estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos.

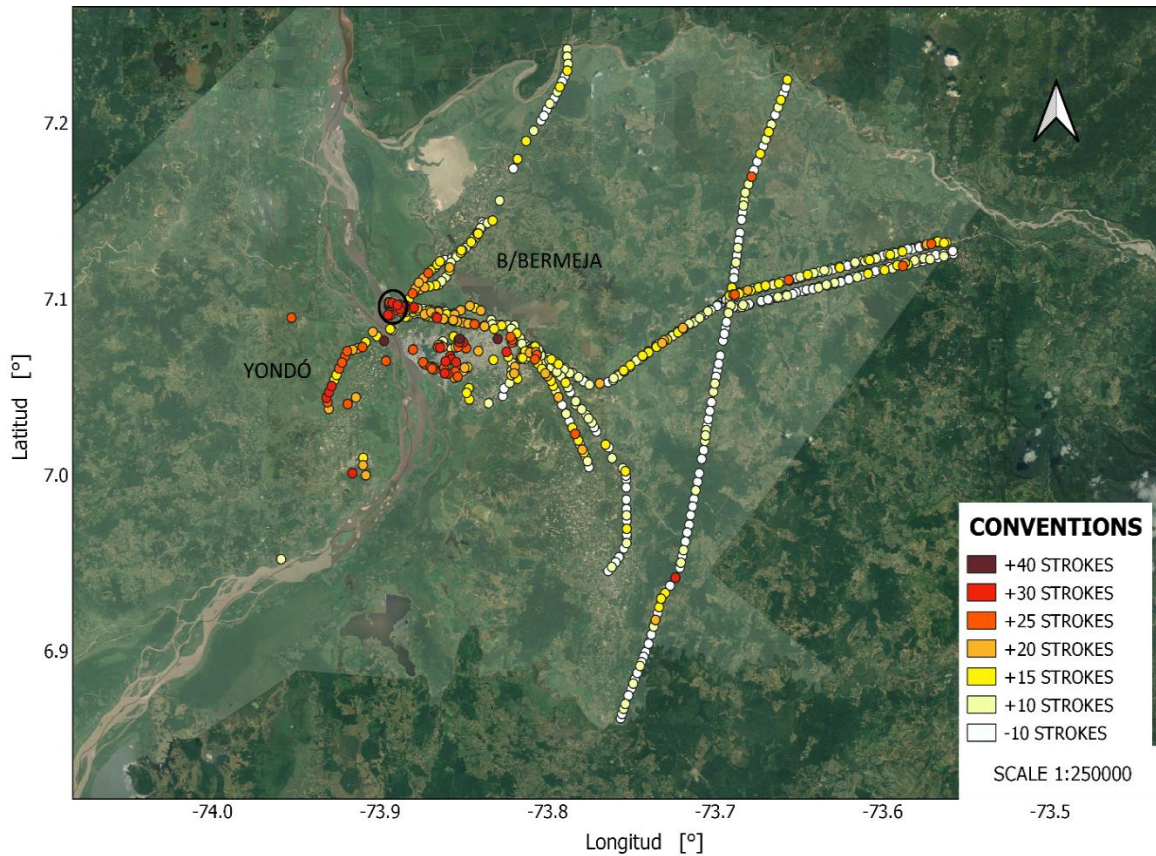
4.4 Resultados

4.4.1 Estructuras elevadas

La figura 14 muestra la ubicación de las 616 estructuras elevadas encontradas en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, entre las que se encuentran 549 torres de transmisión con alturas entre 40 m y 70 m, 31 torres de telecomunicaciones con alturas que varían entre 60 m y 70 m, 22 edificaciones de más de 30 m y 4 estructuras de iluminación de estadios de 50 m.

Figura 14. Ubicación geográfica de estructuras elevadas

La mayoría de las torres de transmisión forman parte del Sistema de Transmisión Nacional (STN) y corresponden a líneas de extra alta tensión como Barranca-Comuneros 230 kV, Comuneros-La Cira 230 kV, Comuneros-Merilétrica 230 kV y de alta tensión como Barranca Lizama 115 kV, Barranca-San Silvestre 115 kV, San Silvestre-Lizama 115 kV y Barranca-Puerto Wilches 115 kV. Así mismo, las antenas de telecomunicaciones se ubican en el casco urbano de Barrancabermeja y en el costado oriental de Yondó. La figura 15 ilustra la caracterización de estructuras elevadas según la cantidad de impactos de rayo en el periodo de tiempo de estudio.

Figura 15. Caracterización de estructuras elevadas según la cantidad de impactos de rayo recibidas

De acuerdo con la figura 4, las estructuras que se ubican en el casco urbano de Barrancabermeja, como edificaciones y antenas de telecomunicaciones, y la mayoría de las de Yondó, presentan una alta interacción con descargas atmosféricas, siendo la estructura de mayor número de impactos una torre de transmisión de 70 m de altura localizada en Yondó al finalizar el puente que cruza el río Magdalena. Se observa un aumento en la actividad de rayos en límites de los dos municipios en mención, especialmente en las torres de transmisión de 230 kV ubicadas cerca de la central termoeléctrica Termobarranca (dentro de la circunferencia negra) y en las

estructuras de las líneas de extra alta tensión que salen de esta subestación como la línea Barranca-Comuneros 230 kV.

Así mismo, algunas estructuras de las líneas que llegan a la subestación Lizama 115 kV provenientes de Barranca 115 kV y San Silvestre 115 kV presentan una importante interacción con descargas atmosféricas, como se observa en los puntos de coloración oscura a la derecha de la figura anterior. La figura 16 ilustra las veinte estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayo.

Figura 16. Estructuras elevadas con mayor número de impactos de rayo



Estas estructuras, sus características, ubicación e impactos de rayo se muestran en la Tabla 5, donde aparecen torres de transmisión (TRANS), antenas de telecomunicaciones (TELECO), edificaciones (EDIF), tanques elevados (TANQUE) y reflectores de estadio (REFL).

Tabla 5. Estructuras con mayor número de impactos en Barrancabermeja-Yondó

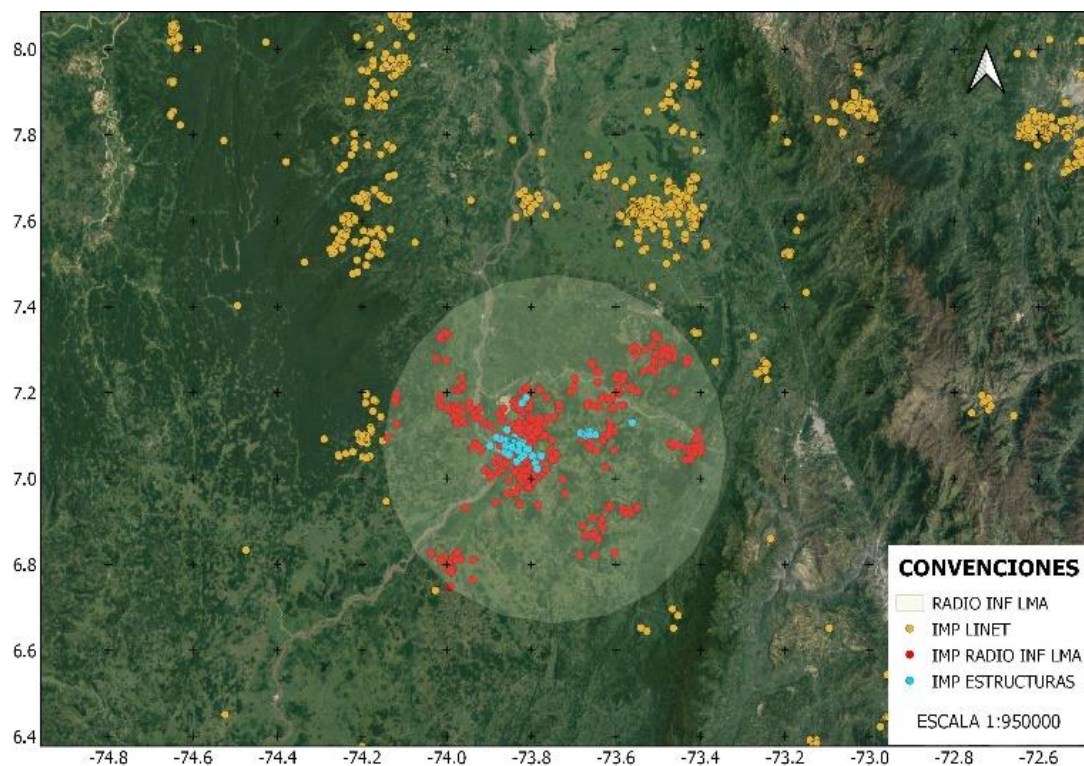
Torre	Lat.	Long.	Tipo	Altura [m]	Impact
1	7,076	-73,898	TRANS	70	46
583	7,077	-73,830	TANQUE	50	41
585	7,077	-73,852	TELECO	50	41
184	7,044	-73,932	TRANS	60	39
609	7,077	-73,853	EDIF	50	39
182	7,051	-73,929	TRANS	60	37
23	7,070	-73,824	TRANS	60	36
587	7,076	-73,852	TELECO	50	36
209	7,076	-73,851	EDIF	40	35
598	7,058	-73,861	EDIF	40	35
106	7,091	-73,894	TRANS	70	34
183	7,047	-73,930	TRANS	60	34
605	7,068	-73,858	EDIF	40	34
607	7,076	-73,853	EDIF	40	34
64	7,100	-73,880	TRANS	60	33
75	7,089	-73,866	TRANS	60	33
91	7,097	-73,890	TRANS	60	33
105	7,092	-73,894	TRANS	70	33
198	7,060	-73,855	EDIF	40	33
616	7,072	-73,864	REFL	40	33

El 50 % de estructuras elevadas con mayor número de impactos de rayo corresponden a torres de transmisión debido a que son las que presentan alturas mayores, las cuales varían entre 60 m y 70 m. La segunda estructura en la lista corresponde a un tanque elevado ubicado en el casco urbano de Barrancabermeja. Así mismo, aparecen dos antenas de telecomunicaciones de 50 m y seis edificaciones con alturas promedio de 40 m. Las estructuras 182, 183 y 184 corresponden a una línea de transmisión de 115 kV en Yondó en donde, según estudios como (Aranguren et al., 2017), se registra un aumento de la DDT.

Partiendo de la información de descargas nube-tierra suministrada por la Red LINET, se realizó un análisis diario para cada estructura entre noviembre de 2018 y noviembre de 2019. La

figura 17 muestra la actividad de rayos el 23 de noviembre de 2018. Los puntos amarillos corresponden a descargas nube-tierra detectadas por la Red LINET, de los cuales los puntos rojos corresponden a descargas dentro del radio de influencia de la Red LMA, y, por último, los puntos azules corresponden a descargas directas sobre alguna estructura elevada. Para este día en particular hubo 233 impactos (*strokes*) sobre estructuras elevadas, que alcanzaron una corriente máxima de -119,7 kA, de esta manera se pueden determinar las fechas de mayor interacción de impactos de rayo y estudiar su propagación a través de las fuentes mapeadas por la Red LMA en estudios posteriores.

Figura 17. Impactos de rayo en estructuras elevadas el 23 de noviembre de 18



Con base en lo anterior, en la Tabla 6 se determinan los impactos de rayo en estructuras y la cantidad de impactos dentro del radio de influencia de la Red LMA por mes.

Tabla 6. Impactos de rayo en estructuras y dentro del radio de inf entre noviembre de 2018 y 2019.

Mes	Imp. estruct.	Imp. inf. LMA
Nov. 18	748	14587
Dic. 18	3	374
Ene. 19	3	755
Feb. 19	37	5221
Mar. 19	195	5794
Abr. 19	162	10600
May. 19	787	14567
Jun. 19	393	10420
Jul. 19	283	7549
Ago. 19	243	11955
Sep. 19	487	13482
Oct. 19	488	12640
Nov. 19	685	14994

En mayo y noviembre se presenta una alta interacción de descargas atmosféricas con estructuras elevadas. Septiembre y octubre tienen una interacción media alta; junio, julio y agosto, un nivel medio; marzo y abril, un nivel medio-bajo, y diciembre, enero y febrero una baja interacción de rayos con estructuras elevadas. Este mismo comportamiento se presenta con las descargas dentro del radio de influencia de la Red LMA. Haciendo un estudio más detallado, la Tabla 7 muestra los días con mayor cantidad de impactos de rayo sobre estructuras elevadas.

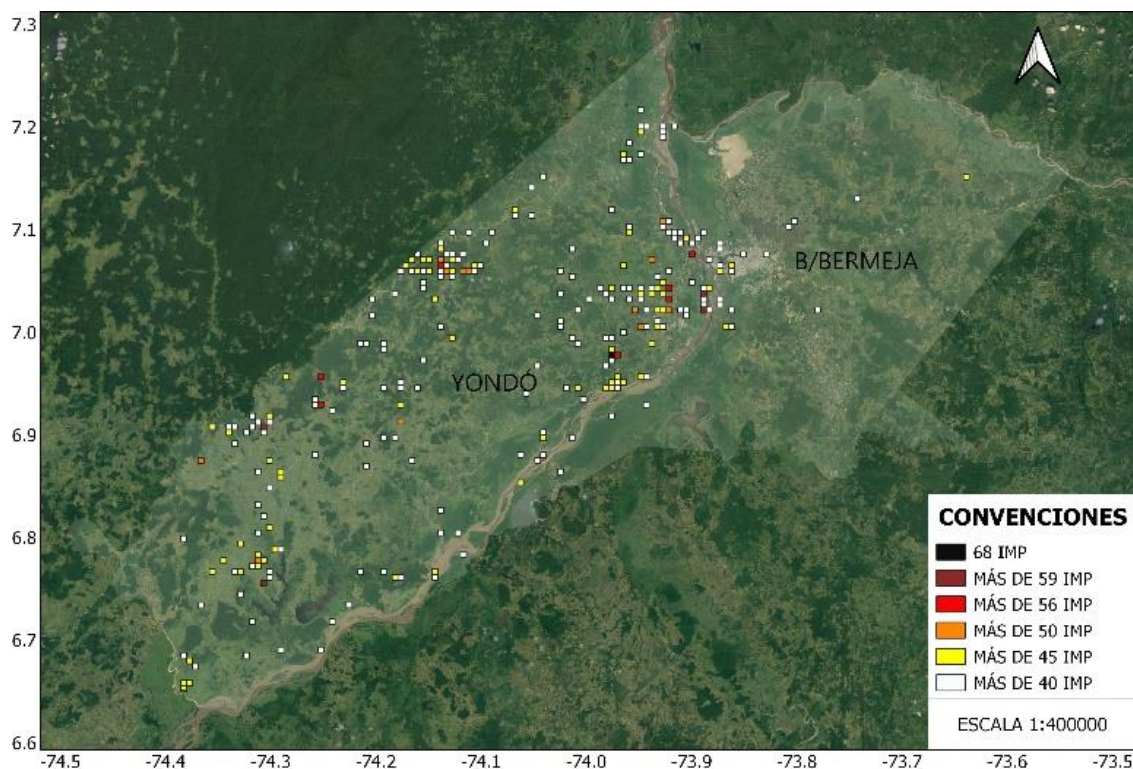
Tabla 7. Días de mayor cantidad de impactos en estructuras elevadas

Día	Imp. estruct.
24/may./19	587
23/nov./18	233
13/nov./18	196
11/nov./19	193
16/sep./19	183
24/jun./19	168
02/oct./19	150
13/jul./19	145
04/nov./19	130
22/nov./18	117

4.4.2 Hotspots

Los sitios con mayor cantidad de impactos de rayo se muestran en la figura 18, en donde las tonalidades oscuras indican una mayor actividad de rayos.

Figura 18. Sitios con mayor cantidad de impactos de rayo en los municipios de Barrancabermeja y Yondó



Teniendo en cuenta el periodo de estudio estipulado en la metodología, se encontraron 269 sitios con más de 40 impactos de rayo en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, siendo una zona boscosa ubicada al oriente de este último (con coordenadas geográficas 6,978, -73,976) el sitio con mayor cantidad de impactos con un total de 68.

De la totalidad de *hotspots*, 34 se ubican en el municipio de Barrancabermeja y 235 en Yondó, esto último coincide con mapas de DDT realizados en la zona en donde se evidencia una alta la actividad de rayos en Yondó, en comparación con Barrancabermeja. Los recuadros en tonalidades oscuras que se muestran en la figura 5 (de 56 a 68 descargas) coinciden con los sitios de mayor cantidad de descargas por kilómetro cuadrado por año, o DDT, los cuales tienen entre 40,4 y 53,9 descargas/km²/año.

Para el caso de Yondó, la mayoría de sitios de alta actividad de rayos en la región occidental corresponden a zonas boscosas, y algunos de ellos se ubican cerca de la ribera del río Magdalena. En la región central se observa una zona de alta densidad de *hotspots* comprendida entre latitudes de 7,0 y 7,1 grados, y longitudes de -74,1 y -74,2 grados. En el costado oriental, los sitios de mayor actividad hallados se distribuyen ampliamente, algunos de ellos se hallan en campos petroleros cercanos al casco urbano de Yondó. Esta zona es la que presenta la mayor actividad de rayos ya que se encontraron al menos 7 sitios en donde hubo entre 59 y 68 impactos.

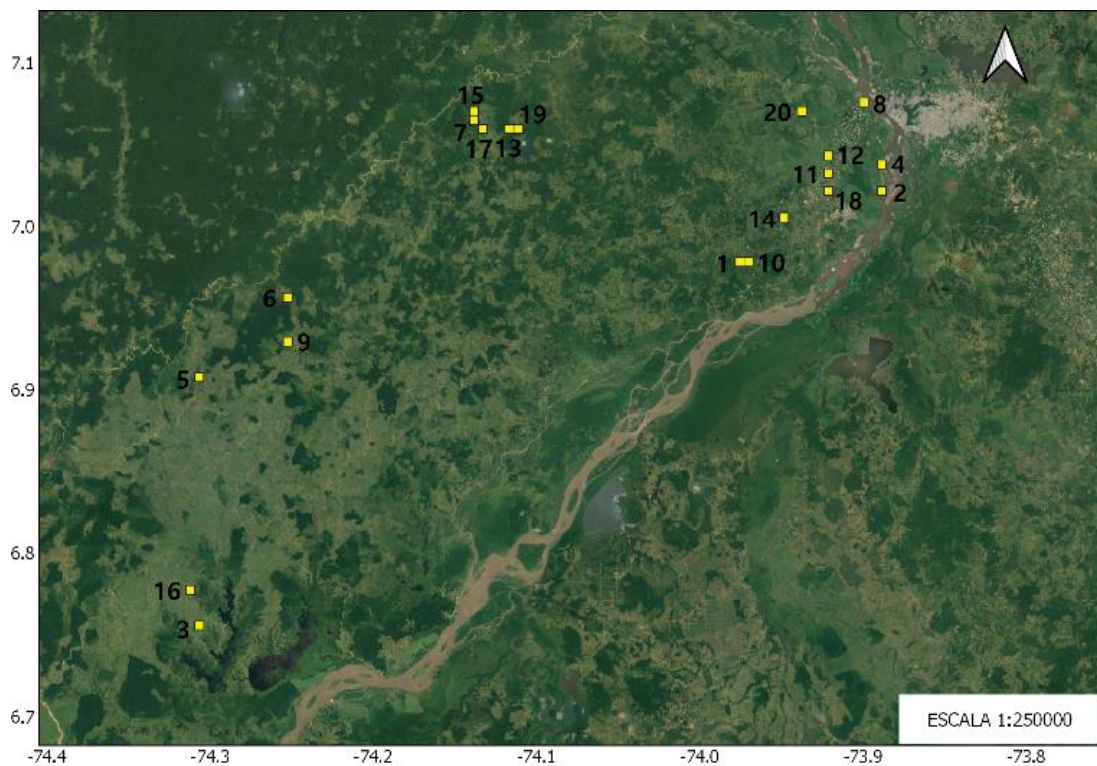
Para el caso de Barrancabermeja, se encontraron 9 *hotspots* en el casco urbano del municipio; otros 2, cercanos a la ciénaga de San Silvestre; 2, en la central de generación térmica Barranca, y los restantes, en zonas boscosas o en cercanas a la ribera del río Magdalena, como se observa en los costados norte y sur del municipio. De la totalidad de *hotspots* hallados, solo 4 de ellos presentan más de 45 impactos y en los sitios remanentes se registran al menos 40 impactos. La Tabla 8 muestra los 20 sitios con mayor cantidad de impactos de rayo en los municipios de estudio.

Tabla 8. Sitios con mayor cantidad de impactos de rayo

Hotspot	Impactos	Latitud	Longitud
1	68	6,978	-73,976
2	62	7,022	-73,889
3	60	6,756	-74,307
4	59	6,908	-74,307
5	59	7,038	-73,889
6	58	6,929	-74,252
7	58	7,076	-73,899
8	58	6,956	-74,252
9	58	7,065	-74,138
10	56	6,978	-73,970
11	56	7,032	-73,921
12	56	7,043	-73,921
13	55	7,005	-73,948
14	55	7,060	-74,117
15	54	6,777	-74,312
16	54	7,070	-74,138
17	53	7,060	-74,133
18	53	7,022	-73,921
19	53	7,060	-74,111
20	52	6,875	-74,366

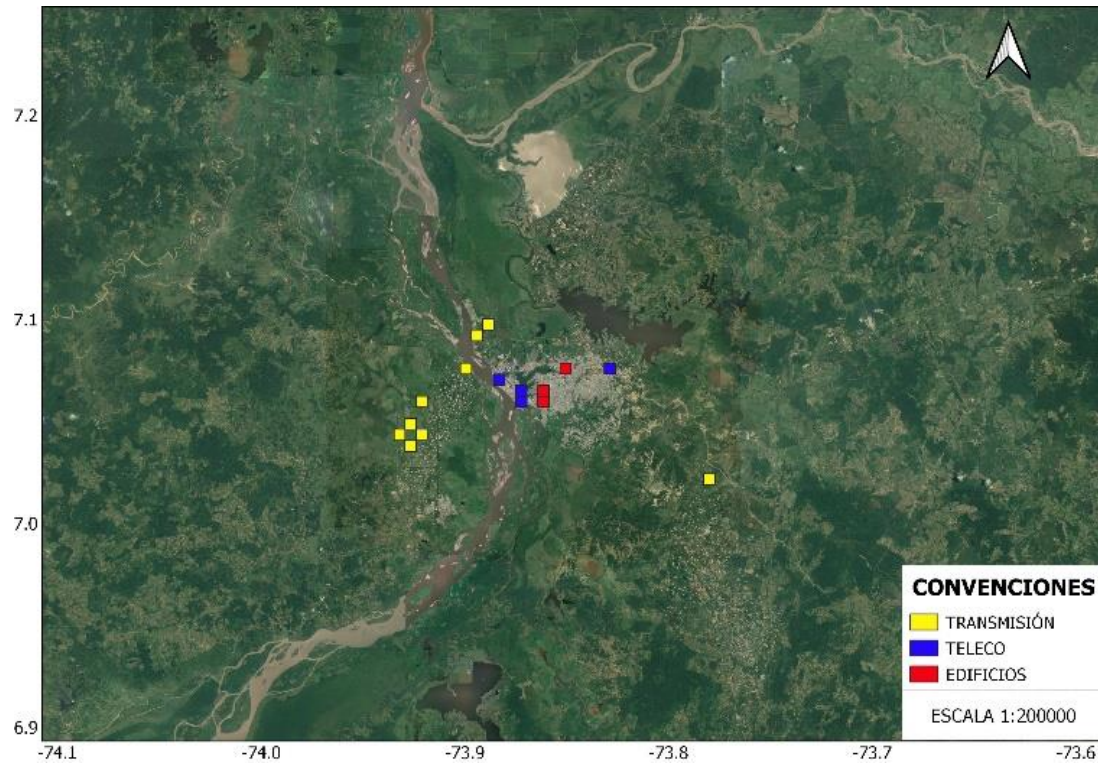
Lo anterior se muestra en la figura 19 donde se evidencia que la totalidad de estos sitios se ubican en el municipio de Yondó, lo que es coincidente con mapas de DDT como el mostrado en (Aranguren et al., 2017), donde se evidencia una amplia zona de mayor actividad de rayos en este municipio, en comparación con Barrancabermeja.

Figura 19. Principales hotspots en Barrancabermeja y Yondó



Ahora bien, de la totalidad de *hotspots* hallados se determinó en cuántos de ellos se ubicó alguna estructura elevada, de las que se muestran en la figura 15, con el fin de estudiar su influencia en la cantidad de impactos de rayo en determinada región. En la figura 20 se evidencia lo expuesto anteriormente, se observan nueve torres de transmisión presentes en algún *hotspot*, las cuales, debido al elevado número de impactos, registran la más alta probabilidad de flameos inversos hacia los conductores de fase, lo que ocasiona salidas de las líneas. Así mismo se observa una importante influencia del urbanismo en la determinación de los sitios con mayor cantidad de impactos de rayo, esto se demuestra dado que en el casco urbano de Barrancabermeja se ubican 7 *hotspots*, de los cuales en 4 se localizan antenas de telecomunicaciones y en tres edificaciones.

Figura 20. Estructuras elevadas presentes en los sitios de mayor cantidad de impactos de rayo



4.5 Conclusiones

Se localizaron 616 estructuras elevadas en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, de las cuales se escogieron las 20 con mayor cantidad de impactos de rayo que corresponden en un 50 % a torres de transmisión, siendo la estructura de mayor número de impactos una torre de transmisión de 70 m de altura localizada en límites de los dos municipios de estudio, con un total de 68 impactos. Estructuras elevadas presentes en el casco urbano de Barrancabermeja y la totalidad de las halladas en Yondó registran una importante interacción con descargas atmosféricas, así como las torres de transmisión cercanas a la central de generación térmica Termobarranca.

Se encontraron los sitios con mayor actividad de rayos, de los cuales, 34 se ubican en Barrancabermeja y 235 en Yondó, lo que concuerda con mapas de densidad de descargas a Tierra (DDT) hechos en la zona en donde se presenta un aumento en la cantidad de descargas por kilómetro cuadrado por año en Yondó, en comparación con Barrancabermeja.

De las 27 estructuras elevadas encontradas en Yondó, solo 6 se ubican en algún *hotspot*, lo que muestra que en este municipio la presencia de alguna estructura elevada no garantiza un *hotspot* y que los sitios de mayor actividad de rayos no se ven influenciados por la presencia de estructuras elevadas. Ahora bien, para el caso de Barrancabermeja, se hallaron 10 estructuras elevadas en algún *hotspot*, de las cuales 7 se ubican en el casco urbano donde se encontraron 9 *hotspots*, de donde se infiere que en este municipio el urbanismo y la presencia de estructuras elevadas sí aumenta la actividad de rayos.

Interacción de rayos con estructuras elevadas en zonas tropicales

Los resultados correspondientes al presente objetivo fueron presentados en el artículo “Análisis de estructuras de carga de dos tormentas eléctricas registradas por la red Lightning Mapping Array en el Magdalena Medio colombiano” publicado en el Vol. 27 No. 2 (2022): Mayo-Agosto de la revista Ingenierías y en la ponencia titulada “Lightning interaction with tall structures in tropical zones” realizada en el 36th International Conference on Lightning Protection en Capetown Sudáfrica.

Artículo 1: Análisis de estructuras de carga de dos tormentas eléctricas registradas por la red Lightning Mapping Array en el Magdalena Medio colombiano

5.1 Resumen

Contexto: A partir de la ubicación de la red Lightning Mapping Array LMA en límites de los municipios de Barrancabermeja y Yondó en 2018, se han tomado datos ininterrumpidos de descargas IC y CG que ocurren sobre esta zona de estudio. Hasta el momento no se han caracterizado tormentas eléctricas en zonas tropicales como el Magdalena Medio mediante el uso de redes de mapeo de rayos de alta resolución y, por tanto, en este trabajo se determina la estructura de carga de dos tormentas registradas por la red Dabeiba - LMA los días 23 y 27 de noviembre de 2018.

Método: Basados en métodos de inspección, en la teoría del líder bidireccional, en las diferencias de propagación de líderes positivos y negativos y mediante un algoritmo de visualización de datos se definieron las alturas de los centros de carga de las tormentas estudiadas.

Así mismo, usando información de la red LINET, se determinaron posibles descargas CG que ocurrieron en las ventanas de tiempo estudiadas con sus respectivas corrientes y polaridades.

Resultados: Ambas tormentas presentan una estructura tripolar; en la tormenta del 23 de noviembre la altura de la región de carga positiva inferior se localizó entre 5 y 7,5 km, la región de carga negativa se identificó entre 7,5 y 9 km y la positiva superior entre 9 y 14,5 km. Para el caso de la tormenta del 27 de noviembre, las regiones de carga positiva inferior, negativa y positiva superior se localizaron entre 4 y 6 km, 6 y 8,5 km y 8,5 y 16 km respectivamente.

Conclusiones: En general las alturas de las regiones de carga para ambas tormentas son similares a las encontradas por la red COLMA ubicada en Santa Marta, Magdalena. Se corroboraron líderes de rayos que alcanzaron alturas máximas de 15 km, un poco menores a las reportadas en la región norte de Colombia.

Palabras clave: descarga atmosférica, estructura de carga, líder de rayo, Lightning Mapping Array - LMA, tormenta eléctrica.

Agradecimientos: A la empresa Keraunos por el suministro de datos de la Red Colombiana de Detección Total de Rayos con Tecnología LINET. Así mismo al grupo Lightning Research Group de Universidad Politécnica de Cataluña por suministrar los datos de tormentas eléctricas de la red LMA en Barrancabermeja - Yondó.

1.9 Introducción

La estructura de carga de nubes de tormenta fue estudiada inicialmente a través de mediciones del campo electrostático producido por descargas atmosféricas usando el método del electrómetro esférico de Wilson (Wang, 1963). Posteriormente se observaron propiedades

eléctricas de tormentas tropicales oceánicas explicadas a través del proceso de electrificación de graupel (Takahashi, 1978) y se planteó una estructura de carga tripolar compuesta por una capa central negativa, una región positiva superior y una pequeña región positiva inferior (Williams, 1989).

Los primeros análisis de descargas atmosféricas usando sistemas Lightning Mapping Array - LMA se hicieron en Oklahoma y Nuevo México en 1999, basados en sistemas Lightning Detection and Ranging - LDAR. Este método calcula el tiempo de llegada (TOA) de la radiación impulsiva producida por fuentes emitidas durante la propagación de líderes de rayos en el rango de muy alta frecuencia (VHF), lo que permite localizar cada fuente y de esta manera reconstruir tridimensionalmente una descarga eléctrica (Rison et al., 1999a). El estudio determinó la estructura de carga eléctrica de tormentas y concluyó que el evento inicial de las descargas intranube ocurre entre la región de carga negativa principal y la positiva superior y se denomina ruptura bipolar positiva.

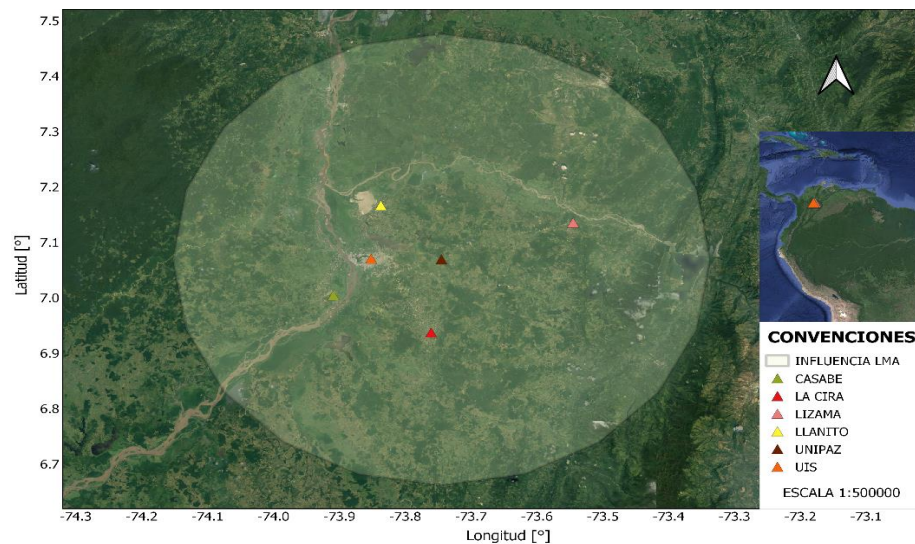
Más adelante se determinó de manera teórica y experimental la precisión de la red de mapeo de rayos ubicada entre el noreste de Kansas y el este de Colorado, de donde se concluyó que las fuentes detectadas se localizan con una incertidumbre espacial de 6 a 12 metros en la horizontal y de 20 a 30 metros en la vertical y una incertidumbre temporal de 40 a 50 ns (Thomas et al., 2004). Estudios subsiguientes compararon mediciones de campo eléctrico con datos de sistemas LMA e indicaron que las fuentes de radiación iniciales en un rayo ocurren en o cerca de la ubicación del inicio de la descarga dentro de un radio que varía entre 30 y 400 metros, lo que permitió usar en adelante las redes LMA para determinar la ubicación del inicio de una descarga eléctrica (Marshall et al., 2005).

Mediante estas redes también se ha caracterizado la velocidad de propagación de líderes de rayos. En (Behnke et al., 2005) se encontró que los líderes iniciales en descargas intranube comienzan a una velocidad mediana de aproximadamente $1,6 \times 10^5$ m/s y se desaceleran durante los primeros 10 a 15 ms de la descarga. Posteriormente usando esta misma metodología se mostró que los líderes escalonados que ocasionan una descarga negativa se propagan a velocidades cercanas a $1,3 \times 10^5$ m/s (Zhang et al., 2010). Estos sistemas se han usado en su mayoría en zonas templadas como España en donde se caracterizó el desarrollo de líderes bidireccionales y se demostró que la diferencia de velocidad cambia el potencial del líder (van der Velde & Montanyà, 2013). En Estados Unidos se relacionó la estructura de carga de tormentas con la altitud de las descargas (Fuchs & Rutledge, 2018) y se realizaron otras investigaciones en zonas tropicales como Brasil en donde también se estudiaron propiedades de nubes de tormenta (Machado et al., 2014).

Dentro del marco del proyecto de ASIM (www.asim.dk) y con el apoyo de la Universidad Politécnica de Cataluña se instaló por primera vez en el país una red LMA denominada Colombian Lightning Mapping Array - COLMA ubicada en Santa Marta entre los años 2015 y 2017. Los primeros hallazgos determinaron que las nubes de tormenta en zonas tropicales tienen una extensión vertical de entre 3 y 15 km de altura y que la mayoría de líderes de rayo inician cerca de los 10 km de altura, 2 km más altos en comparación con tormentas estudiadas en España (López et al., 2016). Posteriormente se encontró que las tormentas tropicales en la zona presentan una estructura tripolar en la que la región de carga positiva superior se encuentra entre 10 y 15 km, la negativa central entre 6 y 9 km y la positiva inferior entre 4 y 6 km, estas dos últimas se ubican entre 2 y 3 km por encima de tormentas medidas en Florida y se hallaron además líderes que se propagaron a alturas de hasta 16 km (López et al., 2019).

En 2018 la Universidad Politécnica de Cataluña, con el apoyo de la Universidad Industrial de Santander UIS y la empresa Keraunos, decidió trasladar la red COLMA al Magdalena Medio con el fin de caracterizar tormentas tropicales en una región de alta actividad de rayos. Para este estudio la red se ubicó entre los municipios de Barrancabermeja y Yondó, y tomó el nombre de Dabeiba - LMA, inspirado en la bondad Dabeiba de la cultura indígena Katia. Las ubicaciones de las estaciones se observan en la figura 21 donde cuatro de ellas corresponden a campos petroleros de Ecopetrol (Lisama, La Cira, Llanito y Casabe) y las restantes se localizan en la sede de la UIS en Barrancabermeja y en la Unipaz (Instituto Universitario de la Paz). La zona sombreada corresponde al radio de influencia de la red Dabeiba - LMA (45 km medidos desde la estación Unipaz) en donde la eficiencia en la detección y localización de las fuentes emitidas por líderes de rayos es óptima.

Figura 21. Ubicación de los sensores de la red Dabeiba - LMA en los municipios de Barrancabermeja y Yondó, Santander.



Hasta el momento no se han caracterizado tormentas eléctricas en zonas ecuatoriales como el Magdalena Medio mediante el uso de redes de mapeo de rayos de alta resolución; por lo tanto, en este trabajo se determina la estructura de carga de dos tormentas registradas por la red Dabeiba - LMA los días 23 y 27 de noviembre de 2018. Se usa el método de inspección y la teoría del líder bidireccional para analizar descargas individuales a través del gráfico de tiempo-distancia desarrollado en (van der Velde & Montanyà, 2013), el cual compara las velocidades de propagación de los líderes mapeados y de esta manera permite encontrar su polaridad e inferir la estructura de carga de la nube de tormenta. Dado que la red LMA pierde eficiencia en la detección de fuentes a alturas bajas, p. ej. a un kilómetro, se incluye información de la red LINET que localiza los impactos de rayo ocurridos durante las tormentas estudiadas.

Este artículo presenta en su segunda sección la metodología aplicada con el fin de delimitar las alturas de los centros de carga, muestra a modo de resultados en su tercera sección algunos ejemplos de las descargas individuales que se estudiaron con el fin de demarcar cada una de estas regiones. En la cuarta sección se discuten los resultados obtenidos y se comparan con los encontrados en otros estudios, y por último en su quinta sección presenta a modo de conclusiones las características encontradas en estos dos casos de estudio en cuanto a altura de las regiones de carga y alturas de iniciación y de propagación de líderes mapeados.

1.10 Metodología

1.10.1 Determinación de la estructura de carga

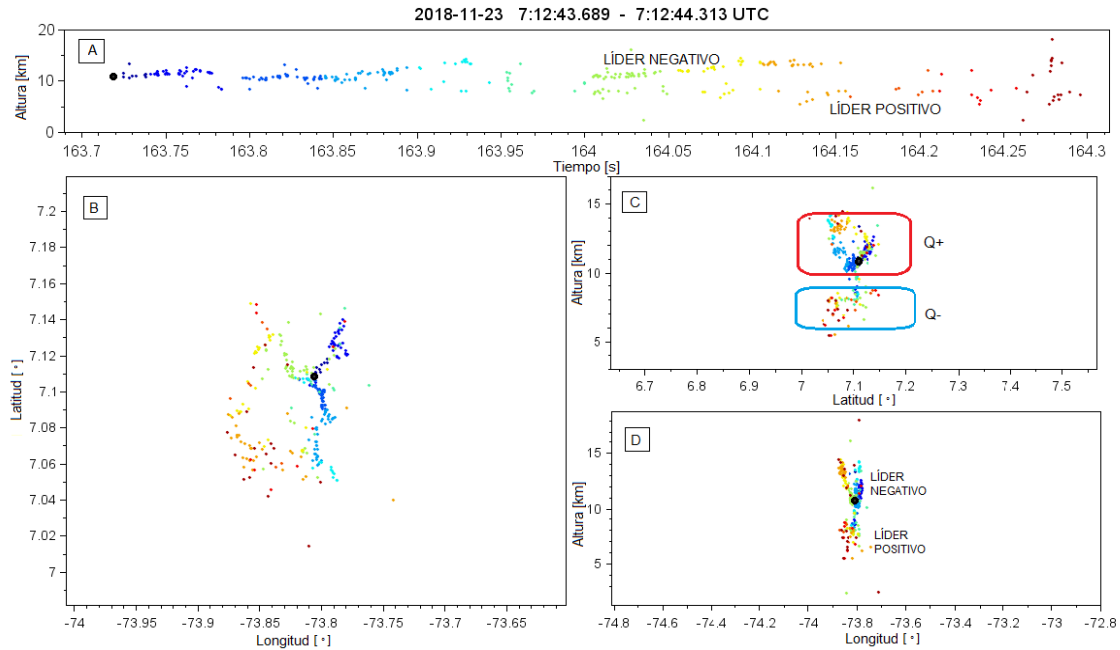
La teoría del líder bidireccional expuesta por primera vez en (Kasemir, 1960) afirma que las descargas atmosféricas se inician entre regiones de carga con polaridad opuesta, debido al

elevado campo eléctrico que existe entre ellas, y se extienden como árboles de doble extremo, uno negativo (líder negativo) que se propaga sobre regiones de carga positiva, y uno positivo (líder positivo) en dirección contraria sobre regiones de carga negativa (Wiens et al., 2005; Williams, 2006).

Basados en lo anterior se logra determinar regiones de carga a través de la localización de fuentes VHF emitidas en los procesos de propagación de líderes de rayos, entendiendo que un líder negativo es más visible que un líder positivo en las frecuencias de radio usadas por la red LMA, lo que da como resultado líderes negativos densamente mapeados en comparación con los líderes positivos (Rison et al., 1999a). Esto indica que una descarga atmosférica tiene un número relativamente mayor de fuentes mapeadas dentro de las regiones de carga positiva involucradas en su desarrollo en comparación con las fuentes mapeadas en regiones de carga negativa (Wiens et al., 2005).

La determinación de esta última región se logra parcialmente a través de líderes de retroceso que son líderes negativos que se desplazan hacia el origen de la descarga a través de los canales ionizados que dejan los líderes positivos cuando no logran seguir propagándose (Mazur & Ruhnke, 1993). Estos líderes intentan re-ionizar el canal formado por el líder positivo. Teniendo en cuenta lo anterior y entendiendo que los líderes positivos no producen una radiación significativa que detecte la red LMA, se usa la hipótesis de que los líderes de retroceso vuelven a trazar partes de los canales dejados por líderes positivos, lo que sirve para determinar parcialmente regiones de carga negativa que se caracterizan por una reducida cantidad de fuentes mapeadas (Mazur, 1989). La Figura 22 muestra una descarga bidireccional individual (flash) en donde se localizan las regiones de carga a través de la identificación de líderes positivos y negativos.

Figura 22. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:12:43.689 y las 7:12:44.313 UTC.



Nota. El panel A representa la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial o vista de planta en latitud-longitud (0.1° en latitud es igual a 11,11 km), el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo (el color se usa para visualizar la ocurrencia temporal de la descarga) y el círculo negro ubica el inicio de la descarga.

1.10.2 Visualización de datos

Mediante el algoritmo LMA Zoom-Viewer desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña - UPC por el grupo de investigación Lightning Research Group - LRG se obtiene la ubicación espaciotemporal de las fuentes mapeadas en la propagación de líderes de rayo, usando paneles de diez minutos de duración como los de las figuras 15 y 24 y a través de la evolución de

descargas individuales mostradas en paneles como el de la figura 16. Lo anterior permite definir las alturas de las regiones de carga usando el método de inspección, esto es, regiones de carga positiva identificadas por una gran cantidad de fuentes mapeadas y regiones negativas por un reducido número de fuentes. Este algoritmo determina la altura de iniciación de descargas y tasas promedio de rayos entre otros.

1.10.3 Red Colombiana de Detección Total de Rayos LINET

En 2011 entra en operación la red de localización y detección de rayos LINET, propiedad de Keraunos SAS. Esta red opera en rangos de frecuencia VLF/LF y es un sistema Total Lightning que entrega parámetros para cada impacto de rayo (stroke) como el tiempo de ocurrencia, latitud, longitud, amplitud de la corriente de retorno, polaridad, tipo de descarga, altura de emisión y forma de onda usando técnicas de tiempo de arribo con modificaciones para obtener soluciones en 3D (Aranguren et al., 2013).

Para la obtención de estos datos se ubicaron 19 sensores en lugares estratégicos del territorio nacional con líneas base entre 90 y 140 km (López et al., 2019). Cada estación de medida se conforma de una antena de campo magnético que opera en las frecuencias VLF/LF, una antena GPS y una unidad de procesamiento de señal. Los impactos de rayo (descarga nube-tierra) detectados por la red LINET se ubican dentro de los paneles del LMA Zoom-Viewer con los símbolos ‘X’ para impactos con polaridad de corriente negativa (-CG stroke) y ‘+’ para los que tienen polaridad de corriente positiva (+CG stroke).

1.10.4 Análisis tiempo-distancia de descargas (velocidad de propagación)

Se usa el gráfico de tiempo-distancia desarrollado por van der Velde y Montanyà (van der Velde & Montanyà, 2013), en el cual se reducen las dos dimensiones horizontales a una sola, llamada distancia a un punto de referencia, que corresponde al punto de inicio de la descarga, lo que permite que los ejes de tiempo y distancia sean relativos a la primera fuente de la descarga. Se presentan a lo largo del artículo dos tipos de gráficos de tiempo-distancia. En uno de ellos la coloración de las fuentes corresponde al tiempo, lo que permite identificar la polaridad de los líderes, dado que la variable del tiempo evita que se enmascaren entre sí. En el otro la escala de colores denota la altitud, luego el cambio de coloración de las fuentes permite determinar si un líder se propaga de forma ascendente o descendente.

De esta manera, la pendiente que se forma con las fuentes mapeadas da una noción de la velocidad de propagación del líder y por tanto de su polaridad. Aquellas fuentes que sigan la pendiente de menor inclinación hacen referencia a las velocidades de propagación de líderes positivos 2×10^4 m/s y aquellas con mayor inclinación a líderes negativos (1×10^5 a 1×10^6 m/s).

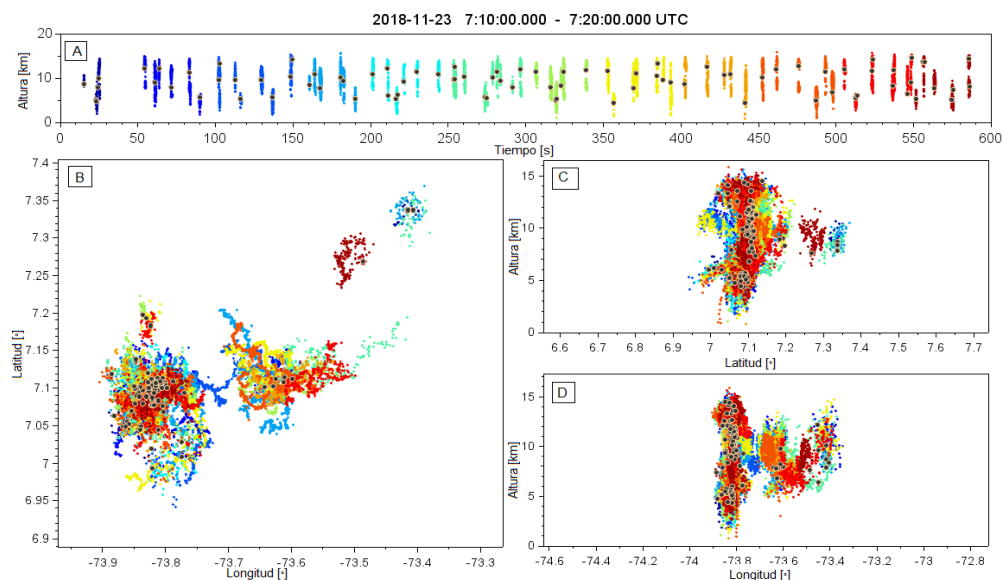
1.11 Resultados

1.11.1 Tormenta del 23 de noviembre de 2018

La figura 23 muestra diez minutos del desarrollo espaciotemporal de una tormenta ocurrida el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:10:00 y 7:20:00 UTC. El panel A representa la variación altura-tiempo de las fuentes mapeadas, las cuales forman descargas individuales (grupo de puntos verticales). El panel B corresponde a una distribución espacial en latitud-longitud de las descargas detectadas en la que se observa la evolución horizontal de la celda inferior entre 6.9 y 7.2 grados

en latitud (aprox. 25,55 km) y entre -73.42 y -73.87 grados en longitud (aprox. 49,99 km). Los paneles C y D son cortes verticales altura-latitud y altura-longitud respectivamente en donde se evidencian líderes de rayos que se propagan a alturas entre 1,7 y 15,2 km. En total se mapearon 17.375 fuentes de radiación impulsiva en VHF y se registraron 89 descargas individuales con una tasa promedio de siete rayos por minuto. El color de las fuentes para todos los paneles de la figura denota el tiempo y los puntos negros el inicio de cada descarga individual. Así mismo, durante estos diez minutos de actividad la red LINET registró 99 impactos de rayo (strokes) con una mediana de corriente de descarga de retorno de 21,1 kA.

Figura 23. Diez minutos de actividad de una tormenta mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:10:00 y 7:20:00 UTC.

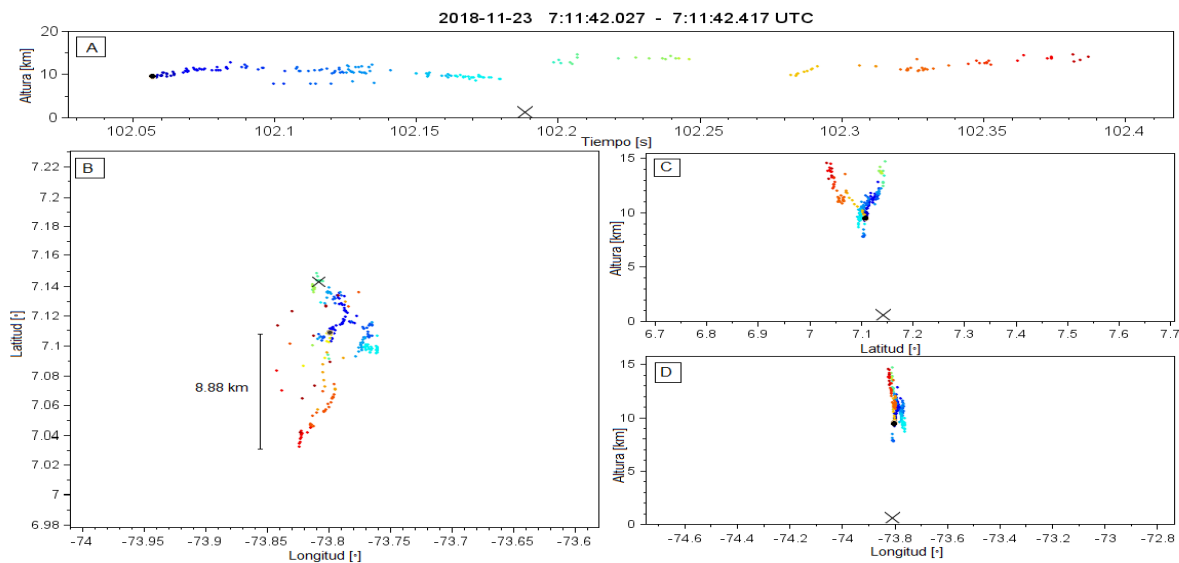


Nota. El panel A corresponde a la distribución temporal de las descargas individuales en altura-tiempo, el B representa su distribución espacial o vista de planta en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos denotan las fuentes

mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y los círculos negros ubican el inicio de cada descarga.

A continuación, se presentan algunos ejemplos del análisis realizado a las descargas individuales registradas en la figura 23A. Se aclara que los resultados obtenidos no se basan únicamente en los ejemplos presentados con el fin de ilustrar la metodología. La figura 24 presenta la distribución espaciotemporal de las fuentes mapeadas durante una descarga ocurrida entre las 7:11:42,027 y las 7:11:42,417 UTC que inicia a una altura de 9,5 km (origen de la descarga indicado por el punto negro) y se alcanza una extensión horizontal máxima de 8,9 km desde el origen de la descarga (ver panel B) a alturas entre 7,5 y 14,5 km (ver paneles C y D).

Figura 24. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:11:42,027 y las 7:11:42,417 UTC.



Nota. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos son fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo, el círculo

negro ubica el inicio de la descarga y el símbolo X corresponde a un impacto nube-tierra negativo (-CG stroke) registrado por LINET.

Los paneles A, C y D de la figura 16 muestran el desarrollo bidireccional de la descarga, puesto que se observan fuentes que ocurren en el mismo instante de tiempo (igual coloración) pero a diferentes alturas. Así mismo, la red LINET detecta un impacto -CG (símbolo X) a las 07:11:42,189 UTC en las coordenadas 7.141, -73.809 con una corriente de -12,1 kA.

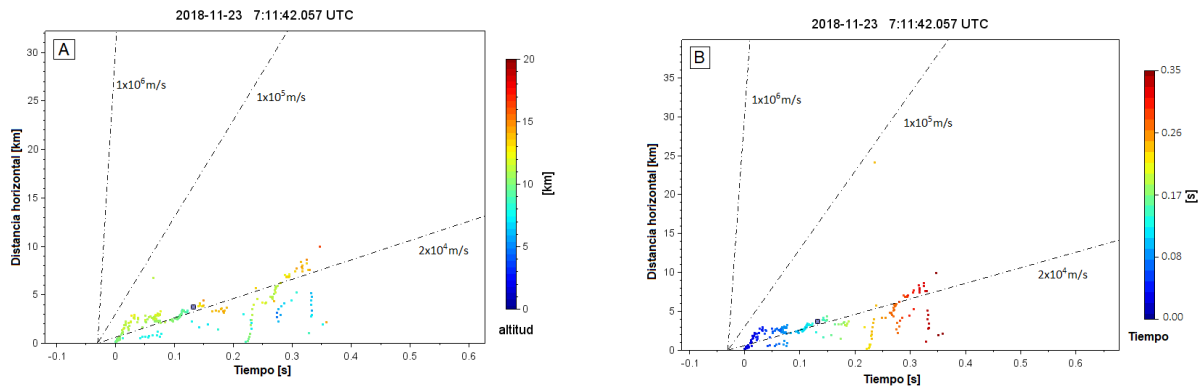
La figura 25 analiza la descarga individual presentada en la figura 24 mediante dos gráficas de tiempo-distancia para las cuales la coloración de las fuentes en el panel A denota la altura y en el panel B el tiempo. El panel A permite observar un líder negativo ascendente que se propaga a velocidades cercanas a 1×10^5 m/s desde una altura de 9,5 km (tono verde claro) hasta alcanzar un máximo de 13 km (tono amarillo) transcurridos 0,05 segundos después el inicio de la descarga (punto 0,0); posteriormente, a los 0,13 segundos, el líder desciende a una altura mínima cercana a los 9 km delimitando la región de carga positiva superior entre 9 y ~13 km de altura. En el intervalo de 0,05 y 0,35 segundos se observan algunas fuentes de líderes negativos de retroceso que se propagan sobre los canales ionizados por líderes positivos (en adelante a estas fuentes de retroceso se les llamará únicamente líderes positivos) a altitudes entre 7,5 y 9 km (tono celeste), lo que acota a estas alturas la región de carga negativa central de la estructura de carga. La pendiente que forman estas fuentes se ajusta a los 2×10^4 m/s correspondiente a la velocidad media de propagación de líderes positivos.

Al cabo de 0,2 segundos del inicio de la descarga se observa un líder negativo ascendente que se propaga 0,2 segundos hasta una altura máxima de 15 km (tono naranja), lo que sugiere que este líder alcanza alturas de propagación elevadas típicas en tormentas tropicales como se ha

mostrado en [13]. Al mismo tiempo se observan algunas fuentes de líderes negativos en tono celeste entre los 5 y 7,5 km que delimitan la región de carga positiva inferior.

El panel B evidencia el desarrollo temporal de la descarga e identifica fuentes que ocurren en un mismo instante de tiempo (igual coloración) pero a diferente altura (diferencia de color en el panel A), lo que permite ubicar fuentes de líderes de retroceso en la región de carga negativa central.

Figura 25. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 4.

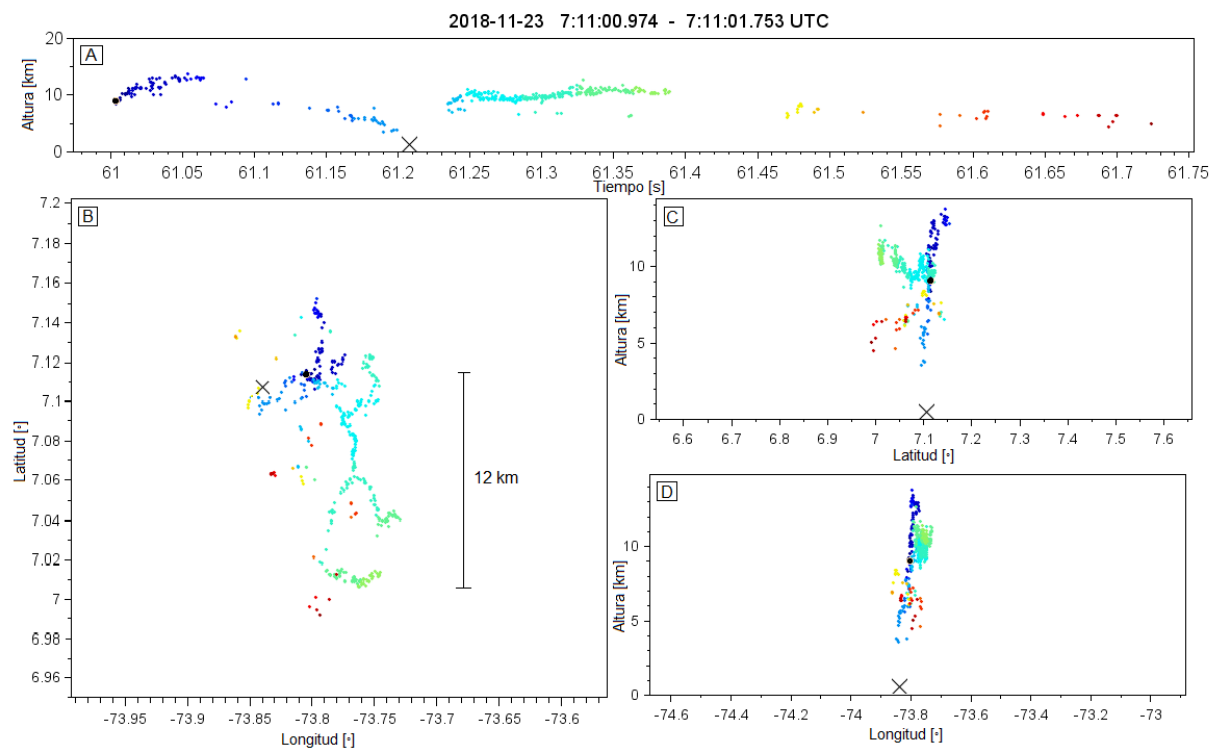


Nota. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. Los ejes de tiempo y distancia son relativos al punto 0,0 que corresponde al origen o inicio de la descarga (primera fuente mapeada) y el recuadro ubica un impacto de rayo detectado por la red LINET. La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos (2×10^4 m/s) y de líderes negativos (1×10^5 m/s y 1×10^6 m/s).

La figura 26 muestra una segunda descarga individual ocurrida entre las 7:11:00,974 y las 7:11:01,753 UTC que inicia a una altura de 9 km y se propaga de manera ascendente como lo muestran las fuentes en tono azul en los paneles A, C y D. Instantes después se mapean fuentes de

un líder descendente a alturas entre 3 y 7 km (fuentes del panel A en tonalidad azul capri que pierden altura a lo largo del tiempo) y se registra un impacto -CG en las coordenadas 7,107, -73,840 con corriente máxima de -38.1 kA. Posteriormente se mapean fuentes de un líder ascendente (cambio de tonalidad celeste a verde en paneles A, C y D) a alturas entre 9 y 12 km el cual presenta múltiples ramificaciones y alcanza una extensión horizontal máxima de 12 km desde el punto de inicio de la descarga como se observa en el panel B.

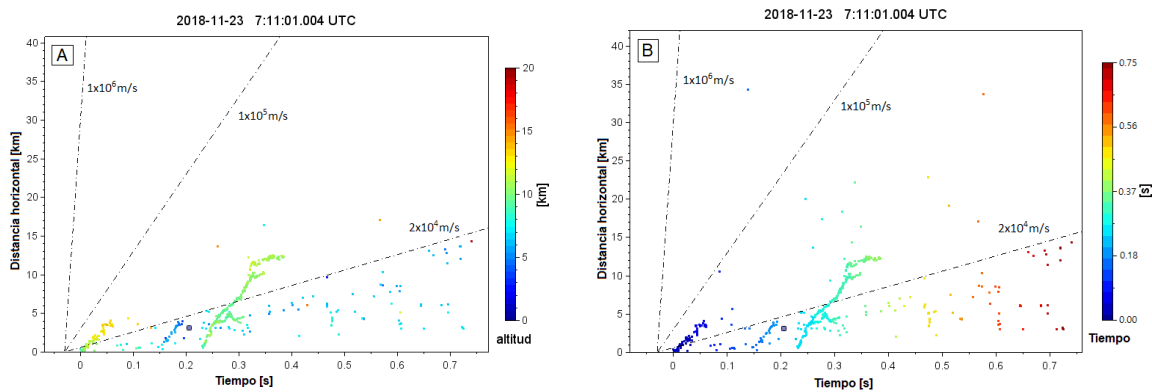
Figura 26. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:11:00,974 y las 7:11:01,753 UTC.



La figura 27 expone las gráficas de tiempo-distancia de la descarga mapeada en la figura 18. En el panel A se observa un líder negativo ascendente que inicia a una altura de 9 km (punto 0,0) y se propaga a una altura máxima de 13 km como lo muestra el cambio de coloración de verde

a amarillo en la primera pendiente. Transcurridos 0,1 segundos desde el origen de la descarga se observan algunas fuentes emitidas por líderes positivos a alturas de 8 km (tonos celestes) en donde se ubica la región de carga negativa. A los 0,2 segundos, a una altura de 7 km, un líder negativo descendente (indicado por la segunda pendiente con cambio de coloración azul capri) se propaga sobre la región de carga positiva inferior, cuyas últimas fuentes mapeadas se registran a alturas cercanas a los 3 km; instantes después la red LINET detecta la descarga -CG descrita.

Figura 27. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 6.

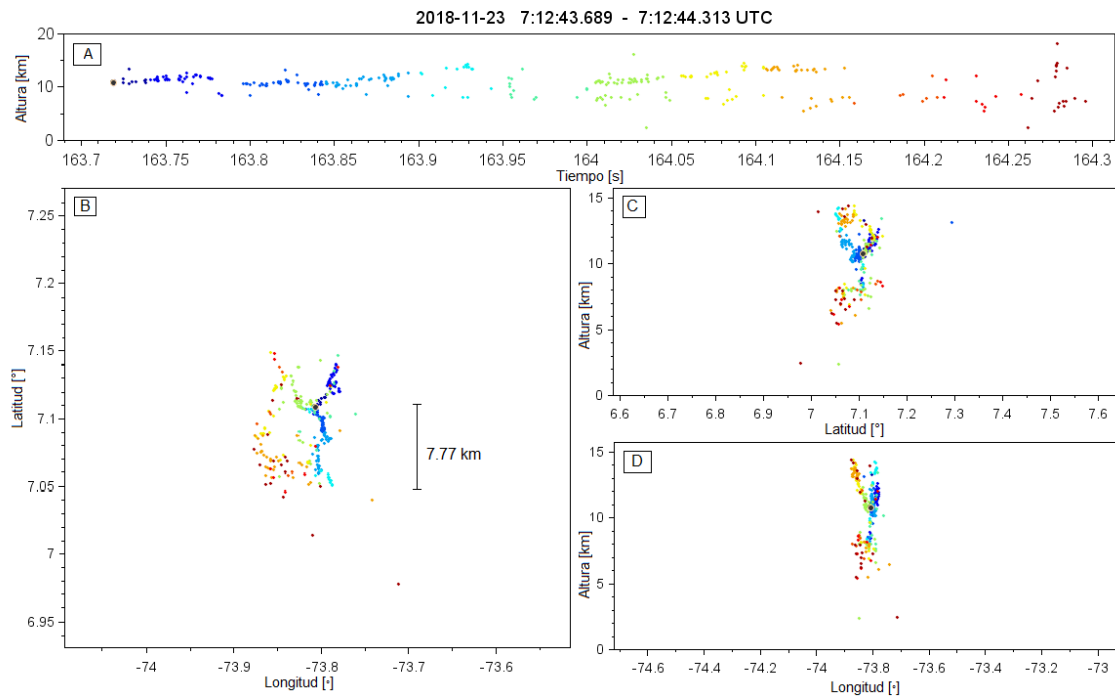


A los 0,23 segundos del origen de la descarga inicia otro líder negativo (tercera pendiente) a alturas que varían entre 9 y 12 km denotada por las fuentes en tonos verde claro, este líder presenta algunas bifurcaciones sobre la región de carga positiva superior debido a los elevados gradientes de potencial generados por la estructura de carga y a la misma presencia del líder. Se observan fuentes emitidas por líderes positivos en los instantes de propagación de este último líder negativo y en instantes posteriores como lo evidencian las fuentes en tono celeste entre 0,4 y 0,7 segundos por debajo de la pendiente de 2×10^4 m/s. El panel B muestra la evolución temporal de

la descarga en mención y permite evidenciar el desarrollo secuencial de los líderes, lo que resulta en una mejor interpretación de la propagación de líderes en los paneles de la figura anterior.

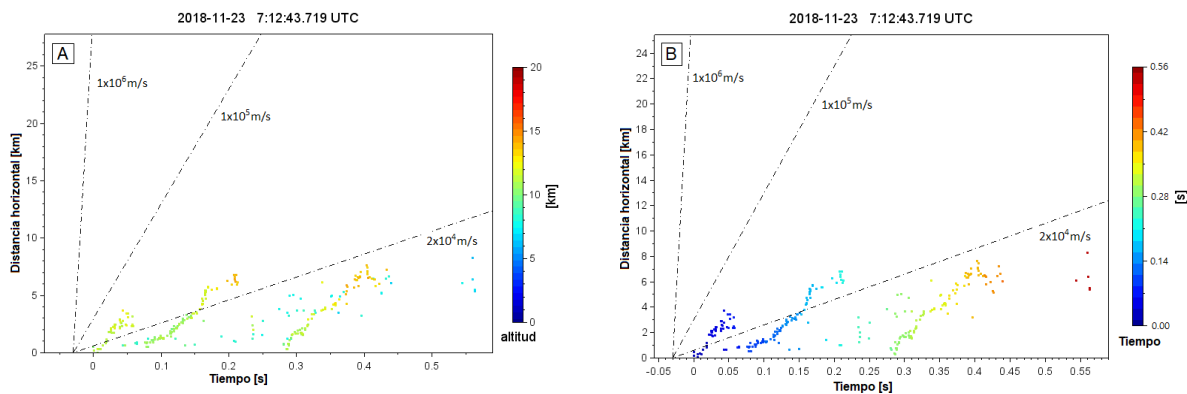
La figura 28 muestra una descarga individual ocurrida entre las 7:12:43,689 y las 7:12:44,313 UTC que inicia a alturas cercanas a los 10 km y se propaga en forma casi horizontal como lo evidencian las primeras fuentes en tonalidad azul del panel A. Instantes después se mapean fuentes que ganan altura con el tiempo hasta alcanzar los 15 km (tono celeste en los paneles A, C y D). Las fuentes en tonalidades verde-amarillo-naranja denotan otro líder que se propaga a alturas entre 10 y 14 km, al mismo tiempo se mapean fuentes a alturas inferiores (ver panel A) que se relacionan con líderes de retroceso en la región de carga negativa. La descarga alcanza una extensión horizontal de 7,8 km desde el origen de la descarga evidenciados en el panel B.

Figura 28. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:12:43,689 y las 7:12:44,313 UTC.



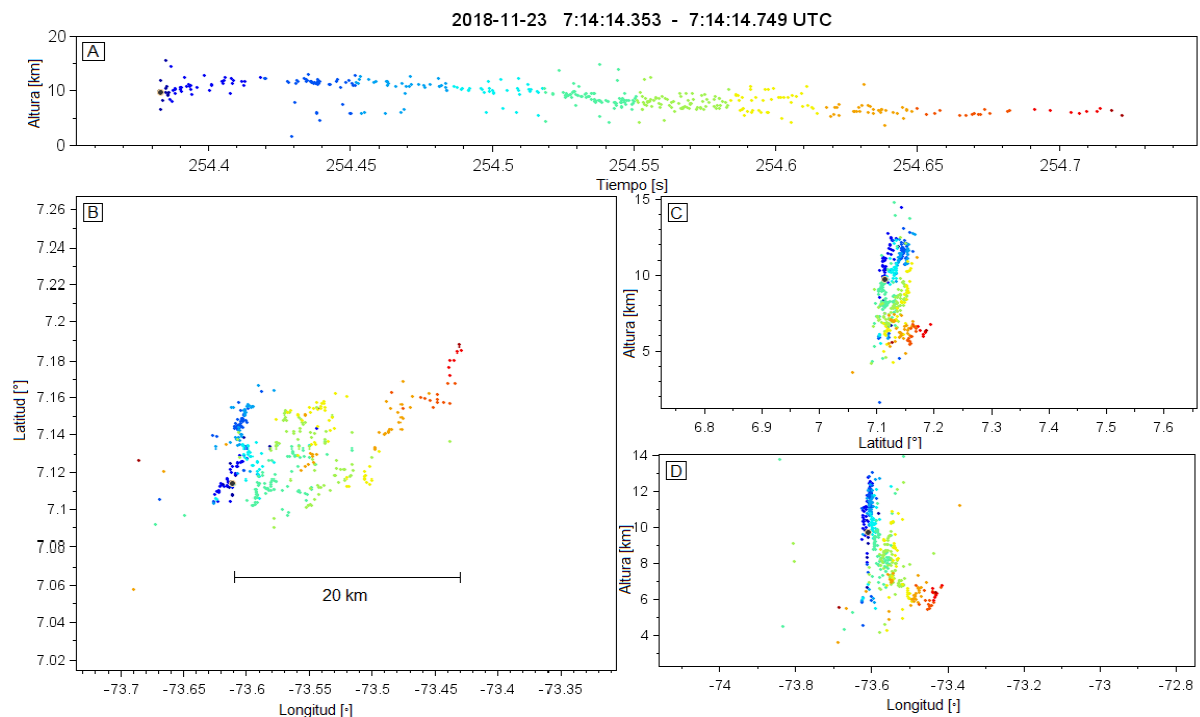
En la figura 29 se muestran las gráficas tiempo-distancia de la descarga descrita en la figura 28. En el panel A se observan tres líderes negativos ascendentes (como lo evidencia el cambio de coloración de verde a amarillo-naranja en las pendientes) que se propagan a velocidades cercanas a 1×10^5 m/s y delimitan la región de carga positiva superior. El primero inicia a una altura de 10 km y se propaga hasta una altura máxima de 12,5 km, el segundo inicia a los 0,1 segundos del origen de la descarga y se eleva hasta una altura máxima de 14,5 km. El tercero inicia a los 0,3 segundos del origen de la descarga y alcanza una altura máxima de 14 km. De esta manera se define la altura máxima de la región de carga positiva superior en 14,5 km. Así mismo, se observan en color celeste las fuentes emitidas por líderes positivos a alturas en promedio de 8 km al mismo tiempo en que se propagan los líderes negativos. El panel B, cuya coloración denota el tiempo, permite evidenciar fuentes emitidas por líderes positivos, las cuales ocurren en el mismo instante (igual color) que se propagan los líderes negativos ajustados a la pendiente de 1×10^5 m/s, pero a alturas inferiores (tono celeste de las fuentes en el panel A).

Figura 29. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 8.



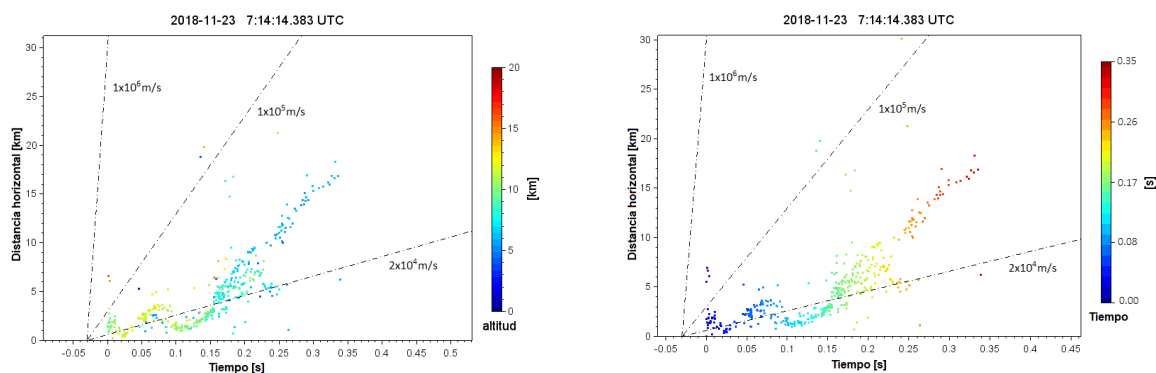
En la figura 30, paneles A, C y D, se observa un líder que inicia a 10 km de altura hasta un máximo de 13 km para luego continuar propagándose hasta alturas mínimas cercanas a los 5,5 km. El líder alcanza una extensión horizontal total de 20 km desde el origen de la descarga como lo muestra el panel B, por lo que es probable que haya continuado propagándose horizontalmente fuera de la estructura de carga de la nube de tormenta. Los paneles C y D muestran el desarrollo bidireccional del líder que progresa en direcciones opuestas, el cual se determina dado que hay fuentes que ocurren en el mismo instante (igual tonalidad) pero a alturas sumamente diferentes, y como es de esperarse, el extremo positivo del líder presenta pocas fuentes mapeadas al mismo tiempo del desarrollo del líder negativo pero a alturas mucho menores.

Figura 30. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 23 de noviembre de 2018 entre las 7:14:14,353 y las 7:14:14,749 UTC.



La figura 31 presenta dos versiones del gráfico de tiempo-distancia de la descarga de la figura 30. El panel A muestra la variación en altura en donde se evidencia el comportamiento ascendente-descendente de la descarga denotado por el cambio de la coloración de las fuentes entre verde (10 km) amarillo (13 km) y azul capri (5,5 km).

Figura 31. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 10.



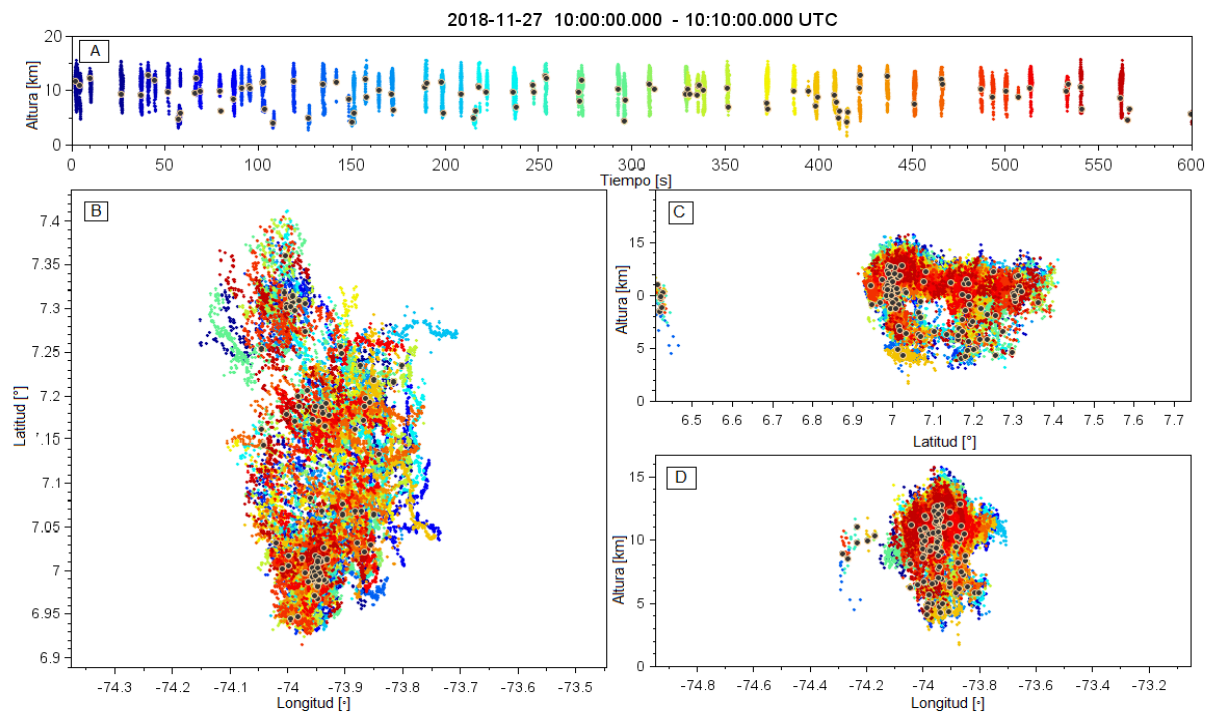
Una vez realizados los análisis de las descargas individuales se concluye que esta tormenta presenta una estructura tripolar en la que la región de carga positiva inferior se ubica entre 5 y 7,5 km, la región de carga negativa central entre 7,5 y 9 km y la región de carga positiva superior entre 9 y 14,5 km.

5.4.2. Tormenta del 27 de noviembre de 2018

La figura 32 muestra diez minutos de actividad de una tormenta ocurrida entre las 10:00:00 y 10:10:00 UTC del 27 de noviembre de 2018. El panel A es una distribución temporal de la descarga en altura-tiempo en donde se observan líderes de rayo que se propagan en un rango de altura entre 3,0 y 15,9 km, lo que da una noción de la extensión vertical de la estructura de carga.

El panel B es una distribución espacial en latitud-longitud en la que se evidencia el desarrollo horizontal de la tormenta entre 6.9 y 7.4 grados en latitud (aprox. 52,2 km) y entre -73.8 y -74.1 grados en longitud (aprox. 42,2 km). Los paneles C y D son cortes verticales altura-latitud y altura-longitud respectivamente mediante los cuales se verifica el elevado desarrollo vertical de la tormenta.

Figura 32. Diez minutos de actividad de una tormenta mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:00:00 y 10:10:00 UTC

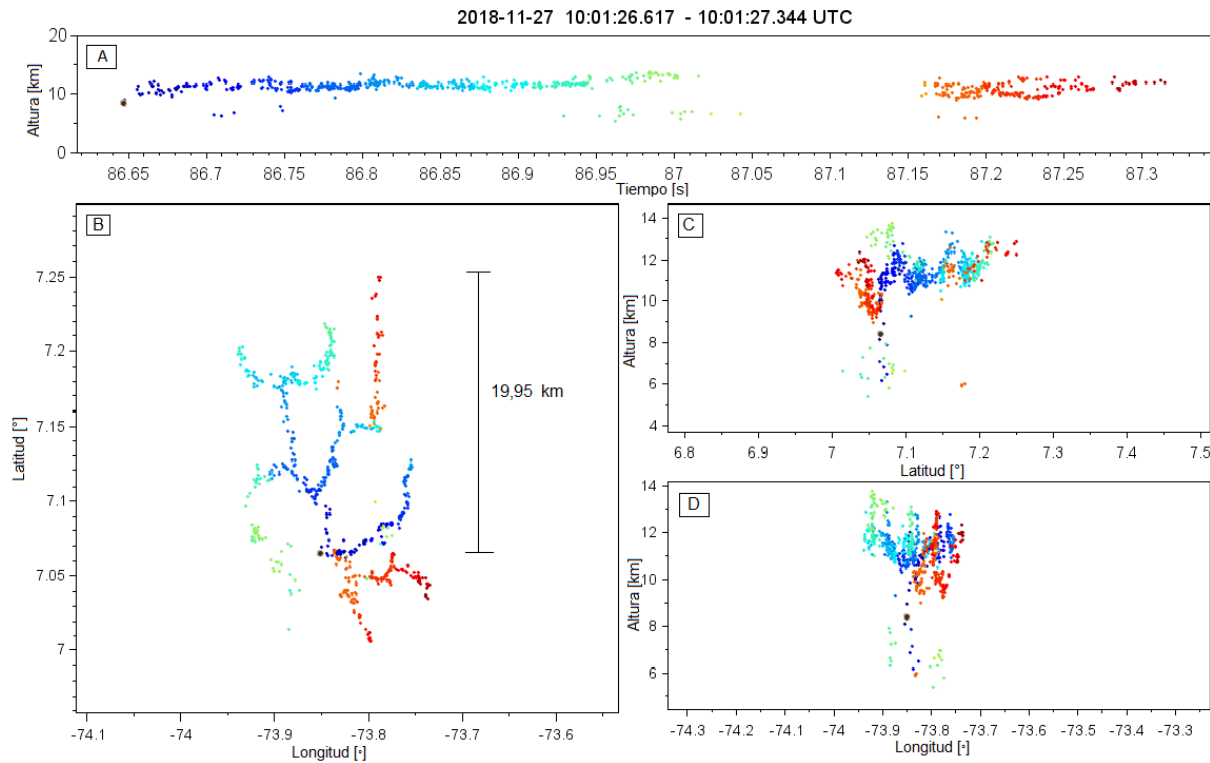


Nota. El panel A corresponde a la distribución temporal de las descargas individuales registradas en altura-tiempo, el B representa su distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y los círculos negros ubican el inicio de cada descarga.

Como datos generales se mapearon 26.476 fuentes y 100 descargas individuales con una tasa promedio de 10 rayos por minuto. El color de las fuentes para todos los paneles de la figura en mención corresponde al tiempo y los puntos negros señalan el punto de inicio u origen de cada descarga individual. Durante el desarrollo de estos diez minutos de actividad la red LINET registró 57 impactos de rayo (strokes) con una mediana de corriente de descarga de retorno de 18,1 kA.

Se presenta el análisis de algunas de algunas descargas individuales mostradas en la figura 32A. La figura 33 permite ver la disposición espaciotemporal de las fuentes localizadas durante una descarga ocurrida entre las 10:01:26,617 y las 10:01:27,344 UTC que inicia a una altura de 8,5 km (punto negro) y se extiende horizontalmente una distancia máxima de 20,0 km desde el origen de la descarga (ver panel B) a alturas entre 6 y 14 km, como lo muestran detalladamente los paneles A, C y D. Al mismo tiempo (igual coloración) se observan fuentes a alturas menores entre 6,6 y 8,5 km, las cuales revelan el desarrollo bidireccional del líder y corresponden a líderes positivos propagándose a través de la región de carga negativa. La polaridad de estos líderes se deduce por la poca densidad de fuentes mapeadas, lo que más adelante se comprueba con las gráficas de tiempo-distancia presentadas.

Figura 33. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:01:26,617 y las 10:01:27,344 UTC.

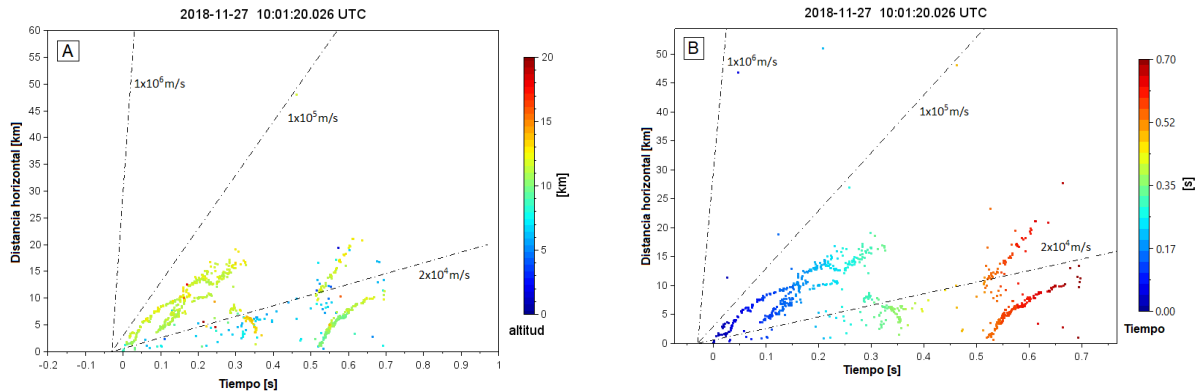


Nota. El panel A es la distribución temporal de la descarga en altura-tiempo, el B la distribución espacial en latitud-longitud, el C es un corte vertical altura-latitud y el D un corte vertical altura-longitud. Los puntos corresponden a las fuentes mapeadas coloreadas secuencialmente en el tiempo y el círculo negro ubica el inicio de la descarga.

Con base en la descarga mostrada en la figura 33, se presentan sus gráficas de tiempo-distancia en la figura 34. El panel A muestra un líder negativo (primera pendiente) que inicia a alturas cercanas a 8,5 km y se propaga hasta alcanzar un máximo de 13 km de elevación, como lo muestra el cambio de coloración de verde a amarillo. A los 0,1 segundos del origen de la descarga inicia un nuevo líder ascendente (segunda pendiente) a una altura de 10 km y alcanza alturas

máximas de hasta 13 km, este último presenta múltiples y largas ramificaciones como es característico en líderes negativos, se propaga horizontalmente una distancia de aproximadamente 16,05 km y permite ubicar la región de carga positiva superior de la nube de tormenta.

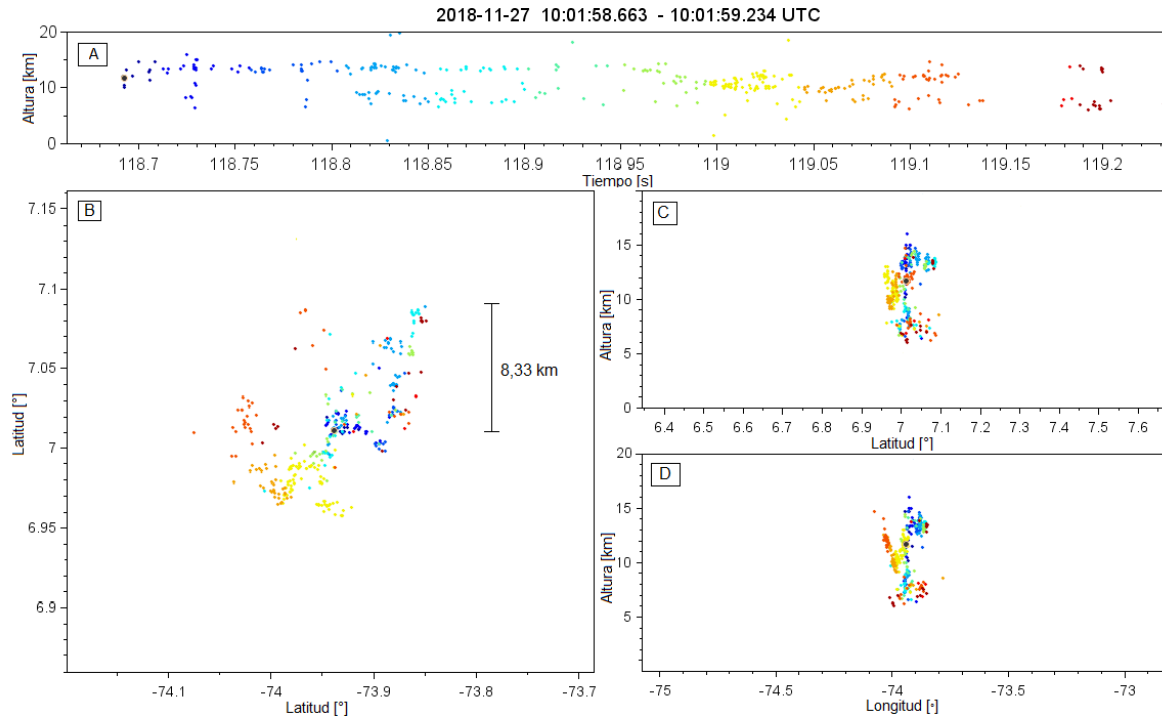
En el desarrollo de estos dos líderes descritos se observan fuentes emitidas por líderes positivos en alturas entre 6 y 8,5 km denotadas por las fuentes en coloración celeste en el panel A, lo que revela la altitud de la región de carga negativa central. Además, continuando con el mismo panel, se evidencia un líder negativo con pendiente negativa entre los 0,3 y 0,4 segundos, esto indica que se está acercando al punto de referencia (origen de la descarga en 0,0) pero ganando altura con respecto a este (como se evidencia en el cambio de coloración en altura de verde a naranja en la tercera pendiente). A los 0,5 segundos del origen de la descarga se inician simultáneamente dos líderes negativos ascendentes a alturas de 9 y 10 km y alcanzan alturas cercanas a los 12 km (cambio de coloración verde a amarillo de las dos últimas pendientes), lo que corrobora la ubicación de la región de carga positiva superior. La simultaneidad de estos dos líderes se observa en el panel B (variación temporal), donde las fuentes que conforman las dos pendientes ubicadas a la derecha aparecen con la misma coloración, lo que significa que ocurrieron entre los mismos instantes de tiempo. Así mismo, en este último panel se evidencian las fuentes de líderes positivos por debajo de la pendiente de 2×10^4 m/s al mismo tiempo que se propagan los líderes negativos a velocidades cercanas a 1×10^5 m/s.

Figura 34. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 13.

Nota. La coloración de las fuentes en el panel A corresponde a la altura y en el panel B al tiempo. Los ejes de tiempo y distancia son relativos al punto 0,0 que corresponde al origen o inicio de la descarga (primera fuente mapeada). La pendiente de las líneas punteadas referencia las velocidades típicas de propagación de líderes positivos ($2 \times 10^4 \text{ m/s}$) y de líderes negativos ($1 \times 10^5 \text{ m/s}$ y $1 \times 10^6 \text{ m/s}$).

En la figura 35 se muestra una descarga mapeada entre las 10:01:58,663 y 10:01:59,234 UTC cuyo punto de iniciación se ubica a una altura de 11,5 km. Los paneles A, C y D permiten ver la altitud de las fuentes mapeadas, de donde se deduce que los líderes se propagaron a alturas entre 6 y 16 km con una extensión horizontal máxima de 8,3 km desde el origen de la descarga (ver panel B).

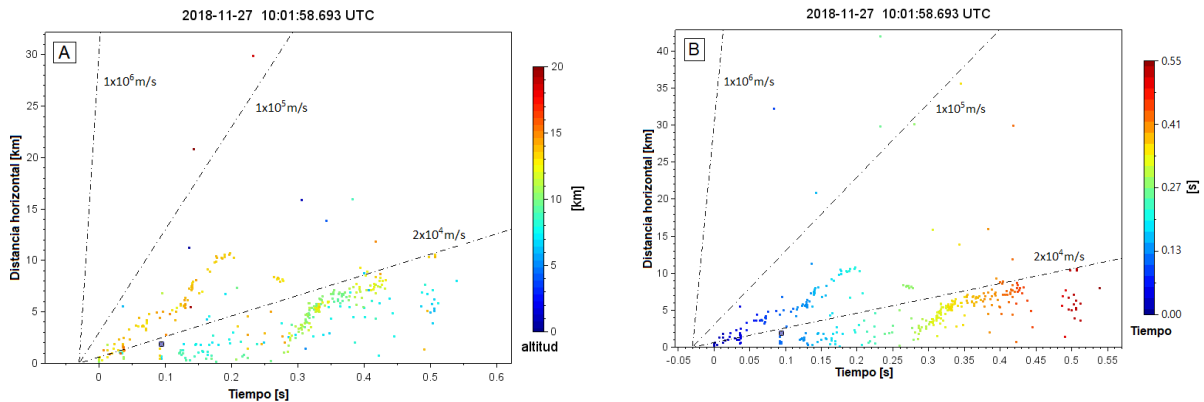
Figura 35. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:01:58,663 y 10:01:59,234.



En la figura 36 se presentan dos versiones del gráfico de tiempo-distancia de la descarga analizada en la figura 35. El panel A muestra un líder ascendente negativo que inicia a una altura de 11,5 km (tono amarillo) hasta alcanzar un máximo de 16 km (tono naranja) demarcando la región de carga positiva superior de la estructura de carga que para este caso se ubica entre 8,5 y 16 km. Paralelo al desarrollo de este líder aparecen fuentes emitidas por líderes positivos entre 7 y 8,5 km (tono celeste). Al cabo de los 0,3 segundos del inicio de la descarga se origina un nuevo líder negativo ascendente a una altura de 10 km alcanzando una altura máxima de 12 km, como lo denota el cambio de tonalidad de las fuentes de verde a amarillo. Se observan fuentes de

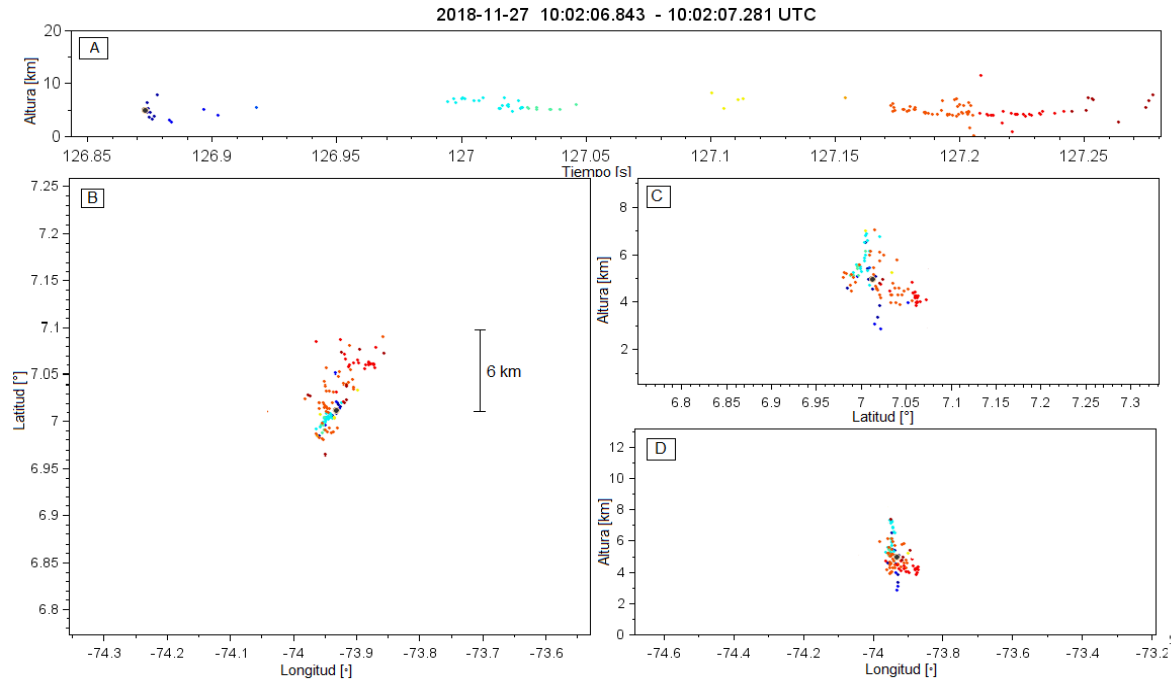
líderes positivos a alturas entre 6 y 8 km (tono celeste) que corresponden a propagaciones muy bajas en la región negativa central, la cual queda delimitada entre 6 y 8,5 km.

Figura 36. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 15.

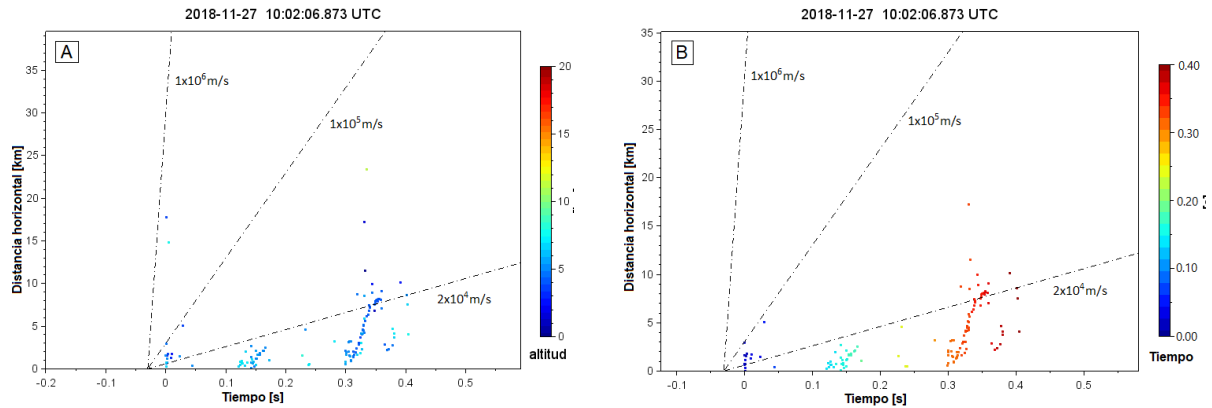


Para determinar si existe una región de carga positiva inferior se hace necesario analizar una descarga que inicie a alturas menores a 6 km, que es el límite más bajo de la región de carga negativa central. En la figura 37 se presenta una descarga mapeada entre las 10:02:06,843 y las 10:02:07,281 UTC que se origina a una altura de 5 km y se propaga en el intervalo de 4 y 6 km (ver paneles A, C y D), alcanzando una extensión horizontal máxima de 6 km con respecto al origen de la descarga (ver panel B).

Figura 37. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:02:06,843 y las 10:02:07,281 UTC.

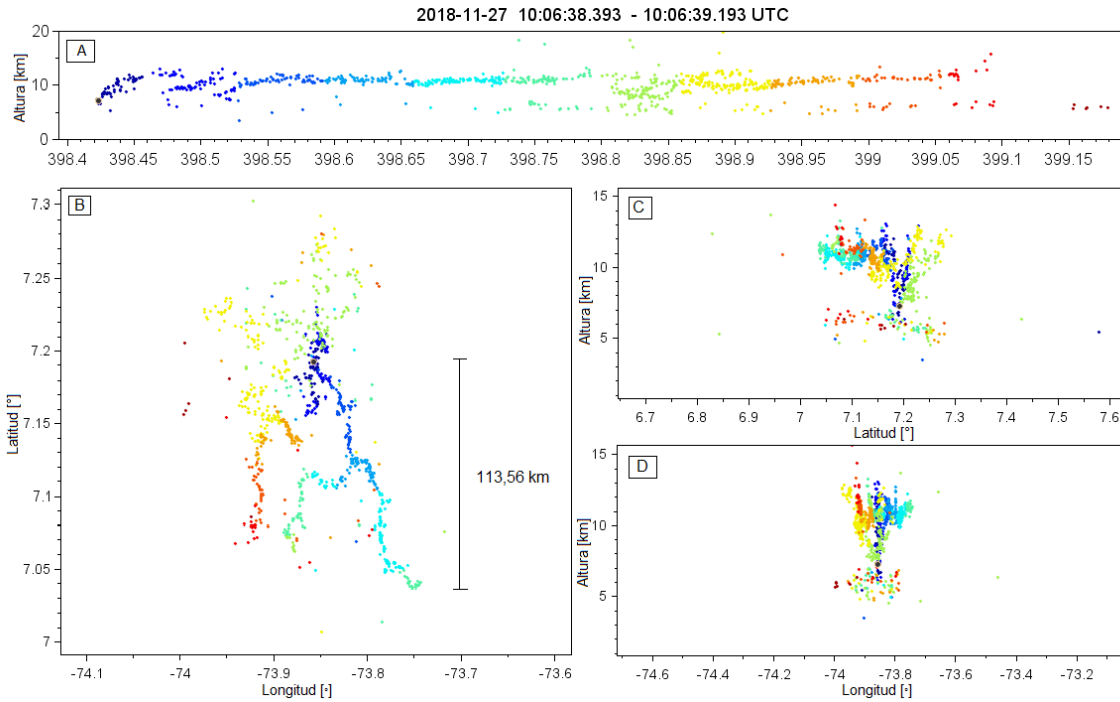


La figura 38 muestra las gráficas de tiempo-distancia de la descarga en la figura 37, en donde se mapean tres líderes descendentes negativos a alturas entre 4 y 6 km, lo que se evidencia en el cambio de coloración de celeste a azul capri en las fuentes que forman pendientes cercanas a 1×10^5 m/s del panel A. De esta manera se delimita la región de carga positiva inferior entre 4 y 6 km. El panel B corresponde a la variación temporal de las fuentes. Para este caso no se mapearon fuentes emitidas por líderes positivos a alturas mayores.

Figura 38. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 17.

La descarga que se muestra en la figura 39 fue registrada entre las 10:06:38,393 y las 10:06:39,193 UTC y evidencia el comportamiento bidireccional de los líderes mapeados, dado que se observan fuentes emitidas en el mismo instante de tiempo (igual tonalidad) pero a diferente altitud (como lo evidencian los paneles A, C y D). Estas últimas pueden estar relacionadas con líderes positivos, lo cual se comprueba más adelante con base en las gráficas de tiempo-distancia. La descarga en mención inicia a una altura cercana a los 8,5 km a un rango de alturas que comprende los 5 y 13 km (paneles A, C y D), alcanzando una extensión horizontal máxima de 113,6 km desde el punto de inicio.

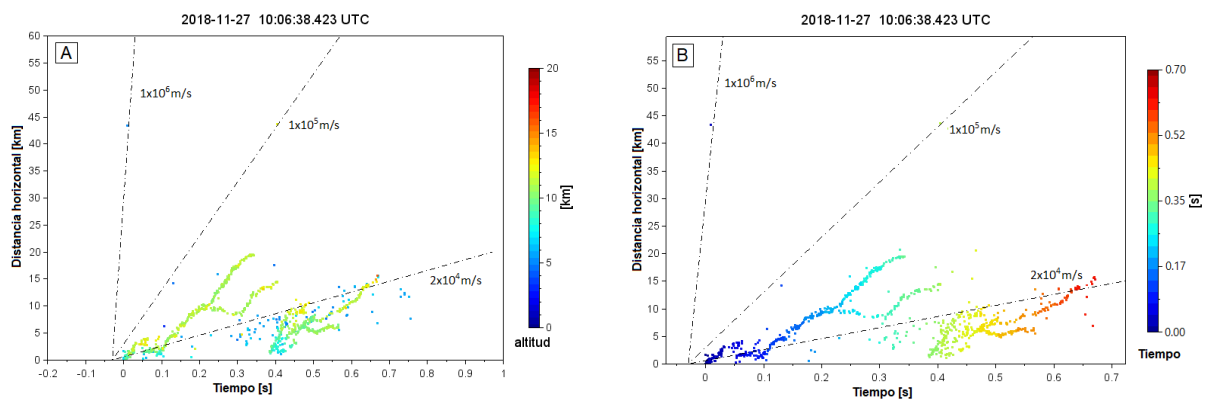
Figura 39. Descarga individual mapeada por la red Dabeiba - LMA el 27 de noviembre de 2018 entre las 10:06:38,393 y las 10:06:39,193 UTC.



A partir de la descarga de la figura 39 se construyen los gráficos de tiempo-distancia mostrados en la figura 40. El panel A permite ver un líder negativo ascendente (primera pendiente desde el punto 0,0) que se propaga durante 0,1 segundos desde 8,5 km hasta alcanzar los 12,5 km de altura (cambio de coloración de celeste a amarillo). A los 0,1 segundos del origen de la descarga y a una altura de 10 km inicia un nuevo líder negativo ascendente que presenta dos ramificaciones pronunciadas (segunda pendiente bifurcada) y se propaga hasta los 0,4 segundos alcanzando altura máxima de 12 km y una extensión horizontal de 17 km. Durante la última fase de propagación de este líder (0,3-0,4 segundos) se observan fuentes emitidas por líderes positivos a alturas de 6 km (fuentes color azul capri por debajo de la pendiente de 2×10^4 m/s en el panel A), lo que corrobora la ubicación de la región de carga negativa central de la estructura de carga. Este panel también

revela el inicio de otro líder negativo ascendente (tercera pendiente con múltiples derivaciones) a una altura de 8,5 km (tono celeste), una vez transcurridos 0,4 segundos del origen de la descarga. El líder se propaga con varias ramificaciones hasta alcanzar una altura máxima de 13 km (tono naranja claro). Durante el desarrollo de este líder también se observan algunas fuentes de líderes positivos (tono azul capri) a alturas correspondientes a la región de carga negativa.

Figura 40. Gráficas de tiempo-distancia de la descarga individual presentada en la Figura 19.



Según los análisis de las descargas individuales, de las cuales se presentaron algunos ejemplos anteriormente, se tiene que esta tormenta presenta una estructura tripolar donde el centro de carga positivo inferior se encuentra entre 4 y 6 km, la carga negativa central entre 6 y 8,5 km y la carga positiva superior entre 8,5 y 16 km de altura.

1.12 Discusión

El desarrollo temporal y espacial de las fuentes mapeadas durante la propagación de líderes de rayo determina que ambas tormentas estudiadas presentan una estructura tripolar cuyas alturas de las regiones de carga son congruentes con las anteriormente halladas en Santa Marta,

donde se localizó la región positiva inferior entre 4 y 6 km, la negativa central entre 6 y 9,5 km y la positiva superior entre 10 y 14,5 km (López et al., 2019). Las alturas de los centros de carga encontradas en este artículo son mayores a las de tormentas estudiadas en North Central Florida, donde la región de carga positiva inferior está entre 3 y 5 km, la positiva central entre 5,3 y 7,5 y la positiva superior entre 7,8 y 9,8 (Caicedo et al., 2018).

Se encontró que el 50 % de las descargas inició a alturas entre 6,6 y 11,5 para la tormenta del 23 de noviembre y entre 7,0 y 10,8 para la del 27 de noviembre, como lo indican el primer y cuarto cuartil de la figura 41A.

Así mismo, las alturas máximas de inicio son 14,5 y 12,9 km respectivamente, las cuales superan a las halladas en Santa Marta, que corresponden a 11 y 14 km. Para el presente caso de estudio, el promedio de alturas de iniciación se situó entre 9,3 y 9,1 km mientras que en las tormentas analizadas en North Central Florida varió entre 7,3 y 8,4, lo anterior debido a que las regiones de carga en esas regiones de Florida se localizaron a alturas menores.

Se determinaron alturas máximas de propagación de líderes de rayo correspondientes a 15,2 km para la primera tormenta y a 15,9 para la segunda como lo indica la figura 33B, estas alturas son un poco menores a las encontradas en (López et al., 2019). Para la tormenta del 23 de noviembre se encontró que el 50 % de los líderes mapeados se propagó a alturas mayores a 9,1 km (como lo indica la mediana en la figura 41B), en donde se encuentra la región positiva superior, mientras que para la tormenta del 27 de noviembre cerca del 75 % de los líderes siguió esta característica (primer cuartil en 8,2 km en la figura 41B), lo que indica una mayor actividad en la región de carga superior de esta última tormenta en comparación con la primera. Lo anterior puede explicar que en la tormenta del 23 de noviembre hubiese más impactos a tierra CG (ver Tabla I)

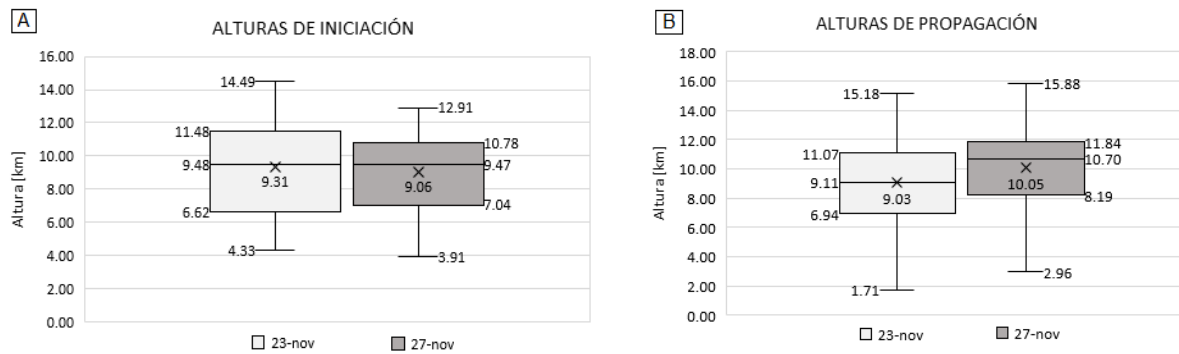
en comparación con la tormenta del 27 de noviembre, debido a que en la primera se presentó una mayor actividad en las regiones inferiores de la estructura de carga.

Como trabajos futuros se plantea estudiar la interacción de descargas atmosféricas con estructuras elevadas en zonas tropicales con base en mapeos hechos con la red Dabeiba - LMA ,y así mismo determinar la influencia de la altura de las regiones de carga en dicha interacción. Se muestra un resumen de resultados en la Tabla 9.

Tabla 9. Resumen de resultados

Parámetro	Unidad	Tormenta 23 de nov.	Tormenta 27 de nov.
Fuentes	-	17375	26476
Descargas	flashes	89	100
Impactos CG	<i>strokes</i>	99	57
Tasa de rayos	flashes/min	7	10
Mediana de corriente de descarga de retorno	kA	21,1	18,1
Máxima altura de inicio de descargas	km	14,5	12,9
Promedio de altura de inicio de descargas	km	9,3	9,1
Mediana de propagación de líderes	km	9,1	10,7
Máxima altura de propagación	km	15,2	15,9
Rango de la región de carga positiva superior	km	9 - 14,5	8,5 - 16
Rango de la región de carga negativa central	km	7,5 - 9	6 - 8,5
Rango de la región de carga positiva inferior	km	5 - 7,5	4 - 6

Figura 41. Diagramas de cajas y bigotes para las alturas de iniciación y de propagación de los líderes mapeados en las tormentas del 23 y 27 de noviembre de 2018.



Nota. Los bigotes son los límites inferiores y superiores de los datos. Los límites de la caja indican los valores entre los cuales se encuentra el 50 % de los datos (primer y cuarto cuartil). La línea horizontal dentro de la caja y el símbolo X corresponden a la mediana y media respectivamente.

1.13 Conclusiones

La instalación de la red Dabeiba - LMA en Barrancabermeja (Santander) forma parte de los primeros estudios en Colombia usando un sistema de mapeo de alta resolución que, complementado con otros sistemas de detección total de rayos como la red LINET, permitió concluir que para los casos de estudio presentados:

1. Se lograron identificar estructuras de carga eléctrica con distribuciones típicas tripolares en las dos tormentas estudiadas.

2. Para la tormenta del 23 de noviembre la altura de la región de carga positiva inferior se ubicó entre 5 y 7,5 km, la negativa central entre 7,5 y 9 km y la positiva superior entre 9 y 14,5 km.

3. Para la tormenta del 27 de noviembre la región de carga positiva inferior se encontró entre 4 y 6 km, la negativa central entre 6 y 8,5 km y la positiva superior entre 8,5 y 16 km.

4. En ambas tormentas se logró localizar la región de carga positiva inferior por lo que fue predominante la actividad de descargas nube-tierra.

5. En general las alturas de las regiones de carga para ambas tormentas son similares a las encontradas por la red COLMA ubicada en Santa Marta (Magdalena) y mayores a las de North Central Florida.

6. Se registraron líderes negativos y positivos que se propagaron a velocidades radiales máximas de 1×10^6 y 2×10^4 m/s respectivamente.

7. Las alturas máximas de inicio para ambas tormentas corresponden a 14,5 y 12,9 km respectivamente, las cuales superan a las halladas en Santa Marta.

8. Se corroboraron líderes de rayos que alcanzaron alturas máximas de propagación de 15,2 y 15,9 km, un poco menores a las reportadas en la región norte de Colombia en Santa Marta.

Artículo 2 (Evento): Interacción de rayos con estructuras elevadas en zonas tropicales

1.14 Resumen

La interacción de descargas atmosféricas con estructuras elevadas (EE) en zonas tropicales ha sido poco estudiada mediante el uso de redes Lightning Mapping Array. Este trabajo parte de la ubicación de estructuras elevadas con alturas entre 30 y 100 metros dentro del radio de influencia de la red LMA localizada en Barrancabermeja, para las cuales se cuantificaron los impactos de rayo con lo que se escogieron 22 estructuras con la mayor interacción con rayos. Posteriormente se determinaron las fechas y franjas horarias de los impactos en EE con lo que se encontraron las distribuciones de carga eléctrica de nubes de tormenta en estos periodos de interacción. Así mismo se caracterizaron las descargas que interactuaron con alguna estructura prominente mediante variables como altura de iniciación, longitud de los líderes que las causaron, polaridad y corriente. Se encontró que los meses con mayor cantidad de rayos en EE corresponden a mayo y noviembre y que las estructuras con mayor interacción se ubican cerca del área urbana. Así mismo se determinó que la mayoría de rayos que impactan dichas estructuras inician a alturas entre 4 y 6 km en donde se ubica la región de carga positiva inferior en las nubes de tormentas mapeadas. Se concluye que la interacción de rayos con EE se dio completamente por líderes descendentes provenientes de las nubes de tormenta los cuales causaron una respuesta ascendente de una estructura de gran altura.

Palabras clave: Interacción, estructuras elevadas, red LMA, estructuras de carga.

1.15 Introducción

Los rayos afectan los sistemas eléctricos, electrónicos, de comunicaciones y el transporte, y ocasionan pérdidas económicas, de bienes culturales, servicios públicos y vidas humanas (Rakov & Uman, 2003). Las estructuras elevadas son focos de daños por rayos ya que son más propensas a ser impactadas (Rachidi et al., 2008) dado que responden con líderes ascendentes de conexión a los líderes escalonados descendentes originados en las nubes de tormenta y que se propagan a través de la atmósfera mediante procesos de ionización (Uman, 2008).

Este fenómeno electromagnético se empezó a estudiar mediante redes de mapeo de rayos en el rango de muy alta frecuencia (VHF) con sistemas Lightning Mapping Array - LMA en 1999, lo que permitió en sus inicios determinar estructuras de carga eléctrica de nubes de tormenta y describir eventos iniciales de descargas intra nube (Rison et al., 1999a). El método parte de la teoría del líder bidireccional (Kasemir, 1960) y localiza fuentes emitidas durante la propagación de líderes de rayo mediante el tiempo de arribo (TOA) para de esta manera reconstruir tridimensionalmente una descarga atmosférica (Cummins et al., 1998) y caracterizar líderes positivos y negativos (Mazur, 2002).

Otros estudios han usado redes LMA para ubicar el inicio de descargas (Marshall et al., 2005) y su velocidad de propagación (Behnke et al., 2005) y se han realizado principalmente en zonas templadas como España, en donde se evidenció el desarrollo de líderes bidireccionales (van der Velde & Montanyà, 2013), en Estados Unidos en donde se relacionó la estructura de carga de tormentas con la altitud de las descargas (Fuchs & Rutledge, 2018) y en China en donde se describen descargas intra nube iniciadas en regiones de carga positiva por narrow bipolar pulse NBL (Zhang et al., 2010). Algunas investigaciones se han realizado en zonas tropicales como

Brasil donde aplicaron dichas redes en la predicción inmediata de tormentas (Machado et al., 2014).

La interacción de rayos con estructuras elevadas usando redes LMA se ha estudiado en aerogeneradores en (Montanyà et al., 2014), donde se concluyó que el movimiento de las aspas favorece la iniciación de líderes ascendentes, en (Mostajabi et al., 2018) donde se caracterizaron descargas ascendentes de la torre Santis las cuales no presentaban una primera descarga de retorno pero si la presencia de una corriente continua inicial (ICC) con o sin pulsos superpuestos y en (Pineda et al., 2018) en donde se establecen las características de nubes de tormenta que favorecen el impacto de rayos en turbinas eólicas.

Entre 2015 y 2017 se ubicó la primera red LMA en Colombia en la ciudad de Santa Marta, lo que permitió determinar la extensión vertical de tormentas, alturas de iniciación de rayos y de regiones de carga eléctrica (López et al., 2016, 2019). En 2018 dicha red fue trasladada a una zona de alta actividad de rayos en el Magdalena Medio colombiano entre los municipios de Barrancabermeja y Yondó en donde se presentan hasta 25 descargas/km²/año.

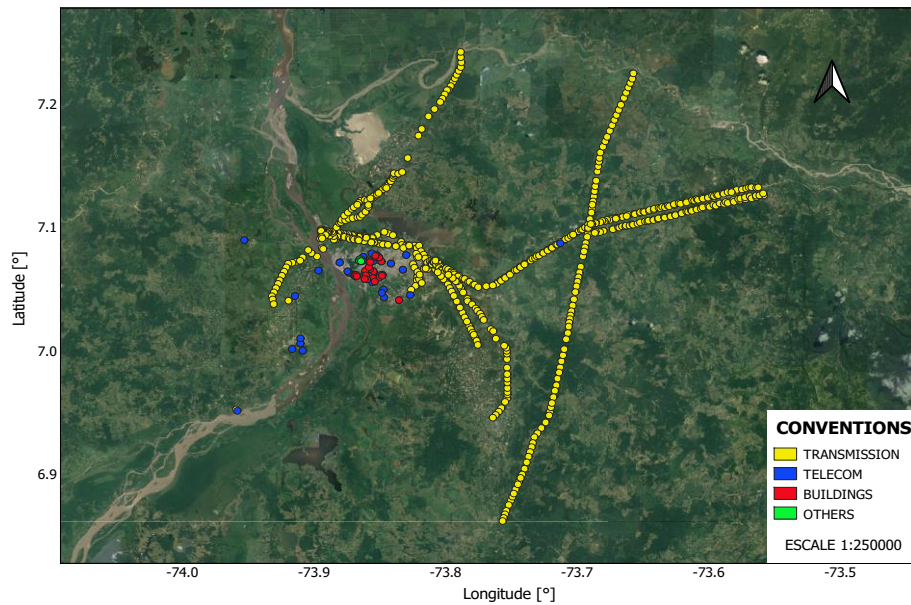
Se espera que en el trópico y especialmente en zonas ecuatoriales los rayos interactúen de forma distinta con estructuras elevadas, muestra de ello es que en estas regiones la mediana de la corriente de descarga alcanza los 45 kA comparada con 30 kA en zonas templadas (Torres, Perez, Younes, Aranguren, Montaña, et al., 2015). Estas regiones presentan importantes diferencias en la multiplicidad de flashes como lo muestran (Soula et al., 2016; Zhu et al., 2015) y en las alturas de iniciación y propagación de líderes de rayo (López et al., 2016). Por lo anterior, es importante caracterizar la interacción que existe con objetos de gran altitud como torres de transmisión, antenas de telecomunicaciones y otras estructuras las cuales son frecuentemente impactadas por

rayos. Hasta el momento no se ha estudiado la interacción de rayos y estructuras elevadas con base en información de redes LMA en zonas tropicales. Por tanto, en este trabajo se caracteriza dicha interacción identificando la polaridad, alturas de iniciación, longitud y la naturaleza ascendente o descendente de los líderes de rayo que causaron algún impacto en alguna estructura elevada. Así mismo se determina la influencia de las regiones de carga de nubes de tormenta en la interacción de rayos con estructuras elevadas.

1.16 Metodología

1.16.1 Estructuras de estudio

Se localizaron 616 estructuras elevadas (ver figura 42) dentro de la zona de alta eficiencia de la red LMA para las cuales se estableció un radio de influencia de 300 metros teniendo en cuenta el error medio de localización la red LINET, se cuantificaron los impactos de rayo en cada una de ellas en el periodo de desde octubre de 2018 hasta noviembre de 2019 (la fecha de inicio corresponde a la ubicación de la red LMA en la zona de estudio). Con lo anterior se escogieron las 22 estructuras con mayor número de impactos de rayo. Como resultado se obtienen las fechas y franjas horarias en las que hubo impactos de rayo en estructuras elevadas. Así mismo se determinaron los meses en los que hubo mayor cantidad de impactos de rayo en estructuras elevadas de acuerdo con información de la red LINET.

Figura 42. Estructuras elevadas dentro del radio de influencia de la red LMA

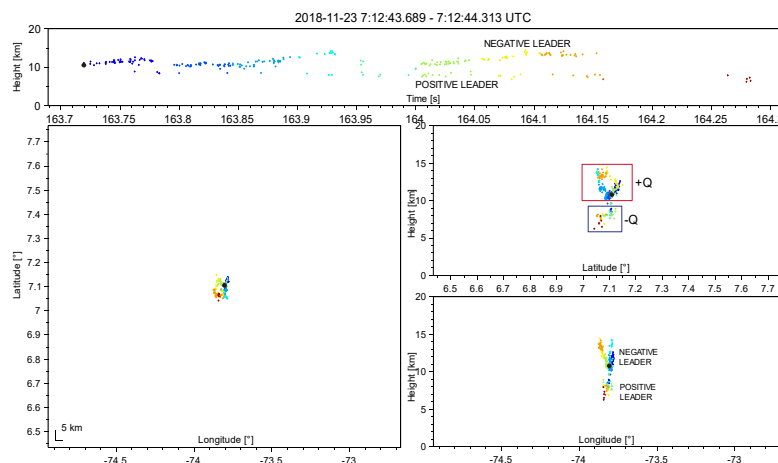
1.16.2 Estructuras de carga de nubes de tormenta

Se determina en las franjas horarias mencionadas anteriormente con base en la teoría del líder bidireccional (Kasemir, 1960), la cual describe una descarga atmosférica como un árbol de doble extremo, uno de negativo (líder negativo) que se propaga a través de regiones de carga positiva y uno positivo (líder positivo) que lo hace sobre regiones de carga negativa (Wiens et al., 2005; Williams, 2006). De acuerdo a lo anterior es posible determinar las alturas de las regiones de carga que de una nube de tormenta a través de la localización de fuentes en Very High Frequency (VHF) las cuales son emitidas en los procesos de ionización y propagación de líderes de rayo. Los líderes negativos son más visibles en las frecuencias de radio usadas por la red LMA y por tanto son densamente mapeados en comparación con los positivos (Wiens et al., 2005). Entendiendo que los líderes negativos se propagan sobre regiones de carga positiva, una descarga

atmosférica tiene un número mayor de fuentes mapeadas dentro de las regiones de carga positiva involucradas en su desarrollo en comparación con las fuentes mapeadas en regiones de carga negativa (Wiens et al., 2005). Esta última región se ubica a través de líderes de retroceso que son líderes negativos que vuelven a trazar partes de los canales dejados por líderes positivos que no logran continuar su proceso de propagación, en otras palabras, líderes que intentan re-ionizar canales dejados por líderes positivos y que permiten localizar la región de carga negativa (Mazur, 1989; Mazur & Ruhnke, 1993).

La figura 43 muestra el desarrollo espacio temporal de una descarga bidireccional mapeada el 23 de noviembre de 2018 en donde se localizan las regiones de carga a través de la identificación de líderes positivos y negativos (López et al., 2019). El panel superior representa la variación altura-tiempo de las fuentes mapeadas, el panel izquierdo corresponde a una distribución espacial en latitud-longitud y los paneles a la derecha son cortes verticales altura-latitud y altura-longitud respectivamente

Figura 43. Determinación de la estructura de carga de nubes de tormenta a partir de líderes bidireccionales



1.16.3 Interacción de rayos

Para cada líder de rayo que tuvo interacción con alguna estructura elevada de estudio se determinó su altura de iniciación, longitud y polaridad a través de un algoritmo de visualización que ubica en el tiempo y en el espacio las fuentes mapeadas en los procesos de propagación de líderes de rayo. También se determinó su polaridad a usando el gráfico de tiempo-distancia desarrollado por van der Velde y Montanyà (van der Velde & Montanyà, 2013), en el cual se reducen las dos dimensiones horizontales a una sola, llamada distancia a un punto de referencia, que corresponde al punto de inicio de la descarga, lo que permite que los ejes de tiempo y distancia sean relativos a la primera fuente de la descarga. De esta manera, la pendiente que se forma con las fuentes mapeadas da una noción de la velocidad de propagación del líder y por tanto de su polaridad. Aquellas fuentes que sigan la pendiente de menor inclinación hacen referencia a las velocidades de propagación de líderes positivos (2×10^4 m/s) y aquellas con mayor inclinación a líderes negativos (1×10^5 m/s a 1×10^6 m/s). Determinando la polaridad de líderes se corrobora de una manera más detallada la ubicación de las regiones de carga eléctrica en una tormenta.

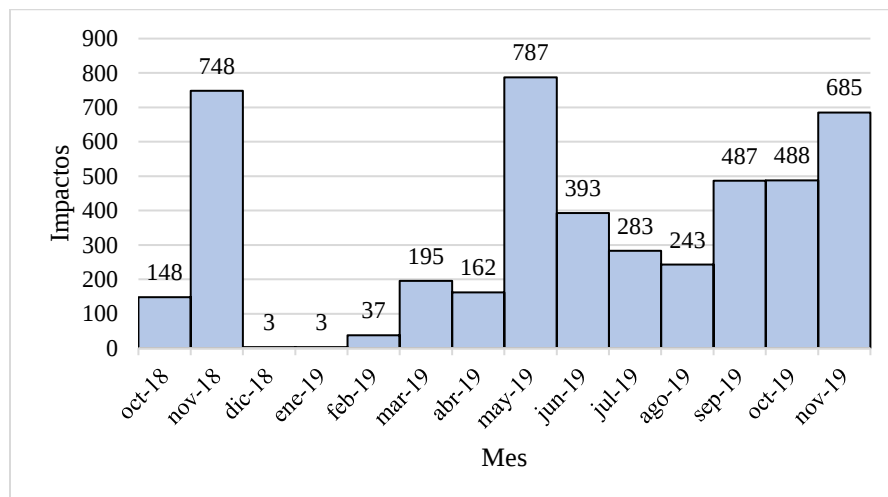
Así mismo, usando el gráfico anterior se determinó la naturaleza ascendente o descendente de los líderes de rayo que golpearon alguna estructura elevada y por tanto se logró caracterizar respuesta que brindan las estructuras a estos líderes que se propagan a través de la atmósfera (interacción).

1.17 Resultados

1.17.1 Estructuras con mayor interacción

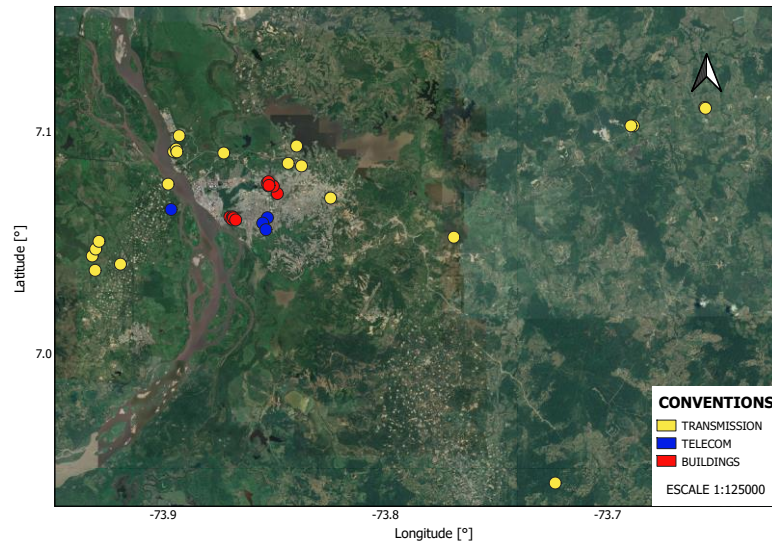
En total se localizaron 549 torres de transmisión con alturas entre 40 y 70 metros, 31 torres de telecomunicaciones con alturas que varían entre 60 y 70 metros, 22 edificaciones de más de 30 metros y 4 estructuras de iluminación de estadios de 50 metros. La Figura 44 presenta la variación mensual de los strokes que impactaron alguna estructura elevada. Se observa que hay dos picos de actividad correspondientes a los meses de mayo y noviembre. Estos meses coinciden con los periodos de máxima actividad de rayos en la región expuestos en (Herrera et al., 2018).

Figura 44. Variación mensual de impactos de rayo en estructuras elevadas.



La Figura 45 muestra las 22 estructuras que tuvieron mayor interacción con rayos de las cuales cerca del 77% corresponden a estructuras de transmisión.

Figura 45. Estructuras con mayor interacción con rayos en la zona de estudio.



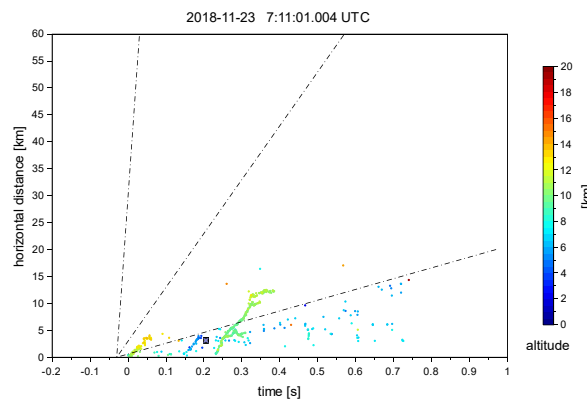
Se observa cómo una gran cantidad de estructuras con mayor interacción se ubican en o cerca del casco urbano de la ciudad de Barrancabermeja, de donde se infiere que el urbanismo, el uso del suelo y en sí la altura de estructuras elevadas allí presentes influyen en la cantidad de rayos en la zona en mención.

1.17.2 Estructuras de carga eléctrica

La figura 46 muestra la gráfica de tiempo-distancia de una descarga mapeada el 23 de noviembre de 2018 y que impactó una estructura elevada dentro del área de estudio. El punto (0,0) indica el inicio del flash, el símbolo 'x' corresponde a la descarga a nube tierra (stroke) detectada por la red LINET y la coloración de las fuentes denota la altura. Se observan un líder negativo (primera pendiente) que inicia a alturas cercanas a los 9 km y se propaga de manera ascendente hasta alcanzar una altura máxima de 14 km demarcando la región de carga positiva superior. Al transcurrir 0,1 segundos después del origen del flash se mapearon algunas fuentes emitidas por

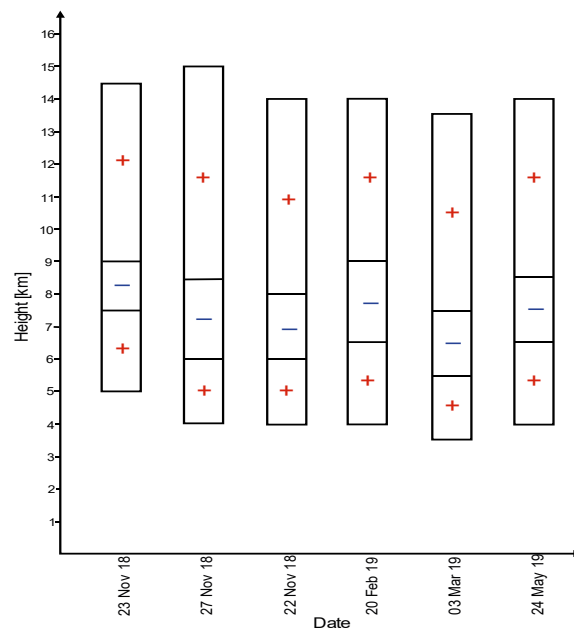
líderes positivos a alturas entre 7,5 y 8,5 km las cuales permiten ubicar la región de carga negativa central de la tormenta. Después de 0,2 segundos del origen de la descarga inicia a una altura de 7 km otro líder negativo (segunda pendiente) que desciende hasta alcanzar alturas cercanas a los 4 km y que delimita la región de carga positiva inferior. Instantes después la red LINET detecta una descarga -CG con corriente máxima de -38.1 kA atribuida a este último líder en mención. Una vez han transcurrido 0,23 segundos desde el origen de la descarga inicia otro líder negativo (tercera pendiente) que se propaga a alturas entre 9 y 12 km, al mismo tiempo se mapean algunas fuentes emitidas por líderes positivos por debajo de la pendiente de 2×10^4 m/s las cuales corroboran la ubicación de la región de carga negativa central.

Figura 46. Gráfico de tiempo – distancia de un rayo que impacta en una estructura elevada.



Con base en lo anterior se logra determinar cada estructura de carga. La figura 47 muestra las estructuras de carga eléctrica de las tormentas en las que se registraron descargas de rayos sobre estructuras elevadas, correspondientes a los días 22, 23 y 27 de noviembre de 2018, 20 de febrero, 03 de marzo y 24 de mayo de 2019.

Figura 47. Estructuras de carga de tormentas eléctricas en las que se registraron rayos en estructuras elevadas.



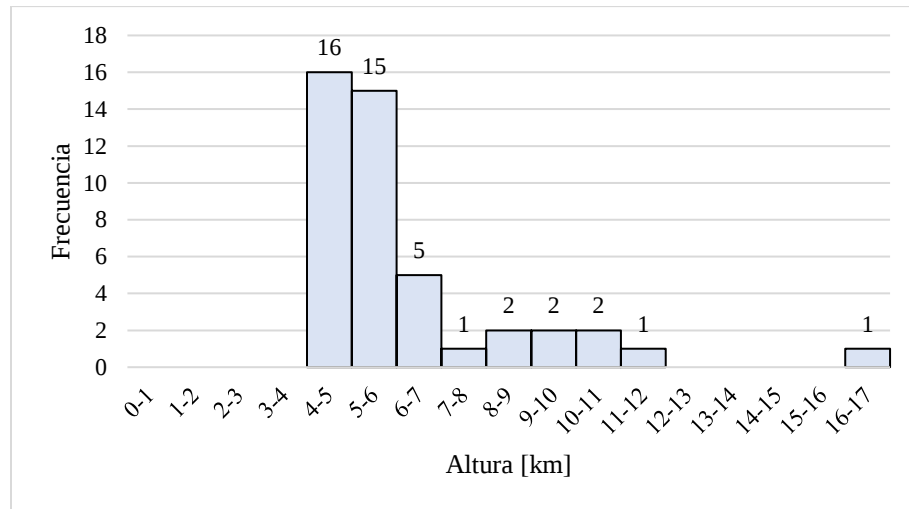
De esta manera, todas las tormentas en las que los rayos interactúan con estructuras elevadas presentan una estructura tripolar. El centroide de la región positiva inferior en esas tormentas se ubica a la altura de 5,2 km, el negativo principal a 7,4 km y el superior positivo a 11,3 km.

1.17.3 Caracterización de descargas

Se mapearon 45 descargas de rayo que golpearon alguna estructura de estudio las cuales en su mayoría inician a alturas entre a 4 y 6 km. La Figura 48 muestra un histograma de frecuencias de las alturas de iniciación. Esto indica que la mayoría de los rayos que impactaron en estructuras elevadas comenzaron en rangos de altura donde se encuentra la región de carga positiva más baja.

Por lo tanto, esta última región de carga es muy influyente en el número de rayos que interactúan con estructuras elevadas.

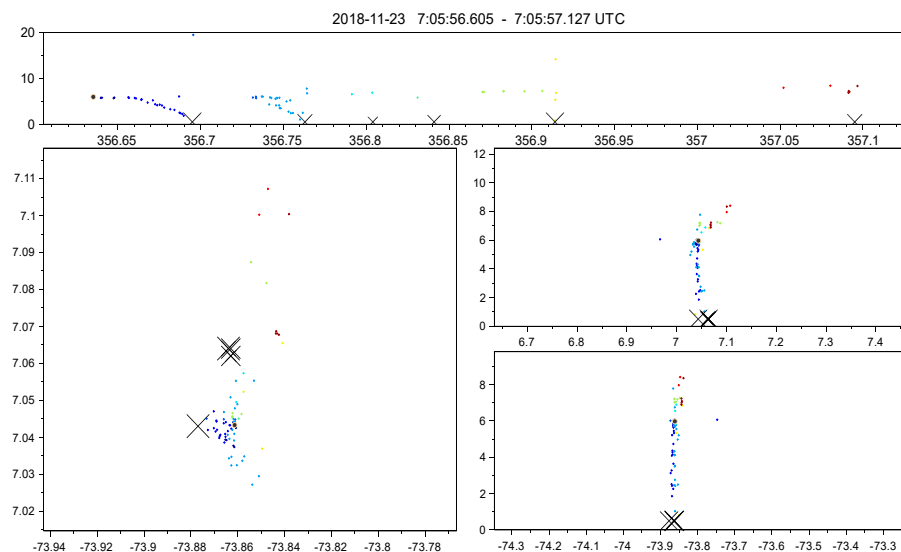
Figura 48. Histograma de alturas de iniciación de rayos que impactaron alguna estructura elevada.



Las descargas que interactúan con estructuras elevadas corresponden en un 84% a descargas con polaridad negativa (iniciadas por un líder descendente negativo) en un 16% a descargas con polaridad positiva (iniciadas por un líder descendente positivo). Lo que quiere decir que la interacción de rayos con estructuras elevadas se dio completamente por líderes descendentes provenientes de las nubes de tormenta los cuales causaron una respuesta ascendente de una estructura elevada, contrario a lo que se encontró en zonas templadas en donde los aerogeneradores inician líderes ascendentes propios ya que por su gran altura están mayormente expuestos a campos eléctricos fuertes dado que en las tormentas de invierno los centros de carga se encuentran más bajos [14]. También puede darse que estos líderes ascendentes sean debidos a líderes que se propagan cerca de la estructura y que causan impactos en las inmediaciones. En este estudio no se encontraron descargas causadas por líderes ascendentes iniciados desde la estructura.

Las características descendentes de los líderes de rayos que provocan descargas en estructuras elevadas se pueden determinar utilizando las fuentes de líderes en VHF emitidas en sus procesos de propagación las cuales son localizadas en el tiempo y espacio por la red LMA. Para todos los eventos analizados estas fuentes se ubicaron a alturas bajas momentos antes de que la red LINET registrara la descarga nube-tierra (stroke), como se muestra en el panel superior de la Figura 43, donde las fuentes pierden altura con el tiempo antes del stroke. Este tipo de rayo se puede clasificar como rayo descendente de nube a tierra y no como rayo ascendente desencadenado por otros. La Figura 49 muestra una descarga sobre una estructura elevada ocurrida el 23 de noviembre de 2018 a las 07:05:56,605 UTC la cual inicia a alturas cercanas a los 5 km y se propaga de manera descendente hasta causar un primer stroke, posteriormente a alturas cercanas inicia un nuevo líder descendente negativo el cual causa una descarga subsecuente. Instantes después la red LINET detecta otros tres strokes (símbolo x) pero se mapearon pocas fuentes de líderes de rayo antes de los mismos. Se observa el desarrollo espacio temporal de la descarga en mención.

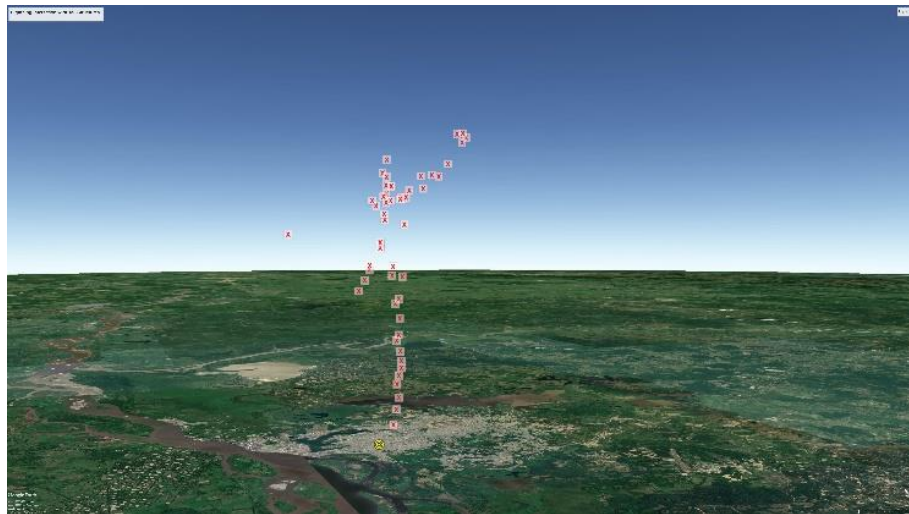
Figura 49. Descarga individual mapeada el 23 de noviembre de 2018 a las 07:05: 56,605 UTC.



Nota. El rayo impacta una estructura elevada causando cinco descargas subsecuentes representadas por el símbolo “X”

La figura 50 muestra una representación tridimensional del flash anterior en la Figura, la cual es correspondiente con las fuentes mapeadas por la red LMA durante el desarrollo de la descarga iniciada por un líder negativo descendente. El punto amarillo ubica el punto de impacto del rayo.

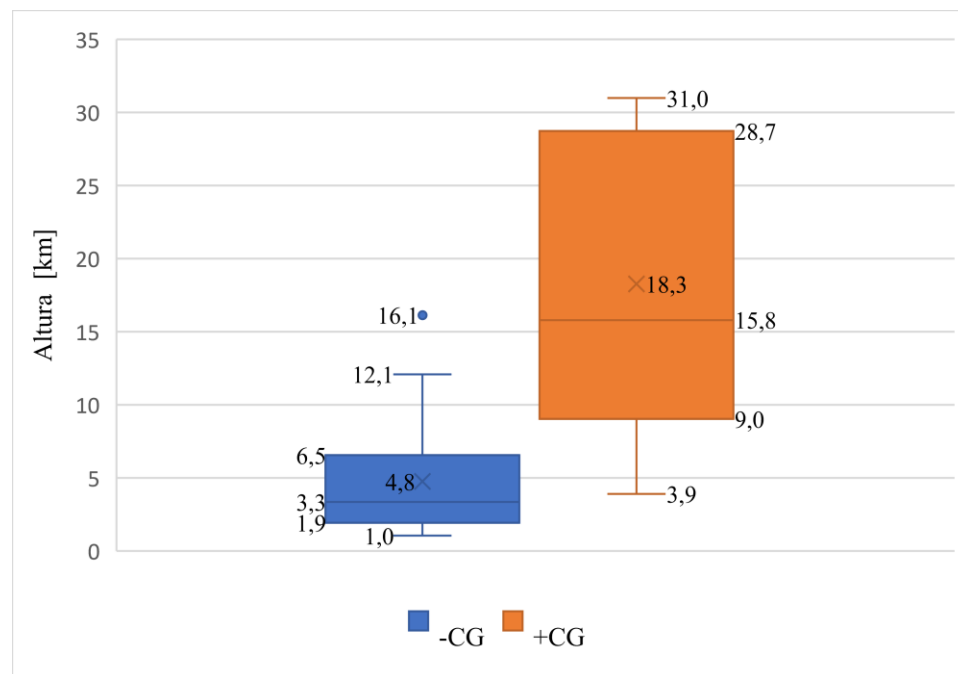
Figura 50. Representación tridimensional de un rayo que impacta una estructura elevada.



Las longitudes de líderes asociados con descargas +CG son mucho mayores que las de los que se asocian a descargas -CG. Se encontró que la longitud media de líderes positivos que causaron algún impacto en alguna estructura elevada corresponde a 18,6km y la de los líderes negativos alcanza los 4,8 km, lo que da a entender que estos últimos inician y se propagan mayormente sobre las regiones de carga positiva inferior y posteriormente emergen de la nube de tormenta y se propagan a bajas alturas hasta provocar un líder ascendente de enlace procedente de

alguna estructura prominente. Las grandes longitudes de líderes positivos se explican dado que se propagan mayormente sobre la región de carga negativa central la cual se encuentra a alturas superiores en comparación con la positiva inferior, por tanto, los líderes positivos que emergen de la estructura de carga tienen un proceso de ionización más largo. Además, los líderes positivos tienden a tener menos ramificaciones y por tanto recorren mayores distancias en sus procesos de propagación. La Figura 51 muestra un diagrama de cajas y bigotes de las longitudes respecto al origen del flash para descargas negativas y positivas.

Figura 51. Longitudes de líderes de rayos que interactuaron con estructuras elevadas.



En cuanto a corrientes se tiene que para descargas negativas se alcanza una media de -27 kA y una mediana de -21,3 kA y para descargas positivas de 17,6 y 12,4 kA respectivamente. Estos valores son congruentes con otras investigaciones en donde las magnitudes de las descargas negativas superan a las de descargas positivas.

Tabla 10. Corrientes de impactos en Estructuras Elevadas

Tipe	Media [kA]	Mediana [kA]
-CG	31	25,5
+CG	26	20,5

1.18 Conclusiones

En este trabajo se encontró que los meses con más impactos de rayo en estructuras elevadas corresponden a mayo y noviembre los cuales coinciden con los periodos de máxima actividad de rayos en Colombia. Así mismo, las estructuras con mayor interacción con rayos se ubican cerca del casco urbano de la ciudad, de donde se infiere que el urbanismo, el uso del suelo y en sí la altura de estructuras elevadas allí presentes influyen en la cantidad de rayos en la zona en mención.

Todas las tormentas eléctricas en las que hubo interacción de rayos con estructuras presentan una estructura de carga tripolar en la que la región positiva inferior tiene entre 4 y 6 km de altura, lo que indica que en esta región se originan la mayoría de los destellos que golpean estructuras elevadas. De lo cual se puede concluir que las estructuras de carga tripolar (positiva/negativa/positiva) y especialmente las regiones de carga positiva más baja son altamente influyentes en la tasa de destello de nube a tierra que interactúa con estructuras elevadas.

La interacción de rayos con estructuras elevadas se dio completamente por líderes descendentes provenientes de las nubes de tormenta los cuales causaron una respuesta ascendente de una estructura elevada. En este estudio no se encontraron descargas causadas por líderes ascendentes iniciados desde la estructura.

Parámetros para el diseño de protecciones contra rayos en zonas tropicales.

1.1 Resumen

En este trabajo, los autores modelan el número de rayos en estructuras de transmisión con la Densidad de Descargas a Tierra DDT, la altura de torre y la elevación sobre el nivel del mar como variables. Se ubicaron 333 estructuras de transmisión en el nororiente de Colombia, donde se estableció un radio de influencia de 150 metros para cada una. Los strokes nube-tierra detectados por la red LINET entre 2014 y 2021 en el área de estudio se agruparon en flashes y se contaron para cada radio. Asimismo, cada estructura se caracterizó por su altura, elevación sobre el nivel del mar y la DDT de la zona donde se ubica. De esta forma, se construyó un modelo que describe el 75,7 % de los flashes en las estructuras de transmisión con una desviación estándar de 0,321 flashes. Se concluye que existe una relación lineal entre la variable dependiente y todas las variables independientes.

Palabras clave—Densidad de descargas a tierra (DDT), red LINET, estructuras elevadas, torres de transmisión, impactos directos, tasa de fallas por flameo inverso BFR.

1.2 Introducción

Las estructuras elevadas son más propensas a ser impactadas por rayos que sus alrededores y estructuras más bajas (Baba, 2010). Lo anterior debido a que responden con líderes ascendentes que se conectan a los líderes escalonados descendentes originados en las nubes de tormenta los cuales se propagan a través de la atmósfera mediante procesos de ionización y causan uno o varios picos de corriente conocidos como descargas de retorno (He et al., 2013). A su vez, estructuras que superan los 100 metros de elevación sobre su entorno son proclives a iniciar líderes

ascendentes que pueden desencadenar descargas de retorno al alcanzar la estructura de carga de nubes de tormenta (Berger, 1967).

La cantidad de impactos de rayos en estructuras elevadas (ascendentes y descendentes) fue modelada en un principio en (Eriksson, 1978) a través de la expresión:

$$N_s = 2,4 \cdot 10^{-5} H^{2,05} \quad (1)$$

Donde N_s corresponde al número promedio de rayos en la estructura elevada al año para una Densidad de Descargas a Tierra N_g de 1 flash/km²/año y H es la altura de la estructura en metros. Lo anterior implica que el número de impactos de rayo en una estructura elevada es directamente proporcional al cuadrado de su altura como se estableció en (Golde, 1945). Así mismo se determinó que el aumento de rayos en estructuras que superan los 100 metros de altura fue debido a líderes ascendentes que inician desde la estructura (descarga ascendente) en contraste a lo que sucede con estructuras más bajas que son impactadas únicamente por líderes descendentes (descarga descendente) (McCann, 1944). Posteriormente, en (Eriksson, 1987) se estableció la proporción de rayos ascendentes en una estructura elevada en función a su altura así:

$$P_u = 52,8 \ln H - 230 \quad (2)$$

Así, se obtuvo el número de rayos descendentes en estructuras descrito por la expresión:

$$N_d = 2,4 \cdot 10^{-5} H^{2,05} - 3,0 \cdot 10^{-9} H^{3,53} \quad (3)$$

Además, se establecieron los conceptos de radio efectivo equivalente (Eriksson, 1987) y de distancia crítica (Golde, 1967), este último muy utilizado en el diseño de protecciones contra rayos. Finalmente, en (Eriksson, 1987) se determinó la incidencia promedio de rayos en líneas de transmisión en flashes/100km/año usando la siguiente expresión:

$$N=N_g(b + 28 * H^{0,6}) * 10^{-1} \quad (4)$$

Estudios posteriores introdujeron el efecto del terreno montañoso en la cantidad de rayos negativos que impactan estructuras elevadas teniendo en cuenta el efecto de la topografía en las tensiones inducidas y la influencia de la disminución de la densidad del aire en el proceso de enlace (Rizk, 1994a). Así mismo establecieron los criterios para la ocurrencia de rayos ascendentes y se determinó la hipótesis de que el campo eléctrico en la tierra debido a las nubes de tormenta puede tener efectos significativos en el radio de atracción a rayos negativos descendentes en estructuras elevadas (Rizk, 1994b). También se determinó que los rayos que impactan objetos de gran altura tienen picos de corriente más altos y mayor cantidad de descargas subsecuentes en comparación con los rayos que impactan las vecindades de la torre (Diendorfer & Schultz, 1998)

También se analizaron los campos eléctricos y magnéticos irradiados por rayos que impactan estructuras elevadas en la primera descarga de retorno y sus subsecuentes, concluyendo que la presencia de un objeto elevado tiende a aumentar los picos de dichos campos (Rachidi et al., 2001) y se midieron tensiones inducidas en líneas de distribución debidas a descargas de rayo negativas en estructuras elevadas (Michishita et al., 2003). Adicionalmente se estudiaron los procesos físicos que ocurren durante el desarrollo de líderes positivos ascendentes en estructuras elevadas con base en la teoría del líder bidireccional (Mazur & Ruhnke, 2011).

Estudios más recientes determinaron que las turbinas eólicas pueden iniciar descargas ascendentes mucho más fácilmente que estructuras estáticas dado que la rotación de sus palas y su material causa una mayor inducción electrostática, lo que resulta en campos eléctricos más fuertes que favorecen la iniciación de líderes ascendentes (Montanyà et al., 2014). Además, se mapearon líderes negativos que produjeron impactos en aerogeneradores a través de redes Lightning

Mapping Array (Candela Garolera et al., 2015; Montanyà, van der Velde, et al., 2016) y se determinaron las características de nubes de tormenta que favorecen los rayos ascendentes y descendentes en aerogeneradores (Pineda et al., 2018), concluyendo que la mayoría de rayos que impactan estructuras elevadas corresponden a descargas negativas con picos de corriente por encima del promedio.

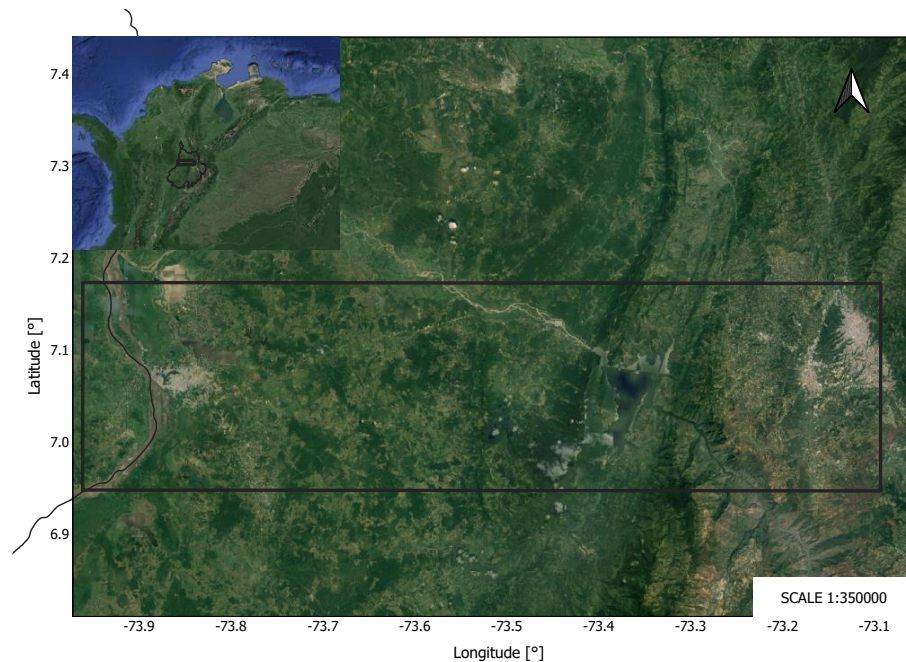
Conocer el número de impactos directos de rayo en estructuras de transmisión es de suma importancia para determinar la tasa de fallas por flameo inverso BFR, un parámetro trascendental en el desempeño ante rayos de líneas de transmisión y en el diseño de sistemas de apantallamiento. Es por ello que en este trabajo se presenta una expresión para determinar el número de impactos de rayo en dichas estructuras como una función de la Densidad de Descargas a Tierra, de la altura de la torre y su elevación respecto al nivel del mar.

1.3 Metodología

1.3.1 Zona de estudio

El área de estudio corresponde a un recuadro de 96*25 km ubicado al nordeste colombiano en el departamento de Santander. La zona se ve atravesada por una cadena montañosa por el oeste y comprende una gran llanura al este. La Figura 52 muestra la ubicación de la zona de estudio.

Figura 52. Ubicación de la zona de estudio



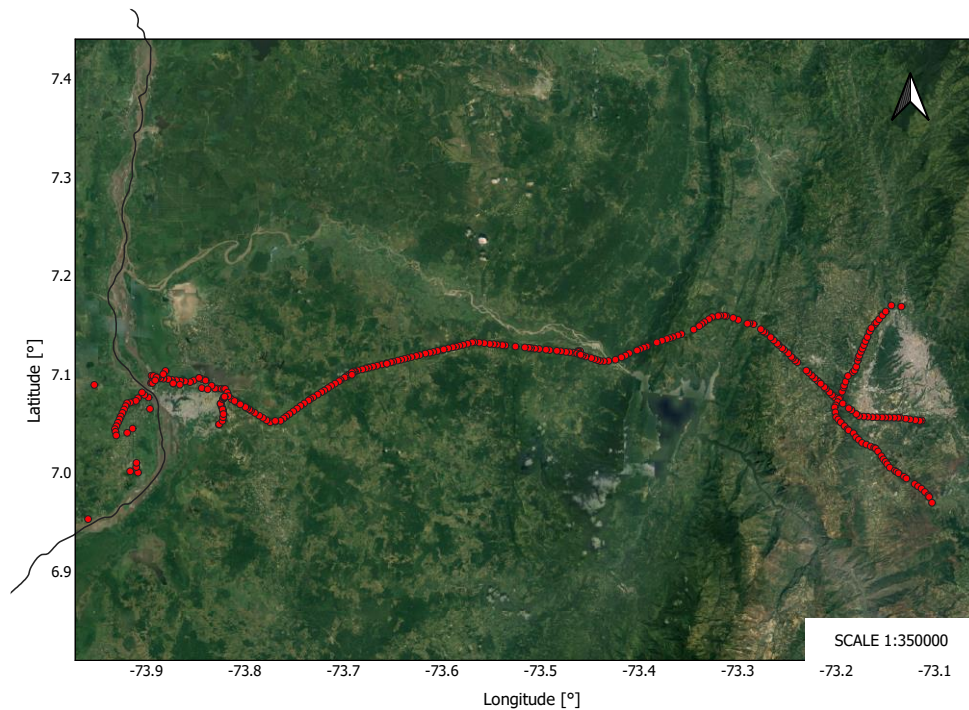
1.3.2 Datos

La información de descargas a tierra empleada en este estudio corresponde a los eventos nube tierra detectados entre 2014 y 2021 por la Red Colombiana de detección total de rayos con tecnología LINET (H. Betz et al., 2007; H. D. Betz et al., 2004, 2009; Höller et al., 2009). Esta red “Total Lightning” que opera en los rangos de frecuencia VLF/LF está compuesta por 19 sensores distribuidos a lo largo del país los cuales detectan el campo magnético generado por los impulsos electromagnéticos del rayo a través de un arreglo de dos antenas de lazo ortogonales entre sí, con los cuales se determina la posición de cada evento a través de la técnica del tiempo de arribo. Teniendo en cuenta que hay zonas en el país en donde la amplitud mínima detectable de la corriente pico de descarga es de 10 kA (Aranguren et al., 2017; Williams, 2001), no se consideraron los impactos con corrientes menores a este valor.

1.3.3 Estructuras elevadas y radio de influencia

En la zona de estudio se ubicaron el total 333 estructuras de transmisión cuyas alturas varían entre 40 y 140 metros. Estas estructuras se localizan a elevaciones entre 65 y 1370 msnm. La Figura 53 presenta la ubicación de las estructuras elevadas localizadas.

Figura 53. Ubicación de las estructuras elevadas de estudio



En este trabajo afirmamos que todos los flashes dentro del radio de influencia de alguna estructura elevada son directos. Por lo tanto, los impactos con errores significativos deben descartarse. En otras palabras, se deben considerar destellos con errores menores para reducir la incertidumbre de contar un impacto como directo cuando no lo fue.

Se analizó el error de detección de cada flash registrado en el área de estudio mediante percentiles para recalcular el radio de influencia de las estructuras elevadas. El percentil 75 corresponde a 168 metros, lo que indica que el 75% de los rayos localizados tienen errores menores

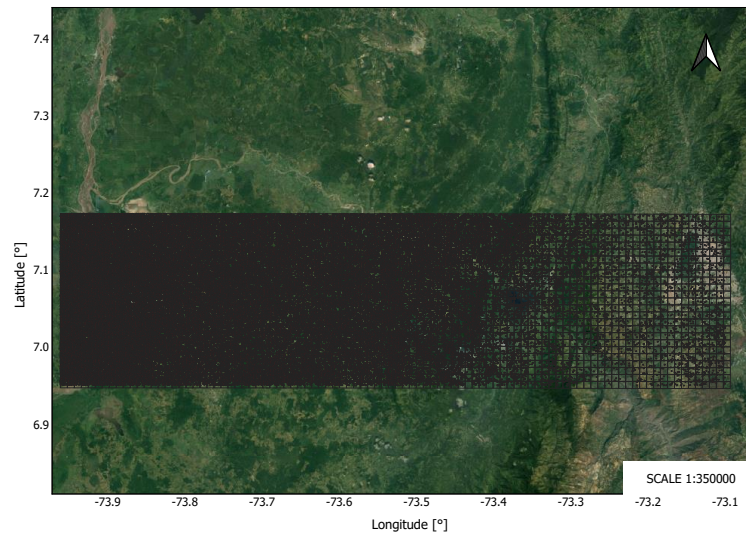
a 168 m, por lo que el 25% de los datos tienen errores sustanciales. Por lo tanto, la probabilidad de haber impactado alguna estructura de transmisión disminuye considerablemente. Por lo anterior, se descartaron flashes con errores de ubicación mayores a 168 m, y se estableció un radio de influencia de 150 m sustentado por (“Lightning: Principles, Instruments and Applications,” 2009) para cada estructura elevada. De modo que se considera directo cada impacto con un error de localización inferior a 168 m y registrado dentro de algún radio de influencia de 150 m.

Usando el modelo electrogeométrico y considerando una altura promedio de 40 m para las torres, los rayos con corrientes mayores a 10 kA impactan con seguridad en una estructura elevada si se registran a 45 m o menos de ella. Esto último, si la red no tenía error de ubicación, pero debido al error promedio calculado en la base de datos de rayos y lo expuesto en (“Lightning: Principles, Instruments and Applications,” 2009), se utilizó el criterio de error de ubicación para definir el radio de influencia de cada estructura.

1.3.4 Determinación de la DDT

Para encontrar la DDT de la zona se establece una cuadrícula de 1 km² y se ubican los flashes como puntos en el espacio como se muestra en la Figura 54.

Figura 54. Cuadrícula para el cálculo de la DDT



Posteriormente se cuentan todos los flashes por recuadro y el resultado se divide en el número de años del estudio que corresponden a 8, de tal forma que se obtiene el valor de DDT en flashes/km²/año.

Teniendo en cuenta que la posición de una estructura elevada dentro de una celda puede alterar el cálculo de la DDT, se realizaron cuatro movimientos de rejilla adicionales al inicialmente establecido. Estos movimientos corresponden a 250 m hacia la derecha, izquierda y arriba y abajo, obteniendo finalmente 5 cuadrículas. Para cada uno de ellos se determinó la DDT y se observó que no hubo cambios significativos en los valores de DDT según la posición de la estructura elevada en la celda. Un estudio apoya lo anterior ya que se encontraron hotspots en el área de estudio (Ardila Murillo et al., 2022), los cuales no necesariamente coinciden con estructuras elevadas. Por lo tanto, en esta zona es imposible afirmar que una estructura alta corresponde a un punto caliente en todos los casos.

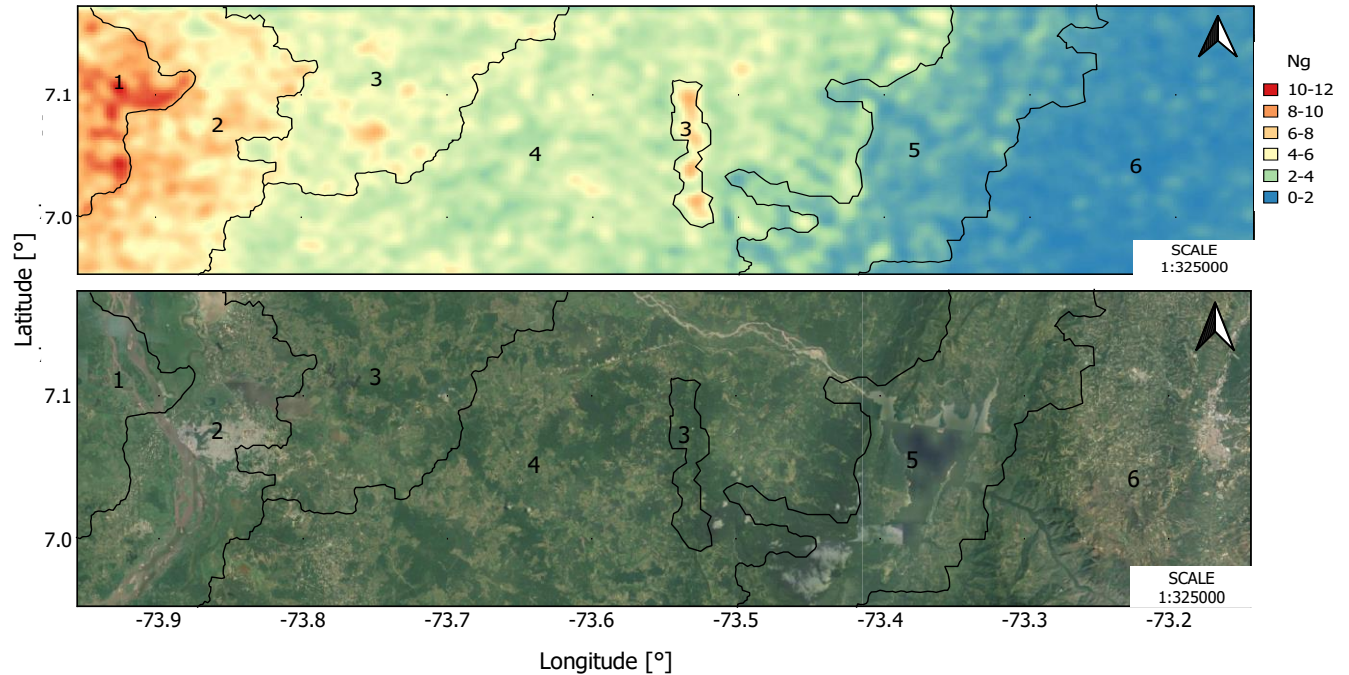
De acuerdo con lo anterior, el cálculo de la DDT no se altera sustancialmente al cambiar la posición de la cuadrícula. Sin embargo, se consideraron las cinco redes para asignar un valor DDT

a cada estructura de transmisión. Entonces, el promedio de las cinco medidas de DDT corresponde al valor de DDT asignado a cada estructura. Asimismo, se realizó una segunda prueba, y fue ubicar cada estructura elevada justo en el centro de una celda de 1 km de lado. Para esta celda se calculó la DDT, obteniendo valores superiores a los obtenidos al promediar las cinco medidas antes mencionadas.

1.3.5 Correlación entre la DDT y la altitud del terreno

La primera metodología (Pinto et al., 1999; Reap, 1986; Schulz & Diendorfer, 1999) utilizada para encontrar una correlación entre GFD y la elevación del terreno estableció celdas de 1 km² en el terreno de estudio. Dos datos promedio caracterizaron cada celda: GFD(i,j) y altura h(i,j). De esta manera, se calcula un valor medio de GFD para cada intervalo de altura y, por lo tanto, se logró una correlación entre GFD y h para todas las alturas. valores. Regiones con la misma altura, pero diferente actividad de rayos se mezcla con este método y, por lo tanto, se pueden obtener resultados distorsionados.

En (Smorgonskiy et al., 2013), se propone una mejora denominada método de descomposición de subáreas. Se agrega un paso que corresponde a dividir el área de estudio en subáreas con un nivel promedio relativamente uniforme de actividad de rayos. Luego, la relación entre DDT y h se calcula utilizando el primer método para cada subárea. Al agregar este paso, se separan las regiones con el mismo rango de altitud y diferente actividad de rayos. La Figura 55 muestra las subáreas determinadas en el área de estudio de acuerdo con su actividad de rayos promedio, para lo cual se determinó la relación entre el DDT y la elevación. Las alturas del área de estudio varían desde los 59 msnm hasta los 2068 msnm.

Figura 55. Subáreas en el área de estudio y su actividad de rayos

1.3.6 Construcción del modelo

Teniendo como variable independiente el número de flashes en estructuras elevadas y como variables dependientes la densidad de descargas a tierra, la altura de la estructura y su altura sobre el nivel del mar se realizó una regresión lineal múltiple y se analizó la sensibilidad que tiene la variable independiente ante cada una de las variables dependientes.

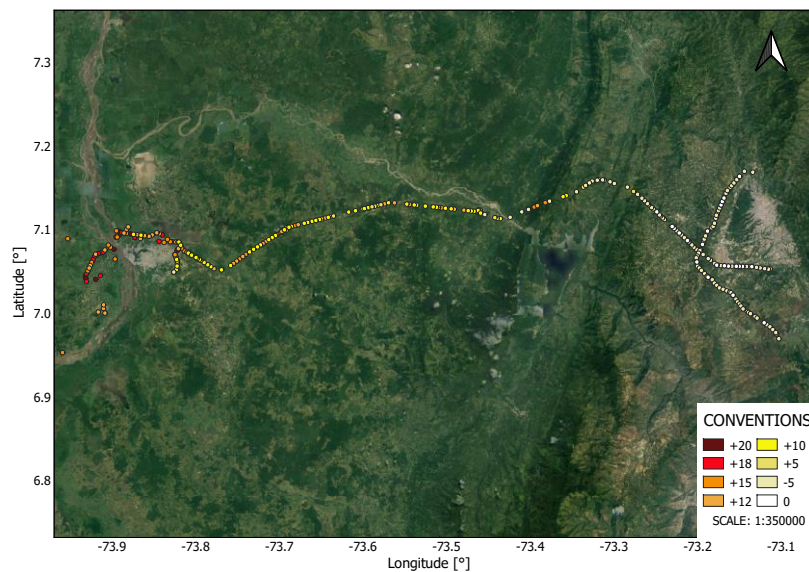
1.4 Resultados

1.4.1 Flashes en estructuras elevadas

La Figura 56 presenta la variación de la cantidad de flashes en estructuras elevadas. Se observa que las estructuras con mayor número de impactos se ubican a la izquierda de la gráfica sobre la ribera del río Magdalena y cerca del municipio de Barrancabermeja a alturas entre 60 y

100 msnm. Las estructuras en tonalidades amarillas tienen una cantidad moderada de impactos de rayo y se ubican a alturas entre 100 y 600 msnm. Por su parte, las estructuras menos impactadas por rayos se ubican a la derecha de la gráfica a alturas que superan los 1000 msnm, especialmente sobre cadenas montañosas.

Figura 56. Número de flashes en estructuras de transmisión

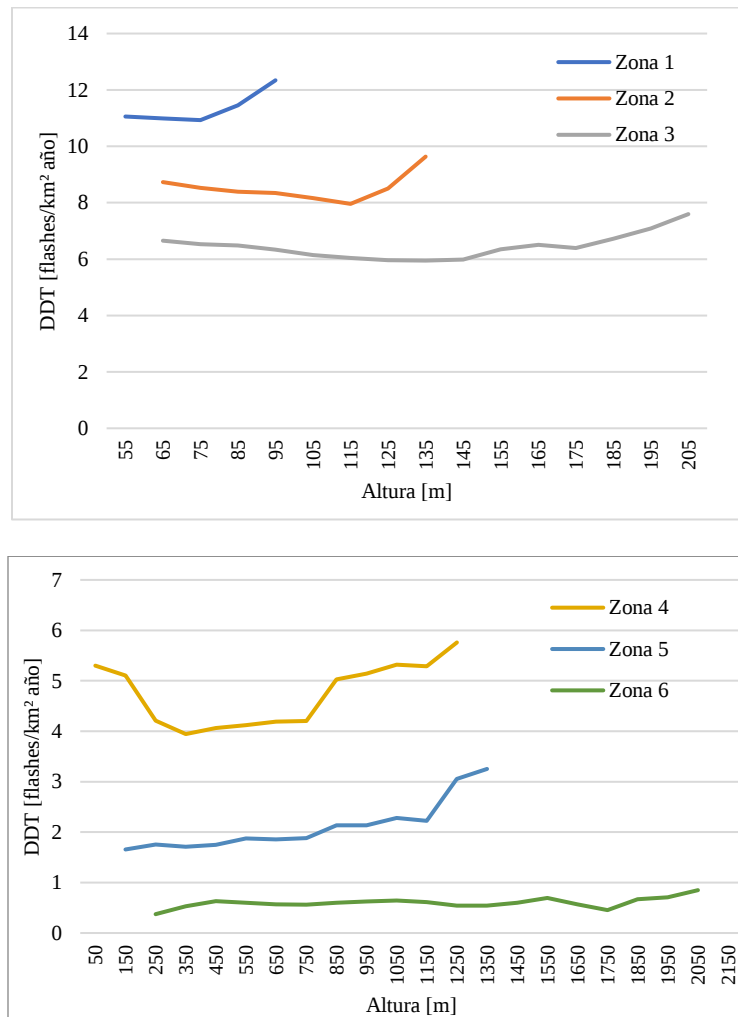


1.4.2 Correlación entre la DDT y la altura del terreno

La figura 57 muestra la variación de la DDT en función de la elevación del terreno. A partir de esto, se puede concluir que la DDT aumenta con la altura en un área con actividad uniforme de rayos (zona). Entonces, se pueden obtener diferentes valores de DDT para un mismo valor de altura según el área donde se ubica la estructura. Con base en lo anterior, una estructura ubicada a menos de 100 msnm en una zona de alta actividad de rayos (zona 1) puede tener una DDT mayor que una ubicada a más de 200 msnm en una zona de menor actividad (zona 3). Por lo tanto, la afirmación de que la DDT aumenta con la altura se aplica solo a áreas con actividad uniforme de

rayos. Los valores de DDT de las estructuras elevadas son comparables, pero solo para las estructuras que pertenecen a la misma área, en cuyo caso la estructura con mayor elevación tendrá un valor de DDT más alto y, por lo tanto, un mayor número de impactos. Sin embargo, para estructuras que pertenecen a diferentes zonas, la estructura en un área con mayor actividad de rayos tenderá a registrar un mayor número de impactos de rayos, incluso si se encuentra a menor altura. Lo anterior se puede evidenciar en los gráficos presentados.

Figura 57. Correlación entre la DDT y la altura del terreno



1.4.3 Formulación del modelo

Se obtiene la siguiente función que modela la cantidad de flashes por estructura elevada al año.

$$Fl = 0.15438680 \text{ GFD} + 0.00050055 \text{ H} + 2.5948 \times 10^{-5} h - 0.03755805 \quad (5)$$

Donde:

Fl: Flashes al año por estructura elevada

DDT: Densidad de Descargas a Tierra de la zona donde se ubica la estructura elevada en flashes/km²/año

H: Altura de la estructura elevada en metros.

h: Altura sobre el nivel del mar del sitio donde se encuentra la estructura elevada en metros

De donde se observa que el número de flashes en estructuras elevadas aumentará en 0,15 flashes por cada incremento de 1 flash/km²/año de DDT manteniendo constante la altura de la estructura y la altura sobre el nivel del mar, aumentará en 0,0005 flashes por cada incremento de 1 metro en la altura de la estructura manteniendo constante la DDT y la altura sobre el nivel del mar, y crecerá en 2.5948×10^{-5} flashes por cada metro que se incremente la altura sobre el nivel del mar. La Tabla 11 muestra las estadísticas de la regresión obtenida.

Tabla 11. Estadísticas de la regresión

Parámetro	Valor
Coeficiente de correlación múltiple	0,871
Coeficiente de determinación R^2	0,759
R^2 ajustado	0,757
Error típico	0,321
Observaciones	333

De donde la asociación de las tres variables independientes con la variable dependiente corresponde al 87,11%. Así mismo se tiene que el 75,88% de la variación del número de impactos en estructuras elevadas es explicado por la variación de la DDT, la altura de la estructura y la altura sobre el nivel del mar simultáneamente. Lo anterior resulta de dividir la suma de cuadrados de la regresión SSR (106.530) en la suma total de cuadrados SST (140.389).

Con lo anterior, hay un 24,12% de la variación del número de impactos en estructuras elevadas que es explicado por otras variables que serán objeto de estudios posteriores, entre ellas se encuentra la topología de nubes de tormenta en las cuales inician los rayos que impactan estructuras elevadas, las alturas de sus centros de carga y la polaridad de líderes que causan estos impactos de rayo en estructuras elevadas. Teniendo en cuenta que la inclusión de una nueva variable causa la pérdida de un grado de libertad, se hace necesario corroborar que esta variable aporte suficiente poder explicativo a la variable independiente.

El porcentaje de explicación de la cantidad de impactos de rayo en estructuras elevadas realizado por la DDT, la altura de la estructura y la altura sobre el nivel del mar corresponde al 75.7%, tomando en cuenta la relación entre la cantidad de estructuras elevadas y de variables independientes. Por último, la desviación estándar del modelo es de 0,321 flashes, luego un rango

de predicción para la cantidad de rayos en estructuras elevadas se puede aproximar por $\pm 0,64$ flashes.

1.4.4 Diagnóstico del modelo

Se realiza la prueba F para evaluar la significancia general del modelo encontrado. Como hipótesis nula se establece no hay relación lineal entre la variable dependiente y las variables dependientes. Como hipótesis alternativa se plantea que existe una relación lineal entre la cantidad de rayos en estructuras elevadas y al menos una de las variables independientes. El estadístico F de prueba se calcula de la siguiente forma:

$$F = \frac{SSR/k}{SSE/n - k - 1} = \frac{MSR}{MSE} \quad (6)$$

Donde:

SSR: Suma de cuadrados de la regresión

SSE: Suma de cuadrados de los residuos

k: Variables independientes o grados de libertad del numerador

n: Número de estructuras elevadas

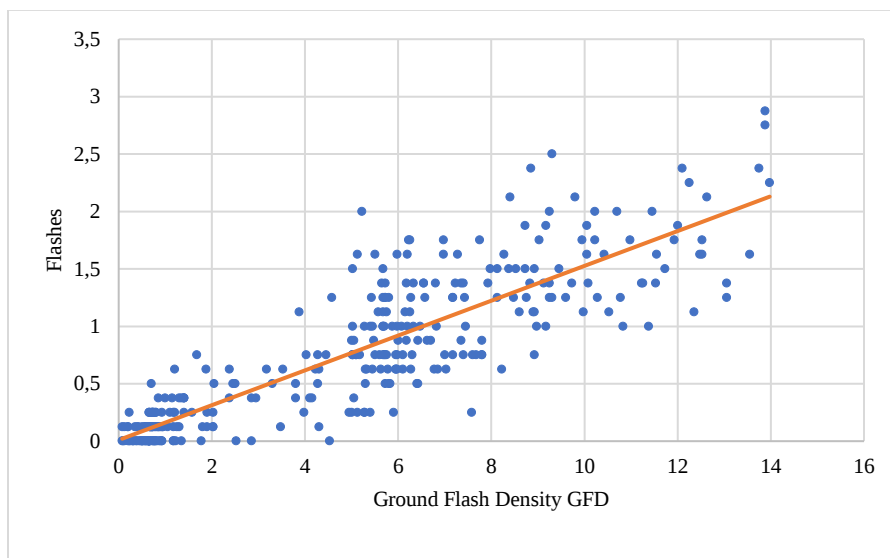
n-k-1: Grados de libertad del denominador

$$F = \frac{106.530/3}{33.859/329} = 345,039 \quad (7)$$

Con un nivel de significancia del 5% y teniendo 3 grados de libertad para el numerador y 329 para el denominador, el valor crítico según la distribución F corresponde a 2,632, luego partir de este valor se delimita la zona de rechazo en la cual se ubica el estadístico de prueba y por tanto se rechaza la hipótesis nula. De acuerdo a lo anterior se concluye que hay una relación lineal entre la variable dependiente y todas las variables independientes consideradas de forma conjunta y por tanto hay suficiente evidencia para mostrar que el modelo de regresión explica parte de la variación del número de impactos de rayo en estructuras elevadas (al menos una de las pendientes de la regresión no es cero).

La variable más significativa del modelo encontrado es la Densidad de Descargas a Tierra DDT. La Figura 58 muestra la variación de la cantidad de impactos de rayo en estructuras elevadas en función de la DDT.

Figura 58. Variación de flashes como función de la DDT



Para evaluar la significancia de esta variable se realiza la prueba t, la cual muestra si hay una relación lineal entre la variable independiente y la dependiente. Se usan las mismas hipótesis de la prueba F. Para este caso el estadístico de prueba corresponde a 18,193 y el valor crítico según la distribución t con un grado de significancia de 5% y 329 grados de libertad corresponde a 1,967 a partir del cual se delimita la zona de rechazo para valores positivos y negativos. Debido a que el estadístico de prueba está en la zona de rechazo hay evidencia suficiente para concluir que la DDT afecta significativamente a la cantidad de impactos en estructuras elevadas.

1.5 Discusión

El parámetro N indica la cantidad de rayos que impactan en un tramo de una línea de transmisión de 100 km al año y es parte fundamental para calcular la tasa de fallas por flameo inverso BFR, la cual considera que, de todos los impactos sobre la línea de transmisión, un 60% causan flameo y corresponden a impactos directos sobre la estructura de transmisión (CIGRE WG01 SC33, 1991). De esta manera el BFR se describe como:

$$BFR=0,6*N*P(I_c) \quad (9)$$

Siendo N como se establece en la Ecuación (4) y $P(I_c)$ la probabilidad de que la corriente crítica I_c sea excedida.

Para el cálculo de N se establece una altura promedio de las estructuras de transmisión a lo largo de los 100 km de la línea y así mismo se estipula un valor de Densidad de Descargas a Tierra promedio en este trayecto. Entendiendo que la altura de las estructuras de transmisión a lo largo del tramo depende de la topografía del terreno, fijar un valor promedio de altura para todo el tramo puede subestimar el número de impactos de rayo en estructuras de transmisión. Así mismo,

teniendo en cuenta las variaciones de la DDT con el relieve y la altura sobre el nivel del mar en zonas tropicales (Bourscheidt et al., 2009; Herrera et al., 2018), resulta complejo fijar un valor promedio de este parámetro en un trayecto de 100 km que tenga en cuenta dichos efectos.

Por lo anterior, en este trabajo se propone encontrar el número de impactos directos de rayo en cada estructura de transmisión mediante la Ecuación (5) y sumar dichas contribuciones a lo largo de un tramo de 100 km de línea así:

$$N_T = \sum_{i=1}^n Fl_i \quad (10)$$

Donde i es la cantidad de estructuras de transmisión en un tramo de 100 km, Fl es el número de impactos directos por estructura y N_T es la cantidad total de impactos directos de rayo en estructuras de transmisión en el tramo señalado. De esta manera el BFR quedaría determinado así:

$$BFR = N_T * P(I_c) \quad (11)$$

1.6 Conclusiones

Con los datos de 333 estructuras de transmisión ubicadas en el nordeste de Colombia se construyó un modelo que predice el número de impactos directos de rayo en estructuras de transmisión por medio de tres variables: la Densidad de Descargas a Tierra, la altura de la torre y su elevación sobre el nivel del mar. Así, el 75,7 % de la variación del número de impactos en estructuras elevadas es explicado por la variación de estas tres variables independientes con una desviación estándar de 0,32 flashes.

Se encontró que un aumento de la Densidad de Descargas a Tierra y de la altura de la estructura elevada causa un crecimiento en la cantidad de rayos en estructuras elevadas, contrario

a lo que sucede con la elevación sobre el nivel del mar de la torre ya que su aumento causa una disminución en el parámetro de estudio. Se establece que la variable más significativa en cuanto al cálculo de descargas directas de rayo en estructuras elevadas es la Densidad de Descargas a Tierra.

De acuerdo al diagnóstico del modelo se concluye que hay una relación lineal entre la variable dependiente y todas las variables independientes consideradas de forma conjunta y por tanto hay suficiente evidencia para mostrar que el modelo de regresión explica parte de la variación del número de impactos de rayo en estructuras elevadas.

Para efectos de estimar la tasa de fallas por flameo inverso BFR, en cuanto al cálculo de impactos directos de rayo en un tramo de línea de transmisión, se recomienda encontrar el número de impactos por cada estructura de transmisión que conforma el tramo teniendo en cuenta las variaciones de parámetros como la DDT y la altura de la torre con la topografía del terreno.

Conclusiones generales

En cuanto al estudio previo realizado:

Se evidenció una marcada influencia de la topografía y de la altitud del terreno en la incidencia de descargas atmosféricas en el departamento de Santander, ya que los municipios con mayor actividad de rayos se ubican a los costados de altas cadenas montañosas a alturas menores que 1.500 msnm y los municipios de menor actividad se sitúan sobre páramos y cerros a alturas entre 3.000 y 3.500 msnm.

En el departamento de Santander es más frecuente que los rayos tengan corrientes pico de descarga de retorno menores a 20 kA, lo que indica que los sistemas de protección contra rayos se deben dimensionar no solo para evitar daños causados por corrientes grandes sino para proteger también de estas corrientes menores. Esto es primordial al momento de escoger el nivel de protección contra rayos y determinar el radio de la esfera rodante en los diseños de sistemas de captación.

En cuanto al cumplimiento de los objetivos del trabajo de investigación:

Se encontraron los sitios con mayor actividad de rayos, de los cuales, 34 se ubican en Barrancabermeja y 235 en Yondó, lo que concuerda con mapas de densidad de descargas a Tierra (DDT) hechos en la zona en donde se presenta un aumento en la cantidad de descargas por kilómetro cuadrado por año en Yondó, en comparación con Barrancabermeja.

De las 27 estructuras elevadas encontradas en Yondó, solo 6 se ubican en algún *hotspot*, lo que muestra que en este municipio la presencia de alguna estructura elevada no garantiza un *hotspot* y que los sitios de mayor actividad de rayos no se ven influenciados por la presencia de

estructuras elevadas. Ahora bien, para el caso de Barrancabermeja, se hallaron 10 estructuras elevadas en algún *hotspot*, de las cuales 7 se ubican en el casco urbano donde se encontraron 9 *hotspots*, de donde se infiere que en este municipio el urbanismo y la presencia de estructuras elevadas sí aumenta la actividad de rayos.

Se lograron identificar estructuras de carga eléctrica con distribuciones típicas tripolares en las dos tormentas estudiadas en este trabajo de investigación. En ambas tormentas se logró localizar la región de carga positiva inferior por lo que fue predominante la actividad de descargas nube-tierra.

En general las alturas de las regiones de carga para ambas tormentas son similares a las encontradas por la red COLMA ubicada en Santa Marta (Magdalena) y mayores a las de North Central Florida. Se registraron líderes negativos y positivos que se propagaron a velocidades radiales máximas de 1×10^6 y 2×10^4 m/s respectivamente.

Las alturas máximas de inicio para ambas tormentas corresponden a 14,5 y 12,9 km respectivamente, las cuales superan a las halladas en Santa Marta. Así mismo se corroboraron líderes de rayos que alcanzaron alturas máximas de propagación de 15,2 y 15,9 km, un poco menores a las reportadas en la región norte de Colombia en Santa Marta.

En este trabajo se encontró que los meses con más impactos de rayo en estructuras elevadas corresponden a mayo y noviembre los cuales coinciden con los periodos de máxima actividad de rayos en Colombia. Así mismo, las estructuras con mayor interacción con rayos se ubican cerca del casco urbano de la ciudad, de donde se infiere que el urbanismo, el uso del suelo y en sí la altura de estructuras elevadas allí presentes influyen en la cantidad de rayos en la zona en mención.

Todas las tormentas eléctricas en las que hubo interacción de rayos con estructuras presentan una estructura de carga tripolar en la que la región positiva inferior tiene entre 4 y 6 km de altura, lo que indica que en esta región se originan la mayoría de los rayos que impactan estructuras elevadas. De lo cual se puede concluir que las estructuras de carga tripolar (positiva/negativa/positiva) y especialmente las regiones de carga positiva más baja son altamente influyentes en la tasa de rayos nube a tierra que interactúa con estructuras elevadas.

La interacción de rayos con estructuras elevadas se dio completamente por líderes descendentes provenientes de las nubes de tormenta los cuales causaron una respuesta ascendente de una estructura elevada. En este estudio no se encontraron descargas causadas por líderes ascendentes iniciados desde la estructura

Con los datos de 333 estructuras de transmisión ubicadas en el nordeste de Colombia se construyó un modelo que predice el número de impactos directos de rayo en estructuras de transmisión por medio de tres variables: la Densidad de Descargas a Tierra, la altura de la torre y su elevación sobre el nivel del mar. Así, el 75.7 % de la variación del número de impactos en estructuras elevadas es explicado por la variación de estas tres variables independientes con una desviación estándar de 0,321 flashes.

Se encontró que un aumento de la Densidad de Descargas a Tierra, de la altura de la estructura elevada y de su altura sobre el nivel del mar causa un crecimiento en la cantidad de rayos en estructuras elevadas. Se establece que la variable más significativa en cuanto al cálculo de descargas directas de rayo en estructuras elevadas es la Densidad de Descargas a Tierra.

Para efectos de estimar la tasa de fallas por flameo inverso BFR, en cuanto al cálculo de impactos directos de rayo en un tramo de línea de transmisión, se recomienda encontrar el número

de impactos por cada estructura de transmisión que conforma el tramo teniendo en cuenta las variaciones de parámetros como la DDT y la altura de la torre con la topografía del terreno.

Referencias

- Albrecht, R. I., Goodman, S. J., Buechler, D. E., Blakeslee, R. J., & Christian, H. J. (2016). Where are the lightning hotspots on earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00193.1>
- Aranguren, D., Inampué, J., López, J., Tibaduiza, A., Casas, F., Torres, H., & Betz, H. (2013). Colombian Total Lightning Detection Network and early detection of failure risks for power systems. *Simposio Internacional Sobre Calidad de La Energía Eléctrica (VII SICEL)*, 1–6.
- Aranguren, D., López, J., Inampué, J., Torres, H., & Betz, H. (2017). Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.08.010>
- Aranguren, D., López, J., Inampué, J., Torres, H., & Betz, H. D. (2014). Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography. *2014 International Conference on Lightning Protection, ICLP 2014*. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2014.6973430>
- Ardila Murillo, B. S., Soto Ríos, E. A., & Velandia López, K. A. (2022). Actividad de rayos en el departamento de Santander entre 2014 y 2016. *Ingeniería*. <https://doi.org/10.14483/23448393.17585>

- Baba, Y. (2010). Review of recent researches related to lightning to tall structures. In *IEEE Transactions on Power and Energy* (Vol. 130, Issue 8).
<https://doi.org/10.1541/ieejpes.130.769>
- Behnke, S. A., Thomas, R. J., Krehbiel, P. R., & Rison, W. (2005). Initial leader velocities during intracloud lightning: Possible evidence for a runaway breakdown effect. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*. <https://doi.org/10.1029/2004JD005312>
- Berger, K. (1967). Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore. *Journal of the Franklin Institute*. [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(67\)90598-4](https://doi.org/10.1016/0016-0032(67)90598-4)
- BERGER K. (1971). Lightning research and the protection of persons, (Blitzforschung und Personen- Blitzschutz). *Elektrotech Z Ausg A*.
- Betz, H. D., Schmidt, K., Laroche, P., Blanchet, P., Oettinger, W. P., Defer, E., Dziewit, Z., & Konarski, J. (2009). LINET-An international lightning detection network in Europe. *Atmospheric Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.06.012>
- Betz, H. D., Schmidt, K., Oettinger, P., & Wirz, M. (2004). Lightning detection with 3-D discrimination of intracloud and cloud-to-ground discharges. *Geophysical Research Letters*.
<https://doi.org/10.1029/2004GL019821>
- Betz, H., Schmidt, K., Fuchs, B., Oettinger, W., & Höller, H. (2007). Cloud Lightning: Detection and Utilization for Total Lightning Measured in the VLF/LF Regime. *Journal of Lightning Research*.
- Bourscheidt, V., Pinto, O., Naccarato, K. P., & Pinto, I. R. C. A. (2009). The influence of topography on the cloud-to-ground lightning density in South Brazil. *Atmospheric Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.06.010>

- Caicedo, J. A., Uman, M. A., & Pilkey, J. T. (2018). Lightning Evolution In Two North Central Florida Summer Multicell Storms and Three Winter/Spring Frontal Storms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. <https://doi.org/10.1002/2017JD026536>
- Candela Garolera, A., Cummins, K. L., Madsen, S. F., Holboell, J., & Myers, J. D. (2015). Multiple Lightning Discharges in Wind Turbines Associated with Nearby Cloud-to-Ground Lightning. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2391013>
- Carlos Alberto Cruz Mosquera. (2015). *Evaluacion del Riesgo por Rayos Incluyendo un Sistema de Alarma de Tormentas (SAT) en Colombia*.
- Christian, H. J., Blakeslee, R. J., Boccippio, D. J., Boeck, W. L., Buechler, D. E., Driscoll, K. T., Goodman, S. J., Hall, J. M., Koshak, W. J., Mach, D. M., & Stewart, M. F. (2003). Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*. <https://doi.org/10.1029/2002jd002347>
- CIGRE WG01 SC33. (1991). Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. In *CIGRE Report 63* (Vol. 01, Issue October).
- Cruz Mosquera, C. A. (2015). *Evaluación del riesgo por rayos incluyendo un Sistema de Alarma de Tormentas (SAT) en Colombia*. 248. <http://www.bdigital.unal.edu.co/52646/>
- Cummins, K. L., Murphy, M. J., Bardo, E. A., Hiscox, W. L., Pyle, R. B., & Pifer, A. E. (1998). A combined TOA/MDF technology upgrade of the US National Lightning Detection Network. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. <https://doi.org/10.1029/98JD00153>
- Diendorfer, G., & Schultz, W. (1998). Lightning incidence to elevated objects on mountains. *Proc. 24th Int. Conf. on Lightning Protection*.

- Eriksson, A. J. (1978). LIGHTNING AND TALL STRUCTURES. *Trans S Afr Inst Electr Eng*, 69(pt 8). <https://doi.org/10.1049/piee.1978.0084>
- Eriksson, A. J. (1987). The incidence of lightning strikes to power lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2(3). <https://doi.org/10.1109/TPWRD.1987.4308191>
- Fernando, D., & Trujillo, D. R. (2018). *Evaluación del efecto urbano sobre los parámetros del rayo. Caso Colombiano*. 114. <http://bdigital.unal.edu.co/63551/1/93061400.2018.pdf>
- Ferrando Miguel; Valero Alejandro. (2005). Parámetros de Antenas. *Universidad Politécnica Valencia*.
- Fuchs, B. R., & Rutledge, S. A. (2018). Investigation of Lightning Flash Locations in Isolated Convection Using LMA Observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. <https://doi.org/10.1002/2017JD027569>
- Golde, R. H. (1945). The Frequency of Occurrence and the Distribution of Lightning Flashes to Transmission Lines. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 64(12). <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1945.5059060>
- Golde, R. H. (1967). The lightning conductor. *Journal of the Franklin Institute*, 283(6). [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(67\)90597-2](https://doi.org/10.1016/0016-0032(67)90597-2)
- Guimarães, M., Araujo, L., Pereira, C., Mesquita, C., & Visacro, S. (2014). Assessing currents of upward lightning measured in tropical regions. *Atmospheric Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.01.005>
- He, J., Rakov, V., Wang, D., & Wang, P. K. (2013). Lightning physics and effects. In *Atmospheric Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.05.005>

- Herrera, J., Younes, C., & Porras, L. (2018). Cloud-to-ground lightning activity in Colombia: A 14-year study using lightning location system data. *Atmospheric Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.12.009>
- Höller, H., Betz, H. D., Schmidt, K., Calheiros, R. V., May, P., Houngrinou, E., & Scialom, G. (2009). Lightning characteristics observed by a VLF/LF lightning detection network (LINET) in Brazil, Australia, Africa and Germany. *Atmospheric Chemistry and Physics*. <https://doi.org/10.5194/acp-9-7795-2009>
- Inampué, J., Aranguren, D., Torres, H., Montanya, J., Santoyo, I., Olarte, E., & Younes, C. (2009). Analysis of Lightning Forecasts in Colombia Based on the Lightning Detection Network Data. *Proceedings of the X International Symposium on Lightning Protection (SIPDA-2009)*.
- Kasemir, H. W. (1960). A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge. *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1029/jz065i007p01873>
- Keraunos S.A.S. (2015). *Red Colombiana de detección total de rayos - LINET*.
- Krehbiel, P. R., Thomas, R. J., Rison, W., Hamlin, T., Harlin, J., & Davis, M. (2000). GPS-based mapping system reveals lightning inside storms. *Eos*. <https://doi.org/10.1029/00EO00014>
- Lightning: Principles, Instruments and Applications. (2009). In *Lightning: Principles, Instruments and Applications*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9079-0>
- López, J. A., Montanyà, J., van der Velde, O. A., Pineda, N., Salvador, A., Romero, D., Aranguren, D., & Taborda, J. (2019). Charge Structure of Two Tropical Thunderstorms in Colombia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. <https://doi.org/10.1029/2018JD029188>
- López, J. A., Montanyà, J., van der Velde, O., Romero, D., Aranguren, D., Torres, H., Taborda, J., & Martinez, J. (2016). First data of the Colombia lightning mapping array - COLMA. *2016*

33rd International Conference on Lightning Protection, ICLP 2016.

<https://doi.org/10.1109/ICLP.2016.7791436>

MacGorman, D., Biggerstaff, M., Waugh, S., Pilkey, J., Uman, M., Jordan, D., Ngin, T., Gamerota, W., Carrie, G., & Hyland, P. (2014). Coordinated LMA, balloon-borne electric field, and polarimetric radar observations of a triggered lightning flash at camp blanding. *International Conference on Atmospheric Electricity, ICAE 2014.*

Machado, L. A. T., Silva Dias, M. A. F., Morales, C., Fisch, G., Vila, D., Albrecht, R., Goodman, S. J., Calheiros, A. J. P., Biscaro, T., Kummerow, C., Cohen, J., Fitzjarrald, D., Nascimento, E. L., Sakamoto, M. S., Cunningham, C., Chaboureau, J. P., Petersen, W. A., Adams, D. K., Baldini, L., ... Tokay, A. (2014). The CHUVA project: How does convection vary across Brazil? *Bulletin of the American Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00084.1>

Marshall, T. C., Stolzenburg, M., Maggio, C. R., Coleman, L. M., Krehbiel, P. R., Hamlin, T., Thomas, R. J., & Rison, W. (2005). Observed electric fields associated with lightning initiation. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/2004GL021802>

Mazur, V. (1989). Triggered lightning strikes to aircraft and natural intracloud discharges. *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1029/jd094id03p03311>

Mazur, V. (2002). Physical processes during development of lightning flashes. In *Comptes Rendus Physique*. [https://doi.org/10.1016/S1631-0705\(02\)01412-3](https://doi.org/10.1016/S1631-0705(02)01412-3)

Mazur, V., & Ruhnke, L. H. (1993). Common physical processes in natural and artificially triggered lightning. *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1029/93jd00626>

- Mazur, V., & Ruhnke, L. H. (2011). Physical processes during development of upward leaders from tall structures. *Journal of Electrostatics*. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2011.01.003>
- McCann, G. D. (1944). The Measurement of Lightning Currents in Direct Strokes. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 63(12). <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1944.5058859>
- Mejía, A. (2005). Características de las descargas atmosféricas y su efecto sobre las líneas de transmisión. *Boletín Tecnico Gamma*, 4(67).
- Michishita, K., Ishii, M., Asakawa, A., Yokoyama, S., & Kami, K. (2003). Voltage induced on a test distribution line by negative winter lightning strokes to a tall structure. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 45(1). <https://doi.org/10.1109/TEM.2002.808044>
- Montanyà, J., Fabró, F., van der Velde, O., March, V., Williams, E. R., Pineda, N., Romero, D., Solà, G., & Freijo, M. (2016). Global Distribution of Winter Lightning: a threat to wind turbines and aircraft. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*. <https://doi.org/10.5194/nhess-2015-302>
- Montanyà, J., van der Velde, O., Domingo-Dalmau, A., Pineda, N., Argemí, O., & Salvador, A. (2016). Lightning mapping observations of downward lightning flashes to wind turbines. *2016 33rd International Conference on Lightning Protection, ICLP 2016*. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2016.7791449>
- Montanyà, J., van der Velde, O., & Williams, E. R. (2014). Lightning discharges produced by wind turbines. *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1002/2013JD020225>
- Mostajabi, A., Pineda, N., Romero, D., Azadifar, M., van der Velde, O., Montanya, J., Rubinstein, M., & Rachidi, F. (2018). LMA observation of upward flashes at Sântis Tower: Preliminary

- results. *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC/APEMC 2018*. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2018.8393808>
- Oliver, J. (2013). Identificación y análisis de los sitios con mayor actividad de rayos en el departamento de santander. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Pineda, N., Montanyà, J., Salvador, A., van der Velde, O. A., & López, J. A. (2018). Thunderstorm characteristics favouring downward and upward lightning to wind turbines. *Atmospheric Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.07.012>
- Pinto, O., Pinto, I. R. C. A., Gomes, M. A. S. S., Vitorello, I., Padilha, A. L., Diniz, J. H., Carvalho, A. M., & Cazetta Filho, A. (1999). Cloud-to-ground lightning in southeastern Brazil in 1993 1. Geographical distribution. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 104(D24). <https://doi.org/10.1029/1999JD900800>
- Pulgarín-Rivera, J. D., Younes, C., & Vargas, M. (2014). Evaluation of a first return stroke model considering the lightning channel tortuosity. *Electric Power Systems Research*. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.02.029>
- Rachidi, F., Janischewskyj, W., Hussein, A. M., Nucci, C. A., Guerrieri, S., Kordi, B., & Chang, J. S. (2001). Current and electromagnetic field associated with lightning-return strokes to tall towers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 43(3). <https://doi.org/10.1109/15.942607>
- Rachidi, F., Rubinstein, M., Montanyà, J., Bermúdez, J. L., Sola, R. R., Solà, G., & Korovkin, N. (2008). A review of current issues in lightning protection of new-generation wind-turbine

- blades. In *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2007.896443>
- Rakov, V. A., & Uman, M. A. (2003). *Lightning: Physics and Effects* - Vladimir A. Rakov, Martin A. Uman - Google Books. Cambridge. <https://doi.org/ISBN: 9780521035415>
- Reap, R. M. (1986). Evaluation of cloud-to-ground lightning data from the western United States for the 1983-84 summer seasons. *Journal of Climate & Applied Meteorology*, 25(6).
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1986\)025<0785:EOCTGL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025<0785:EOCTGL>2.0.CO;2)
- Rison, W., Thomas, R. J., Krehbiel, P. R., Hamlin, T., & Harlin, J. (1999a). A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/1999GL010856>
- Rison, W., Thomas, R. J., Krehbiel, P. R., Hamlin, T., & Harlin, J. (1999b). A GPS-based three-dimensional lightning mapping system: Initial observations in central New Mexico. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1029/1999GL010856>
- Rizk, F. A. M. (1994a). Modeling of Lightning Incidence to Tall Structures Part I: Theory. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(1). <https://doi.org/10.1109/61.277673>
- Rizk, F. A. M. (1994b). Modeling of Lightning Incidence to Tall Structures Part II: Application. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(1). <https://doi.org/10.1109/61.277690>
- Rust, W. D., & MacGorman, D. R. (2002). Possibly inverted-polarity electrical structures in thunderstorms during STEPS. *Geophysical Research Letters*.
<https://doi.org/10.1029/2001GL014303>

- Schulz, W., & Diendorfer, G. (1999). Lightning characteristics as a function of altitude evaluated from lightning location network data. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/1999-01-2310>
- Smorgonskiy, A., Rachidi, F., Rubinstein, M., & Diendorfer, G. (2013). On the relation between lightning flash density and terrain elevation. *2013 International Symposium on Lightning Protection, SIPDA 2013*. <https://doi.org/10.1109/SIPDA.2013.6729216>
- Soula, S., Kasereka, J. K., Georgis, J. F., & Barthe, C. (2016). Lightning climatology in the Congo Basin. *Atmospheric Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.04.006>
- Takahashi, T. (1978). Electrical Properties of Oceanic Tropical Clouds at Ponape, Micronesia. *Monthly Weather Review*. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1978\)106<1598:epootc>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1978)106<1598:epootc>2.0.co;2)
- Thomas, R. J., Krehbiel, P. R., Rison, W., Hunyady, S. J., Winn, W. P., Hamlin, T., & Harlin, J. (2004). Accuracy of the lightning mapping array. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*. <https://doi.org/10.1029/2004JD004549>
- Torres, H. (2010). ¿QUÉ RAYOS SABEMOS? *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*.
- Torres, H., & Castaño, O. (1991). Las series de tiempo en la investigación espacio-temporal sobre descargas eléctricas atmosféricas en Colombia. *Revista Colombiana de Estadística*.
- Torres, H., Perez, E., Younes, C., Aranguren, D., Montaña, J., & Herrera, J. (2015). Contribution to Lightning Parameters Study Based on Some American Tropical Regions Observations. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2428217>

- Torres, H., Perez, E., Younes, C., Aranguren, D., Montana, J., & Herrera, J. (2015). Review of Ground Flash Density and Keraunic Levels Reported in Tropical Regions. *Asia-Pacific International Conference on Lightning APL 2015*.
- Torres Sánchez, H. (2002). El Rayo: Mitos, Leyendas, Ciencia y Tecnología. In *Universidad Nacional de Colombia*.
- Torres-Sánchez, H. (2017). La interdisciplinariedad en la ciencia del rayo. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.475>
- Uman, M. A. (2008). The art and science of lightning protection. In *The Art and Science of Lightning Protection*. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511585890>
- van der Velde, O. A., & Montanyà, J. (2013). Asymmetries in bidirectional leader development of lightning flashes. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. <https://doi.org/10.1002/2013JD020257>
- Visacro, S., Mesquita, C. R., de Conti, A., & Silveira, F. H. (2012). Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo Station. *Atmospheric Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.07.010>
- Visacro, S., Soares, A., Schroeder, M. A. O., Cherchiglia, L. C. L., & de Sousa, V. J. (2004). Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo station. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. <https://doi.org/10.1029/2003jd003662>
- Wang, C. P. (1963). Lightning discharges in the tropics: 1. Whole discharges. *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1029/jz068i007p01943>

- Wiens, K. C., Rutledge, S. A., & Tessendorf, S. A. (2005). The 29 June 2000 supercell observed during STEPS. Part II: Lightning and charge structure. *Journal of the Atmospheric Sciences*.
<https://doi.org/10.1175/JAS3615.1>
- Williams, E. R. (1989). The tripole structure of thunderstorms. *Journal of Geophysical Research*.
<https://doi.org/10.1029/jd094id11p13151>
- Williams, E. R. (2001). The Electrification of Severe Storms. *Meteorological Monographs*.
<https://doi.org/10.1175/0065-9401-28.50.527>
- Williams, E. R. (2006). Problems in lightning physics - The role of polarity asymmetry. *Plasma Sources Science and Technology*. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/15/2/S12>
- Zhang, G. S., Wang, Y. H., Qie, X. S., Zhang, T., Zhao, Y. X., Li, Y. J., & Cao, D. J. (2010). Using lightning locating system based on time-of-arrival technique to study three-dimensional lightning discharge processes. *Science China Earth Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s11430-009-0116-x>
- Zhu, Y., Rakov, V. A., Mallick, S., & Tran, M. D. (2015). Characterization of negative cloud-to-ground lightning in Florida. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.08.006>