

Incidencia de rayos en estructuras elevadas (comparación del método de Eriksson, la normativa y las redes localizadores)

John Freddy Valderrama Vásquez y Juan José Vega Pallares

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Electricista

Director

Brandon Steven Ardila Murillo

Ingeniero Electricista

Codirector

Edison Andrés Soto Ríos

Ingeniero Electricista PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones

Ingeniería eléctrica

Bucaramanga

2023

Agradecimientos

Se desea expresar agradecimientos a la empresa Keraunos por su colaboración en el suministro de datos de la Red Colombiana de Detección Total de Rayos (LINET). Estos datos fueron fundamentales para llevar a cabo los análisis de impactos de rayo en estructuras elevadas.

Se desea expresar los agradecimientos más sinceros al Ing. Brandon Steven Ardila Murillo, quien se desempeñó como director de este proyecto de grado por su invaluable orientación, dedicación y apoyo durante cada etapa de este proyecto. Su constante disposición para discutir ideas, revisar nuestros avances y su inspiradora motivación enriquecieron este trabajo. Sinceramente se agradece su mentoría y su ejemplo por el impacto perdurable que ha tenido en nuestra vida tanto académica como profesional.

Se desea agradecer al Dr. Edison Andrés Soto Ríos, quien nos ha orientado e impartido conocimientos fundamentales que resultaron vitales para nuestro trabajo en este proyecto de grado. Su dedicación y habilidades pedagógicas nos han proporcionado una base sólida sobre la cual construir nuestras investigaciones.

Se desea expresar un profundo agradecimiento a las madres, Candelaria Vásquez Ariza y Sandra Milena Pallares León, así como al padre, Billy Jhaider Vega Márquez, por su amor, apoyo y constante aliento durante todo el proyecto de grado. Su inquebrantable respaldo y sacrificio han permitido alcanzar este importante logro académico. Se está eternamente agradecido por su presencia incondicional en nuestras vidas. Gracias por ser pilares de fuerza e inspiración para seguir adelante.

Tabla de Contenido

Introducción	9
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
2. Antecedentes	13
3. Marco teórico	17
3.1 Proceso de la descarga atmosférica	17
3.2 Funcionamiento de la red LINET	19
3.3 Incidencia de rayos en estructuras elevadas	21
3.4 Daños a las estructuras elevadas	23
3.5 Análisis de riesgo	24
3.6 Protección contra rayos de estructuras elevadas (EE)	24
3.7 Necesidad de protección	26
4. Metodología	28
4.1 Zona de estudio	28
4.2 Datos	29
4.3 Ubicación de estructuras elevadas y radio de influencia	30
4.4 Determinación del número de impactos con la red LINET	31
4.5 Determinación de la DDT	31
4.6 Determinación del número de impactos según la normativa	32
4.6.1 Norma IEC-62305-2 y la NTC-4552-2	32

4.6.2	Fórmula de Eriksson	33
4.7	Construcción del modelo	34
5.	Resultados.....	34
5.1	Caracterización de impactos de rayo en EE.....	34
5.2	Variación espacial de impactos de rayo en EE	40
6.	Conclusiones	49
7.	Recomendaciones	51
	Referencias Bibliográficas	52

Lista de Tablas

Tabla 1. Sensores de la red Linet	19
Tabla 2. Coeficientes estadísticos de la regresión	48

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema del manejo de la información de la toma de datos suministrados por la Red LINET	20
Figura 2. Área colectiva equivalente de una estructura elevada	22
Figura 3. Zona de estudio del trabajo de investigación	28
Figura 4. Sensores de la red de localización de rayos LINET	29
Figura 5. Radio de influencia y ubicación de las estructuras elevadas	30
Figura 6. Cuadrícula para determinar la DDT	31
Figura 7. Distribución mensual de flashes en estructuras elevadas	35
Figura 8. Distribución horaria de flashes en estructuras elevadas	36
Figura 9. Polaridad de la corriente de flashes en estructuras elevadas	37
Figura 10. Variación mensual de la polaridad de la corriente del rayo	38
Figura 11. Multiplicidad de flashes en estructuras elevadas.....	39
Figura 12. Histograma de corriente de descarga de retorno de flashes en estructuras elevadas...	40
Figura 13. Mapa de cantidad de impactos en estructuras elevadas.....	41
Figura 14. Comparación de número de impactos de rayo en edificaciones.....	44
Figura 15. Comparación del número de impactos en estructuras de telecomunicaciones.....	45
Figura 16. Comparación del número de impactos en estructuras de transmisión.....	46

Resumen

Título: Incidencia de rayos en estructuras elevadas (comparación del método de Eriksson, la normativa y las redes localizadores)*

Autor: John Freddy Valderrama Vásquez y Juan José Vega Pallares¹

Palabras Clave: Densidad de Descargas a Tierra (DDT), Descargas atmosféricas, estructuras elevadas (EE), Nivel Cerámico (NC), Sistema Integral de Protección contra Rayos (SIPRA)

Descripción: El presente trabajo de investigación estudia la variación del número de descargas atmosféricas en estructuras elevadas (EE) utilizando redes de localización de rayos en comparación con el calculado mediante el método de Erickson y la normativa vigente. Asimismo, se modela el número de rayos en EE en función de su altura y de su Densidad de Descargas a Tierra (DDT). El área de estudio comprende municipios como Bucaramanga, Floridablanca, Barrancabermeja, Yondó y sus alrededores. La metodología comienza con la selección de más de 607 EE, divididas en torres de transmisión, torres de telecomunicaciones y edificios. Con base en los datos proporcionados por la red LINET se determina el número de rayos que impactan en un radio de 150 metros por cada EE. Posteriormente, se calcula el número de rayos en EE utilizando la fórmula de Erickson y las expresiones previstas en la NTC 4552 y la IEC 62305.

La determinación de la DDT se realizó utilizando datos de la red LINET y las expresiones indicadas en la normativa antes mencionada. Se encontró que al implementar la fórmula de Erickson y las expresiones de la NTC-4552 y la IEC 62305 se puede subestimar el número de impactos de rayos en estructuras altas, especialmente en zonas tropicales. Esto podría conducir a un cálculo incorrecto de los componentes de riesgo y, en consecuencia, a un subdimensionamiento de los Sistemas Integrales de Protección contra Rayos (SIPRA).

* Trabajo de grado

¹Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Brandon Steven Ardila Murillo. Ingeniero Electricista. Codirector: Edison Andrés Soto Ríos. PhD en Ingeniería Eléctrica.

Abstract

Title: Incidence of lightning on elevated structures (comparison of the Eriksson method, regulations, and locating networks)*

Author(s): John Freddy Valderrama Vásquez and Juan José Vega Pallares²

Key Words: Ground Flash Density (GFD), Lightning Flashes, Elevated Structures (ES), Ceraunic level (TD), Lightning Protection Systems (LPS)

Description: The present research studies the variation of the number of lightning flashes in elevated structures (ES) using lightning location networks compared with the one calculated using the Erickson method and current regulations. Likewise, the number of lightning flashes in ES is modeled as a function of their height and the Ground Flash Density (GFD). The study area includes municipalities such as Bucaramanga, Floridablanca, Barrancabermeja, Yondó, and its surroundings. Our methodology begins with selecting more than 607 ES, divided into transmission towers, telecommunications towers, and buildings. Based on the data provided by the LINET network, the number of flashes that impact a radius of 150 meters for each EE is determined. Subsequently, the number of lightning strikes in EE is calculated using Erickson's formula and the expressions provided in NTC 4552 and IEC 62305.

The determination of the GFD was carried out using data from the LINET network and the expressions indicated in the regulations mentioned above. It was found that implementing the Erickson formula and the expressions of NTC-4552 and IEC 62305 can underestimate the number of lightning strikes in tall structures, especially in tropical areas. This could lead to an incorrect calculation of the risk components and, consequently, an under-sizing of the lightning protection systems (LPS).

* Degree Work

²Faculty of Physicomechanical. School of Electrical, Electronic, and Telecommunications. Engineering. Director: Brandon Steven Ardila Murillo. Electrical Engineer. Codirector: Edison Andrés Soto Ríos. PhD in Electrical Engineering.

Introducción

Las descargas eléctricas atmosféricas son objeto de numerosos estudios que describen su mecanismo, física y métodos de protección. Pese a que en su mayoría puedan ser percibidas, no se tiene ni se tendrá control sobre ellas ya que corresponden a un fenómeno físico de naturaleza aleatoria (Drabkin, Mui, & Mun, 2012).

El cambio climático abrupto tiene gran incidencia en la actividad de rayos de una región (Torres, 2002). Así mismo, se ha mostrado que en zonas tropicales hay una mayor actividad de rayos ya que existe una dependencia espacial de los parámetros del rayo como se ha señalado en el trabajo de Montana y Silva (2013), por tanto, hay importantes variaciones en la Densidad de Descargas a Tierra (DDT), la corriente de descarga de retorno, la multiplicidad, entre otros (Torres-Sánchez, 2017). En el caso de Colombia, debido a su relieve y a que el país se encuentra en la zona de convergencia intertropical, se registra una alta actividad de rayos especialmente en el Catatumbo, el Magdalena medio y el valle del río Cauca (Torres, 2002).

Estudios realizados han caracterizado al país como un lugar con alta actividad de rayos, alcanzando DDT de hasta 60 rayos/km²/año o incluso más (Torres, Perez, Younes, Aranguren, Montana & Herrera, 2015). La frecuencia de rayos en el mundo ha sido objeto de estudio durante muchas décadas, de esta manera, los puntos geográficos que cuentan con muy alta frecuencia de rayos se denominan como hotspots. El principal hotspot del mundo se encuentra en el Lago Maracaibo en Venezuela, sin embargo, 7 de los 10 hotspots de Sudamérica están ubicados en Colombia debido, probablemente, al efecto adicional de las complejas cadenas montañosas (D. Aranguren et al., 2017), lo que resalta la importancia de tener un método preciso para el cálculo de las densidades de descargas (DDT) a tierra en zonas de alta actividad como Colombia.

Los rayos son un problema importante para las estructuras elevadas (EE) como las torres de telecomunicaciones, líneas de transmisión, turbinas eólicas, edificaciones y otros objetos de gran altura (Abdul Rahim, Izadi, Ab Kadir, Rameli, & Nizam, 2014). Lo anterior dado que su impacto ya sea de forma directa o indirecta, puede causar daños considerables tanto en la estructura en sí como de los equipos alojados dentro de la misma. La protección contra rayos de EE es un tema importante debido a la posibilidad de impactos directos debido a su ubicación y altura, entendiendo que una EE es más propensa a ser impactada por rayos en comparación con sus alrededores (Montanyà, van der Velde, & Williams, 2014), llegando a ser considerada un foco o hotspot para impactos de rayo. No obstante, si no se tiene un adecuado diseño de apantallamiento, un impacto de rayo directo o indirecto podría dañar la estructura ya que la corriente de la descarga no se propagará a tierra de forma segura y los campos electromagnéticos no se atenuarán (Torres, 2002). Los rayos, por otra parte, son una de las principales causas de fallas en las líneas de transmisión aéreas, por lo que se usan uno o dos cables de guarda que suelen proteger los conductores de fase de impactos directos (Torres-Sánchez, 2017). Más del 95% de las fallas en líneas de transmisión son causadas por rayos, estos coinciden en tiempo y ubicación con impactos nube tierra muy cercanos (indirectos) (Montana & Silva, 2013). La cantidad de impactos directos también se usa para evaluar el desempeño ante rayos de una línea aérea, el cual se determina mediante el número de descargas disruptivas por cada 100 kilómetros al año conocido como la tasa de fallas por flameo inverso (BFR).

Para poder proteger una edificación o estructura elevada (EE) es necesario conocer parámetros científicamente basados en el estudio sistemático de la física del rayo. En Colombia, gracias a la presencia de valles extensos y las 3 cordilleras se presentan fenómenos en los cuales estas cadenas montañosas de gran altura actúan como barreras naturales ante los vientos

provocando que estos asciendan, lo que propicia el escenario correcto para la conformación de tormentas eléctricas (Torres, 2002). Las estaciones climáticas en Colombia se caracterizan por tener un comportamiento bimodal a lo largo del año siendo abril y octubre los meses donde se presentan mayores precipitaciones y temperaturas, hecho que coincide con la zona de convergencia intertropical, lugar donde se encuentran los vientos alisios del sureste con los del noreste (Ardila Murillo, Soto Ríos, & Velandia López, 2022), (Torres, 2002).

La protección de estructuras elevadas (EE) son construidas alrededor de un parámetro fundamental el cual es la Densidad de Descargas a Tierra (DDT) y con base en las expresiones presentadas en la normativa NTC 4552. Con la DDT se calculan datos como el nivel de riesgo y los indicadores de exposición ante descargas atmosféricas, parámetros que permiten dimensionar la robustez de un sistema de protección contra rayos (Ardila Murillo et al., 2022; NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 4552-1, 4552-2, 4552-3, 2008).

Los métodos tradicionales usados para el diseño de sistemas de protección contra rayos se basan en parámetros de poca exactitud como el nivel cerámico (NC), lo que desencadena el subdimensionamiento de dichos sistemas. Un mal cálculo de los parámetros para los sistemas contra rayos puede hacer que las estructuras elevadas (EE) sean vulnerables a la principal fuente de daño de las descargas atmosféricas: la corriente del rayo. Esto puede resultar en diversos tipos de daños, los cuales varían según el tipo de estructura que se pretenda proteger y abarcan fallas en sistemas eléctricos o electrónicos, daños físicos, lesiones a seres vivos y pérdidas de la vida misma (NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 4552-1, 4552-2, 4552-3, 2008).

En este trabajo se realiza una comparación entre el número de descargas de rayo en estructuras elevadas (EE), calculado mediante métodos tradicionales previamente mencionados, y el número determinado por redes de localización (red LINET). El objetivo principal es desarrollar

un modelo que pueda predecir la cantidad de impactos de rayo en EE en función de dos variables clave: la DDT y la altura de la estructura, el cual se ajuste a la realidad de las descargas a tierra en zonas tropicales, evitando así que se subdimensionen los sistemas de protecciones contra rayos y a su vez disminuir el índice de fallas producidas por rayos en líneas de transmisión del sistema interconectado nacional.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Estudiar la variación del número de impactos de rayo en estructuras elevadas usando redes de detección de rayos y fórmulas convencionales como el método de Erickson y la planteada en la NTC 4552.

1.2 Objetivos específicos

Determinar del número de impactos directos de rayo en estructuras elevadas de acuerdo con la red LINET.

Encontrar el número de impactos directos de rayo en estructuras elevadas de acuerdo con los métodos tradicionales (NTC 4552 y método de Erickson) y modelarlo a través de una expresión dependiente de la altura y de la DDT.

Comparar resultados obtenidos usando redes de detección de rayos como la red LINET con los calculados mediante las fórmulas de Erickson y de la NTC 4552.

2. Antecedentes

Al pasar de los años, alrededor del mundo han surgido diversos estudios relacionados con las descargas atmosféricas, puesto que es uno de los fenómenos naturales que el hombre aún no ha podido controlar y por ende cuenta con una amplia investigación a lo largo de la historia siendo uno de los fines evitar daños a estructuras, pérdidas económicas, afectaciones a los sistemas eléctricos y electrónicos. Las estructuras elevadas ya sean edificaciones, torres de transmisión de energía eléctrica o torres de comunicación tienen un comportamiento que la diferencia de las otras estructuras de menor altura, se trata de que al estar por encima de las otras edificaciones tienen una mayor probabilidad de generar líderes ascendentes (parten de la estructura) los cuales se conecten con los líderes descendentes provenientes de las nubes y esto propicia el escenario perfecto para que entre los dos líderes se dé el proceso de enlace y se produzca la descarga de retorno, el proceso más energético del rayo y donde se registra la corriente pico de este proceso (Drabkin et al., 2012; Eriksson, 1978; Rahimian & Hussein, 2012; Rizk, 1994).

Un estudio realizado por A. J. Ericsson encontró una clara diferencia cuando las estructuras exceden los 100 m y propuso una fórmula que relaciona el número de descargas al año sobre las estructuras a cierta DDT (N_s) con la altura de las edificaciones $H(m)$ (Eriksson, 1978, 1987).

Títulos de Segundo Nivel

$$N_s = 2.4 \cdot 10^{-5} \cdot H^{2.05} \quad (1)$$

En el mismo estudio Erickson propuso una expresión matemática para hallar la proporción de rayos generados en estructuras elevadas debido a líderes ascendentes en relación con la altura $H(m)$ en porcentaje. Esta expresión es sólo válida en estructuras mayores a 78 m (Eriksson, 1987).

$$Pu = 52 - 8 \cdot \ln H - 230 \quad (2)$$

Así mismo se definió el número de rayos generados en estructuras elevadas que superan los 100 m debido a líderes descendentes. Lo que indica las descargas generadas por líderes descendentes es bastante representativa (Erickson, 1978, 1987).

$$Nd = 2.4 \cdot 10^{-5} \cdot H^{2.05} - 3.0 \cdot 10^{-9} \cdot H^{3.56} \quad (3)$$

Las líneas de transmisión de energía eléctrica tienen alturas entre los 27 y los 133 metros, para dichas estructuras se propuso una adaptación a la anterior ecuación incluyendo conceptos de distancia crítica y radio efectivo (Drabkin et al., 2012; Eriksson, 1978, 1987).

$$N = Ng \cdot (b + 28 \cdot H^{0.6}) \cdot 10^{-1} \quad (4)$$

En investigaciones realizadas en el observatorio de descargas atmosféricas en Gainesville (LOG), Florida, se han analizado parámetros esenciales para la caracterización de descargas atmosféricas tales como el porcentaje de rayos con una multiplicidad unitaria y la media aritmética de la multiplicidad del rayo en el año de 1979. Estudios posteriores analizaron el intervalo entre descargas, momento de la primera descarga de retorno, descargas subsecuentes, tipos de tormenta, efectos de la distancia entre el punto de observación y origen del rayo y la magnitud de la corriente de la descarga de retorno, esto con una base de 220 descargas de rayo registradas en el 2013 (Zhu, Rakov, Mallick, & Tran, 2015).

Basados en los datos obtenidos por la red nacional de detección de rayos de nuevo México en el año 2000, investigaciones se llevaron a cabo para llevar a cabo un estudio acerca de la electrificación y precipitación en tormentas eléctricas severas (STEPS), su relación con la estructura de cargas en dicha nube, la altura en la que esta se encuentra y la polaridad de la descarga nube tierra. En los primeros minutos de la tormenta la estructura de la nube fue bipolar con carga positiva inferior, momentos en los cuales se produjeron la mayor parte de las descargas. En los últimos minutos de la tormenta la estructura cambió a una tripolar con carga positiva a nivel medio

(5-9 km) donde se originaron todas las descargas atmosféricas nube tierra de polaridad positiva. En este estudio se denota la importancia del comportamiento de los rayos nube tierra según la estructura de la nube y la frecuencia de descargas que acarrearán estos tipos de estructuras (Wiens, Rutledge, & Tessenroff, 2005).

Los resultados obtenidos por diversas investigaciones determinan que, de los 500 sitios de mayor actividad de rayos en el mundo, 67 de estos se encuentran ubicados en Sudamérica. Sin embargo, siete de los diez hotspots (Albrecht, Goodman, Buechler, Blakeslee & Chistian, 2016), en Suramérica se encuentran en Colombia. Debido a que el territorio se localiza en una zona tropical y con tres cordilleras que atraviesan la superficie del país favoreciendo la formación de tormentas eléctricas a altitudes entre 500 y 1500 MSL. No obstante, al contar con alrededor de 8 millones de descargas atmosféricas nube a tierra por año las regiones donde siempre se presentan mayor actividad de rayos son el valle central del río Magdalena, el Catatumbo y el valle del río Cauca (Ardila Murillo & Soto Ríos, 2022).

En el ámbito nacional, se cuenta con que el estudio de los parámetros de rayos en Colombia tuvo comienzo en el año 1974 con el primer mapa de nivel cerámico hecho por lo que hoy en día se conoce como el IDEAM. Con base en los promedios multianuales del año 1974 hasta 1988 en 1990 se presentó una actualización de este mapa. Con la instalación de la Red Colombiana de Medición y Localización de Descargas Eléctricas Atmosféricas RECMA entre 1997 y 2001 presentó en el año 2002 un mapa con mayor precisión de la DDT del país llevado a cabo por (Herrera, Younes & Porras, 2018), hasta que en el 2008 la NTC 4552 presentó valores actualizados de nivel cerámico y DDT más precisos partiendo de los datos tomados por la RECMA. En los años posteriores se fueron presentando más actualizaciones de la NTC hasta llegar a la vigente hoy

en día (Ardila Murillo et al., 2022; NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 4552-1, 2008; Torres, 2002).

El sistema colombiano de detección de rayos en 2011 presentó una nueva técnica de detección de rayos en VLF/LF (muy baja frecuencia o baja frecuencia) llamado LINET (Keraunos SAS, 2016). Dicho sistema de localización se basa en el método de tiempo de llegada (TOA) (Torres, 2002). No obstante, cuenta con un algoritmo con el fin de proporcionar tanto la posición horizontal (latitud y longitud) como la vertical de los rayos. Sin embargo, la red LINET es sensible a las señales VLF/LF de varios procesos que involucran descargas intra-nube (IG) y nube a tierra (CG) (Daniel Aranguren, López, Inampué, Torres, & Betz, 2014). Actualmente la red cuenta con 19 estaciones o antenas de campo magnético en VLF/LF, cubriendo más del 80% del territorio colombiano con precisiones que superan el 90%. Los sensores LINET se instalan en la topografía variable de Colombia. Es decir, altitudes entre 0 a 2800 MSL (Daniel Aranguren et al., 2014).

Los datos arrojados por estos dispositivos han sido de suma importancia ya que hoy en día se ha demostrado que la información acerca de las descargas atmosféricas en los países localizados en latitudes diferentes a las de Colombia no poseen las mismas características (Montana & Silva, 2013). Es necesario aumentar el número de antenas en Colombia para poder abarcar una mayor cobertura de detección del sistema y seguir analizando información de esta red ya que otros autores han obtenido resultados diferentes (Montana & Silva, 2013).

3. Marco teórico

3.1 Proceso de la descarga atmosférica

Para describir el proceso de formación de la descarga atmosférica es necesario aclarar Las descargas CG se inician por y en su mayoría son originadas por líderes descendentes negativos (90%), los cuales cuentan con electrones libres que superan la región de carga positiva inferior neutralizando la mayor parte de su pequeña carga positiva y luego continúa su viaje a tierra. A continuación, se describen las etapas de una descarga atmosférica.

- Encendido de la descarga: Los rayos se producen o inician debido a la colisión entre hidrometeoros (partículas de agua, líquidas o sólidas) cargados suspendidos en la atmósfera, lo cual causa el fortalecimiento del campo eléctrico que existe en la carga positiva situada debajo de la nube y la carga negativa de la base de la nube (March, 2018), lo cual hace que se inicien pequeños streamers corona (chispa). Se ha llegado a especular que los rayos inician a través de la emisión de corona positiva desde las partículas de precipitación (Torres, 2002).

- Líder escalonado: Debido a la acumulación de carga en los streamers corona se vence la tensión disruptiva del medio, lo que conlleva a la ionización del aire circundante formando un canal de plasmas altamente conductor con radio entre 0.01 y 0.5m que distribuye parte de la carga de la nube a lo largo de este camino y que se conoce como líder escalonado. Su propagación es de manera tortuosa es posible debido al intenso campo eléctrico en su extremo (Mayor a 2 MV/m). No obstante, no tiene un camino directo ya que debe ionizar el recorrido a su paso, por tanto, se propaga hacia abajo en segmentos luminosos discretos de 50 m de longitud aproximadamente conocidos como pasos (Torres, 2002).

- Proceso de enlace: Cuando el líder está cerca del suelo, su carga negativa induce una carga positiva concentrada en la tierra, por lo cual crea una respuesta (líder ascendente) desde la estructura elevada, lo que se conoce como proceso de enlace. Al producirse el contacto entre el líder ascendente y el líder descendente se determina el punto de impacto del rayo (Torres, 2002).
- Descarga de retorno: Corresponde a la fase más energética del rayo, en la cual, una vez establecido un camino conductor entre la nube y la tierra, una onda de campo eléctrico se desplaza por el canal del líder escalonado hacia la base de la nube y drena la carga alojada en el canal principal y sus ramificaciones, lo que produce un pico de corriente conocida como descarga de retorno. Durante esta fase, se generan cargas de 2 a 10 culombios y corrientes de hasta 30 kA en zonas templadas. Las corrientes que fluyen hacia el suelo disminuyen en aproximadamente 50 μ s y pueden perdurar durante varios cientos de milisegundos. (Torres, 2002).
- Líder dardo: Una vez se produce la descarga de retorno se forma un canal luminoso llamado líder dardo que se propaga de manera continua desde la nube hasta la tierra siguiendo el camino preionizado por el líder escalonado y transporta cargas de aproximadamente 1 C causando lo que se conoce como descargas subsecuentes. La velocidad de los líderes dardo varía, dependiendo del tiempo que el canal dejado por la descarga de retorno haya permanecido abierto, oscilando entre 4×10^8 cm/s y 1.9×10^8 cm/s. En casos donde el tiempo transcurrido desde la descarga de retorno es excepcionalmente largo, el líder dardo puede tener una trayectoria más tortuosa a medida que se acerca al suelo, lo que se conoce como líder dardo escalonado (Torres, 2002).

3.2 Funcionamiento de la red LINET

La red LINET es el sistema de localización de rayos con el que cuenta actualmente Colombia. Utilizando la técnica de tiempo de arribo (TOA), LINET es una red compuesta por más de 19 antenas (se encuentra en periodo de expansión) de campo magnético que ofrecen una cobertura mayor al 80% del territorio nacional colombiano. Estos sensores detectan las emisiones de campo a una frecuencia entre 300 kHz a 3MHz por debajo de la banda AM 1 km-100 m, relacionadas con eventos IC o CG (Keraunos SAS, 2016), los cuales cuentan con una eficiencia del 95% y están ubicados como se indica en la Tabla 1:

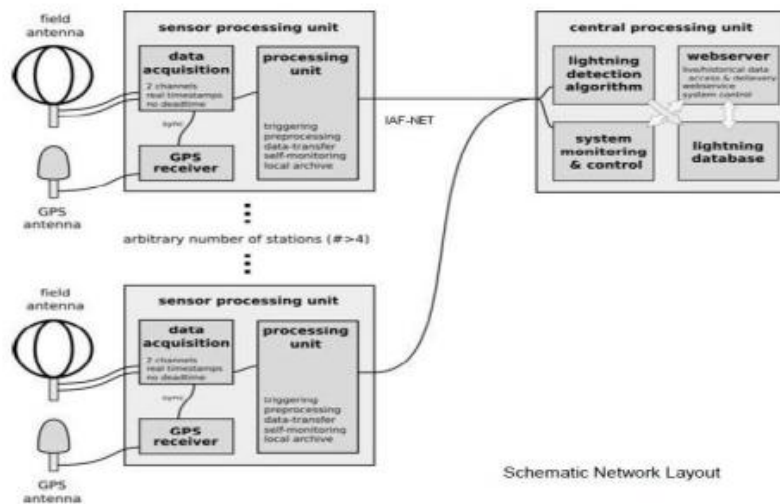
Tabla 1. Sensores de la red Linet

No.	Sensor	Distancia al sensor más cercano (km)
1	Montería	148
2	Medellín	195
3	Albania	169
4	Cúcuta	175
5	Barranca	155
6	Bogotá	126
7	Chigorodó	148
8	La jagua	169
9	Tunja	131
10	Ibagué	126
11	Palmira	127
12	Neiva	127
13	Puerto Triunfo	113
14	Arauca	195
15	Barranquilla	198

Nota. Sensores de la red Linet con su distancia al sensor más cercano. Tomada de: (Keraunos SAS, 2016).

Es importante mencionar que los sensores se encuentran ubicados de forma tal que el sensor más cercano se encuentra a una distancia menor a 200 km. La línea base promedio para el sistema es de 153 km (Keraunos SAS, 2016). Cada una de las antenas de campo magnético y GPS en cada estación se conectan a una unidad de procesamiento local, en donde la señal de campo medida por la antena es digitalizada y se ajustan los umbrales de medición que definen la sensibilidad de detección de las descargas atmosféricas, este proceso se evidencia en la Figura 1. Consecuentemente se realiza una transferencia de datos a una unidad de procesamiento central, con esto se realiza un autocontrol de las variables asociadas con el funcionamiento de la estación y por último se realiza el almacenamiento local de las formas de onda detectadas, asociadas a rayos IC y CG (Keraunos SAS, 2016).

Figura 1. Esquema del manejo de la información de la toma de datos suministrados por la Red LINET



Nota. El esquema representa el manejo de la información de la toma de datos suministrados por los sensores de la Red LINET, Colombia. Tomada de (Keraunos SAS, 2016).

Cuando se produce un rayo, ya sea de tipo IC (intra-nube) o CG (nube-tierra), cada estación registra la forma de onda del campo magnético y la marca de tiempo. Estos datos serán transferidos a la unidad central donde se utiliza un algoritmo de detección de rayos para identificar el tipo de descarga, determinar su ubicación, amplitud, polaridad y altura de emisión (si es una descarga IC), entre otros parámetros (Keraunos SAS, 2016).

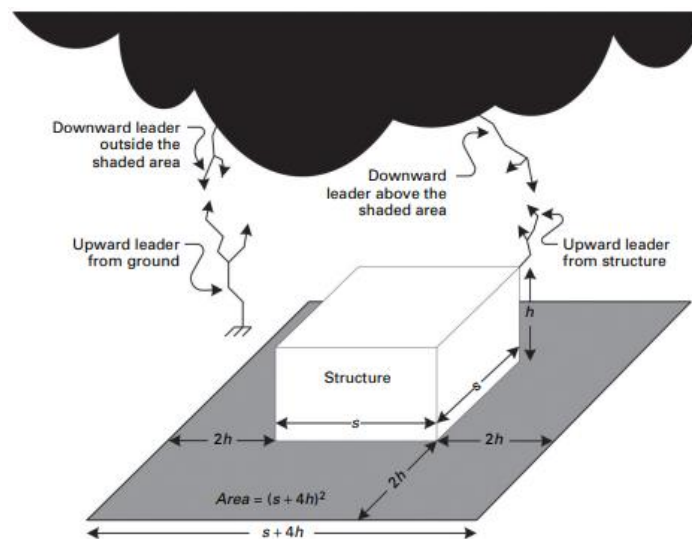
3.3 Incidencia de rayos en estructuras elevadas

Los rayos descendentes son los fenómenos que más afectan las estructuras elevadas con alturas menores a 100 metros (Uman, 2008). Sin embargo, las estructuras con una altura mayor a 100 m son más propensas a iniciar líderes ascendentes que al entrar en contacto con la estructura de carga de la nube de tormenta causan la descarga de retorno y consigo las descargas subsecuentes (Montanyà et al., 2014; Montanyà, Fabró, et al., 2016). El porcentaje de dichas descargas ascendentes está asociado a varios factores, como lo son la altura de la EE, la altura sobre el nivel del mar, la complejidad del terreno, la densidad de descargas a tierra del área donde se encuentre ubicada y la actividad de días tormentosos en época de invierno. Ya que, principalmente en el mes de octubre, debido a las condiciones severas de tormentas eléctricas de invierno se ha encontrado que las regiones de carga están más cercanas a la tierra y que no se localiza la región de carga positiva inferior, lo que hace que las tasas de rayos aumenten (Montanyà et al., 2014; Montanyà, Fabró, et al., 2016).

Una estructura será impactada por una descarga atmosférica si un líder ascendente (y no siempre vertical) de ese objeto se conecta con una rama del líder descendente propagante

escalonado. Este evento tiene mayor probabilidad con EE que superan los 100 m de altura, con esto, se espera que en su mayoría los impactos de rayos sean descendentes. Por lo tanto, la frecuencia con la que una estructura es alcanzada depende tanto de la altura como de su área colectora. Para un cálculo aproximado, se asume líder descendente cualquiera que se haya propagado aleatoriamente hasta una ubicación directamente sobre una estructura o dentro de su área de influencia será interceptada por un líder de conexión ascendente y hacia afuera. Esta situación se ilustra en la Figura 2, para una estructura cuadrada con un lado horizontal (s) metros y altura (h) metros. Para este caso, un líder descendente que desciende sobre un área igual a $(s + 4h)^2 \text{ m}^2$ y llamada "área colectiva equivalente" (NFPA 780:2004) o "área de recolección" (IEC 62305-2:2006), impactará la estructura (Martin A. Uman, 2008).

Figura 2. Área colectiva equivalente de una estructura elevada



Nota. El gráfico representa Área colectiva equivalente de una estructura elevada en el ámbito de las protecciones contra rayo. Tomada de: (Martin A. Uman, 2008).

3.4 Daños a las estructuras elevadas

Los daños en las EE pueden producirse por impactos directos o indirectos, causando diferentes fallas tanto en la estructura como en las líneas de transmisión y se clasifican según su fuente de daño y daño infligido de la siguiente forma.

Tipos de daños (D_1): Presentan varios daños como lo son, fuego o explosiones, fallas o mal funcionamiento del sistema interno causado por un impulso electromagnético del rayo (IER), Lesiones a seres vivos causadas por tensiones de contacto y de paso (NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 4552-1, 2008).

Tipos de daños (D_2): Daños físicos (fuego, destrucción mecánica, entre otras) generados por impactos directos y cerca de la estructura o un servicio que entra a la misma (NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 4552-1, 2008).

Tipos de daños (D_3): Falla en el sistema interno causadas por impactos directos o cerca de la estructura o un servicio que entra a la misma. No obstante, también puede ser ocasionado por un impacto cerca de un servicio que entra a la estructura (NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 4552-1, 2008).

No obstante, en las torres de transmisión cuenta con un evento particular y es la tasa de fallas por flameo inverso (BFR), el cual hace referencia al flameo que se da cuando impacta una descarga atmosférica en las torres de transmisión ocasionando una diferencia de potencial y con esto elevando los niveles de tensión llevando el flameo desde la tierra hasta la fase de la línea. Este parámetro se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$BFR = 0.6 \cdot N_C \cdot P(I_C) \quad (5)$$

Donde:

$P(I_C)$ Es la probabilidad de la corriente crítica que produce que el interruptor se cierre.

N_C Es el nivel cerámico.

3.5 Análisis de riesgo

Las fuentes de daño debidas a rayos causan diversos tipos de daños, los cuales conllevan a una serie de consecuencias que al final se resumen en pérdidas. El análisis de riesgo consiste en calcular el riesgo de pérdida ya sea en estructuras o acometidas a través de la sumatoria de las componentes de riesgo, lo anterior con el fin de no superar el riesgo tolerable definido por las normas IEC 62305 y la NTC 4552 según el tipo de pérdida. En general cada componente de riesgo se calcula mediante tres parámetros: El número de eventos peligrosos (N_d) que depende de la Densidad de Descargas a Tierra (DDT), de un factor de localización relativo (C_d) y del área efectiva de la estructura (A_d); la probabilidad de daño (P_x) y la pérdida consecuente (L_x) como se evidencia en la expresión 6.

$$R_x = N_d \cdot P_x \cdot L_x \quad (6)$$

Donde:

N_d Es el número de eventos peligrosos.

P_x Es la probabilidad de daño.

L_x Es la pérdida consecuente.

3.6 Protección contra rayos de estructuras elevadas (EE)

Uno de los principales problemas que presentan las EE son las sobretensiones ocasionadas por descargas atmosféricas, dado que pueden alcanzar valores de decenas de kilovoltios con duraciones del orden de los microsegundos. A pesar de su corta duración, el fuerte contenido energético puede causar graves problemas como interrupciones en el servicio de energía eléctrica

y daños físicos a estructuras y acometidas (IEC 62305-1, 2006). La mayoría de las fallas causadas por sobretensiones que tienen las torres de transmisión en su totalidad son ocasionadas por impactos directos de rayo, mientras que en las redes de distribución puede haber fallas ocasionadas tanto por impactos directos como indirectos, esto se debe al nivel de soportabilidad ante sobretensiones con el que se dimensionan dichas redes. Al ocurrir una descarga atmosférica, la corriente del rayo fluye a través del cable de guarda y de la estructura de transmisión, y según el nivel de resistencia de puesta a tierra con el que cuente la EE, se va a generar una diferencia de potencial entre esta y los conductores de fase, presentándose una alta probabilidad de vencer el nivel de soportabilidad del aislamiento ante una tensión de impulso y desencadenando un flameo inverso (Rizk, 1994).

La protección contra descargas atmosféricas de una EE conectada a la tierra se puede lograr mediante la colocación de un conductor elevado y bien conectado a tierra sobre el objeto, de manera que apantalle en su totalidad el activo a proteger consiguiendo que el rayo prefiera golpear el conductor elevado, desviando así la corriente del rayo hacia el suelo lejos del objeto protegido. Los ejemplos más claros de dichos conductores son los cables de guardas ubicados en la parte más alta de la línea de transmisión, los cuales están conectados a un electrodo de puesta a tierra enterrado a través de conductores descendentes, logrando que la corriente del rayo fluya de manera segura hacia la tierra. Al proporcionar un punto de impacto preferencial para el rayo, el sistema de protección contra rayos con la ayuda de las puntas captadores crea un líder ascendente que atrae la corriente del rayo hacia sí mismo y evita que golpee el objeto protegido. No obstante, la presencia de un sistema de protección contra rayos no aumenta significativamente la probabilidad de que una estructura sea alcanzada y dañada por un rayo, aunque existe un aumento marginal en dicha probabilidad los beneficios que conlleva tener un sistema de protecciones contra rayos

superan con creces cualquier aumento marginal en la probabilidad de los impactos de una descarga atmosférica (Martin A. Uman, 2008).

Además de la protección estructural, se deben tomar medidas para proteger tanto la energía eléctrica hacia y dentro de las estructuras como los equipos electrónicos ubicados dentro de ellas de los voltajes inducidos por los rayos y los efectos electromagnéticos cercanos. Esto se logra mediante el blindaje, filtrado y uso de dispositivos limitadores de sobretensión DPS (Martin A. Uman, 2008).

3.7 Necesidad de protección

El costo de instalar un sistema de protección contra rayos en una casa residencial típica representa un valor significativo. Esto incluye la seguridad para los servicios de energía y telecomunicaciones, lo cual representan solo una pequeña fracción del costo de la protección estructural.

Las descargas atmosféricas ocasionan desde daños menores hasta la destrucción total del activo. No obstante, los dispositivos electrónicos dentro de las estructuras también pueden resultar afectados, ya que se ven influenciados tanto por impactos directos de rayo como por un impacto cerca de la estructura o los cables de servicio. Al menos que la línea de transmisión o EE esté protegida por cables de guarda, DPS o descargadores, más del 99% de todos los impactos directos causarán un flameo en las líneas sin importar su nivel de aislamiento, espacio entre conductores o puesta a tierra. Lo cual se resume en pérdidas económicas, vidas humanas, servicios públicos y bienes culturales. La decisión de instalar protección contra rayos en una estructura o bien público depende de la probabilidad de que la estructura o sus servicios se vean afectados por un rayo, así como el nivel de comodidad personal de los residentes (Martin A. Uman, 2008).

Con esto se debe llevar un análisis de riesgo, se utiliza para determinar si se necesita protección contra rayos en una estructura en particular. Se cuenta con unos factores clave como lo son la DDT, el área de la estructura, la ubicación topológica y el entorno de la estructura, adicionalmente se rige en base a las normas nacionales de protección contra rayos que a menudo se incluyen en los planos de construcción de edificios importantes, donde se congrega a un gran número de personas o donde los rayos representan un peligro particular. En algunas áreas, se han hecho esfuerzos para hacer obligatoria la protección contra rayos en edificios residenciales.

La implementación de dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS) en la línea de entrada de cada zona de protección contra rayos es esencial. Si no es posible colocar los DPS en la entrada, se deben tomar medidas adicionales para garantizar la protección adecuada (Martin A. Uman, 2008).

El propósito de esta técnica es establecer un límite entre zonas con el objetivo de reducir la corriente y el voltaje a un nivel tolerable para el equipo ubicado en la zona de protección con el número más alto. Esto se logra mediante la implementación de conexión adecuada, apantallamiento y protección contra sobretensiones de cables en el límite de la zona. De acuerdo con la norma IEC 62305, los dispositivos de protección contra sobretensiones (DPS) deben instalarse en la línea de entrada de cada Zona de Protección contra Rayos (LPZ). Si no es posible colocarlos en la entrada de la LPZ, se debe documentar que el equipo conectado en ambos extremos de la entrada puede soportar los impulsos de voltaje esperados. Es esencial asegurar que el impulso de corriente conducido no afecte negativamente el entorno magnético de la LPZ en la que se ha ingresado. En caso de que el DPS esté ubicado a más de 10 m del equipo que debe protegerse, se deben tomar medidas adicionales para garantizar la protección adecuada (IEC 62305-1, 2006).

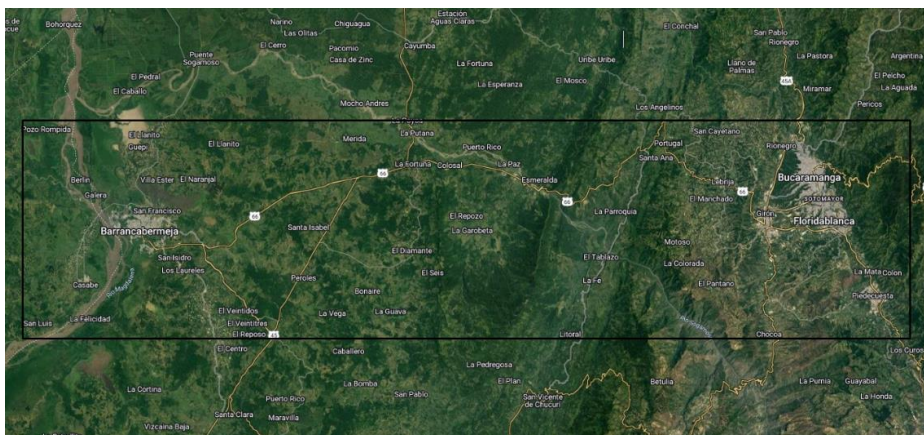
En resumen, la instalación de protección contra rayos en estructuras residenciales depende de factores como el riesgo de exposición a rayos y las consideraciones personales. Los costos, la probabilidad de daños y las regulaciones locales también juegan un papel en la decisión de implementar protección contra rayos (Martin A. Uman, 2008).

4. Metodología

4.1 Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a un área de 2700 km^2 localizada en el nororiente colombiano. Está compuesta por los municipios de la región en donde se encuentra el casco urbano de Bucaramanga, Floridablanca, Barrancabermeja y Yondó como se observa en la Figura 3. En esta zona interactúan los vientos alisios del noreste con los vientos de los valles y cañones de la región, además de la presencia de los Andes Colombianos cuya topografía favorece la formación de tormentas eléctricas.

Figura 3. Zona de estudio del trabajo de investigación



Nota. En la figura se muestra la zona de estudio del trabajo de investigación que abarca desde Bucaramanga hasta Yondó y sus municipios circundantes.

4.2 Datos

En este estudio se utilizaron datos de descargas nube tierra (CG) proporcionados por la red LINET en un intervalo de tiempo entre 2014 y 2021. Esta red es un sistema avanzado de detección y monitoreo que utiliza una combinación de 19 sensores distribuidos a lo largo del país como se ilustra en la Figura 4.

Figura 4. Sensores de la red de localización de rayos LINET



Nota. La figura presenta la distribución de los sensores de la red de localización de rayos LINET a lo largo del territorio nacional. Tomada de Keraunos SAS, 2016.

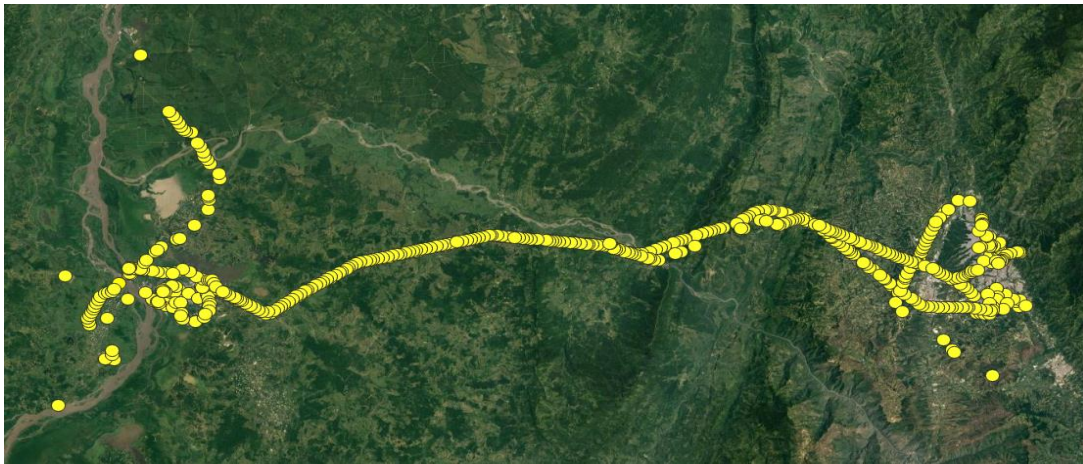
La red LINET opera en los rangos de frecuencia VLF/LF y tecnología de posicionamiento geoespacial para registrar y rastrear los impactos de rayo en tiempo real. Proporcionando datos precisos sobre la longitud, latitud, error, corriente, altura, fecha y hora de las descargas atmosféricas. Teniendo en cuenta que solo se van a considerar amplitudes de corrientes pico superiores a los 10 KA (H. D. Betz et al, 2009).

La totalidad de strokes suministrados por la red LINET en el área de estudio se agruparon en flashes teniendo en cuenta los criterios de tiempo y distancia, sí los strokes están separados por una distancia entre 100 m y 500 m, que ocurren entre 20-50 μ s y separados en tiempo de 20-100 ms se pueden componer en flashes (D. F. Del Río, 2018).

4.3 Ubicación de estructuras elevadas y radio de influencia

En el área de estudio se localizaron un total de 607 estructuras elevadas conformadas por 62 edificaciones, 509 torres de transmisión y 36 torres de comunicación, como se ilustra en la Figura 5. Para cada estructura se establece un radio de influencia de 150 metros teniendo en cuenta que el error medio de los flashes procesados es cercano a dicho valor. De acuerdo a lo anterior, si un rayo se registra dentro de algún radio de influencia se considera un impacto directo en la estructura elevada.

Figura 5. Radio de influencia y ubicación de las estructuras elevadas



Nota. En la figura se muestran las estructuras elevadas en estudio con sus respectivos radios de influencia y su ubicación.

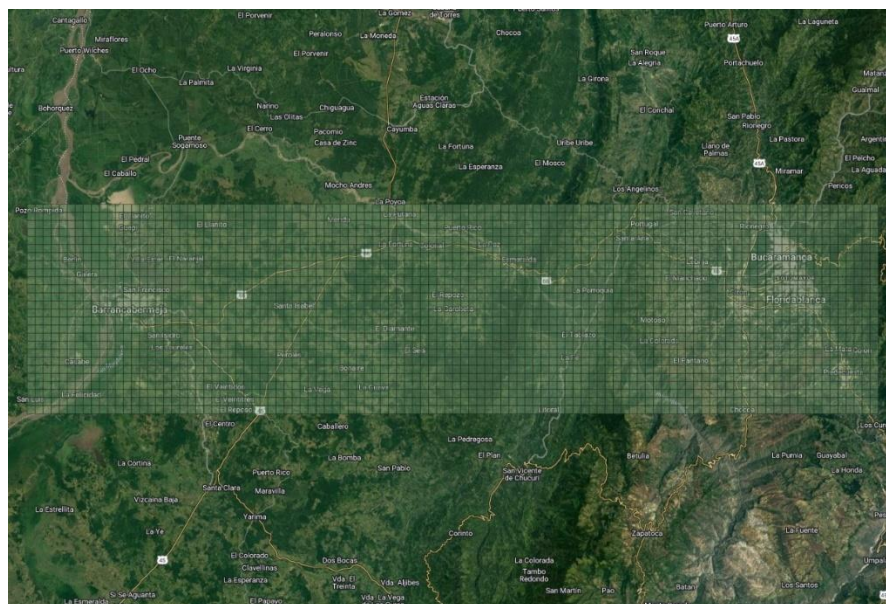
4.4 Determinación del número de impactos con la red LINET

De acuerdo con el radio de influencia establecido para cada una de las 607 estructuras del estudio, se ubican los flashes como puntos en el espacio de acuerdo a su punto de impacto y se cuenta cada uno de ellos en los diferentes radios de influencia, luego se divide la cantidad de impactos hallada en el número de años de la base de datos de flashes y de esta manera se obtiene la cantidad de impactos promedio por año por estructura elevada.

4.5 Determinación de la DDT

Por medio del software QGIS se realizó una cuadrícula de 1 km^2 sobre el área de estudio como se observa en la Figura 6. Posteriormente se cuentan los flashes proporcionados por la red LINET en cada uno de estos recuadros y se dividen en el número de años de la base de datos de flashes para obtener la DDT promedio. De esta manera a cada estructura elevada se le asigna un valor correspondiente de DDT de acuerdo con la región donde se encuentre.

Figura 6. Cuadrícula para determinar la DDT



Nota. En la figura se muestra la cuadrícula que se hizo sobre la zona de estudio, con recuadros de 1km x 1km donde posteriormente se hizo el conteo de flashes.

4.6 Determinación del número de impactos según la normativa

4.6.1 Norma IEC-62305-2 y la NTC-4552-2

La evaluación del número anual de eventos peligrosos asociados a las descargas atmosféricas se realiza mediante el análisis de datos periódicos de tormentas eléctricas y la estimación de la probabilidad de que ocurran en una determinada área geográfica. La recopilación de datos se lleva a cabo involucrando una diversidad de recursos, como lo son las redes de localización de descargas (LINET) y el nivel cerámico o cantidad de días tormentosos al año (N_c). En caso de no contar con esta información, es factible emplear la densidad total de rayos disponible en la página de la NASA para calcular N_g . En resumen, la ecuación que determina la cantidad de eventos peligrosos a la estructura en estas normas es prácticamente idéntica, aunque existen algunas variaciones destacables en el cálculo DDT, también conocida como N_g en inglés.

NTC 4552

$$DDT = 0.0017 \cdot N_c^{1.56} \quad (7)$$

$$N_D = DDT \cdot A_D \cdot C_D \cdot 10^{-6} \quad (8)$$

IEC62305

$$N_G = 0.1 \cdot T_d \quad (9)$$

$$N_D = N_G \cdot A_D \cdot C_D \cdot 10^{-6} \quad (10)$$

Donde:

T_d Es el número de días tormentosos (N_c).

N_G Es la densidad de descargas a tierra.

N_D Es el número de evento peligrosos por impacto directo a la estructura.

Para efectos del cálculo de este trabajo en edificaciones se tiene en cuenta el área efectiva de las estructuras elevadas como si fueran rectangulares y se determinó mediante la fórmula.

$$A_D = L \cdot W + 6H(L + W) + 9\pi \cdot H^2 \quad (11)$$

En el caso de estructuras elevadas como torres de telecomunicaciones y torres de transmisión se utiliza la siguiente formula.

$$A_D = 9 \cdot \pi \cdot H^2 \quad (12)$$

Donde:

A_D Es el área colectora de la estructura.

L Es el largo de la estructura.

W Es el ancho de la estructura.

H Es la altura de la estructura.

4.6.2 Fórmula de Eriksson

Las líneas de transmisión de energía eléctrica tienen alturas entre los 27 y los 133 metros, para dichas estructuras Eriksson propuso una ecuación para calcular el número de eventos que impactan una estructura de transmisión incluyendo conceptos de distancia crítica y radio efectivo (Drabkin et al., 2012; Eriksson, 1978, 1987). Para valores 1 flash/km²/año N se puede expresar:

$$N = N_g(b + 28H^{0.6}) \cdot 10^{-1} \quad (13)$$

Donde:

N_g Es la densidad de descargas a tierra.

B Es el ancho de la estructura.

H Es la altura de la estructura.

Para el caso de estructuras elevadas que no corresponden a torres de transmisión se usó la siguiente expresión:

$$N_S = 2.4 \cdot 10^{-5} \cdot N_G^{2.05} \quad (14)$$

$$N_G = 1 \cdot km^{-2} \cdot año^{-1} \quad (15)$$

4.7 Construcción del modelo

Teniendo el número de flashes en estructuras elevadas como variable dependiente, se construyó un modelo de regresión lineal múltiple que describe esta cantidad a través de dos variables independientes como lo son la altura de la estructura y la Densidad de Descargas a Tierra del sitio en donde se encuentra ubicada.

5. Resultados

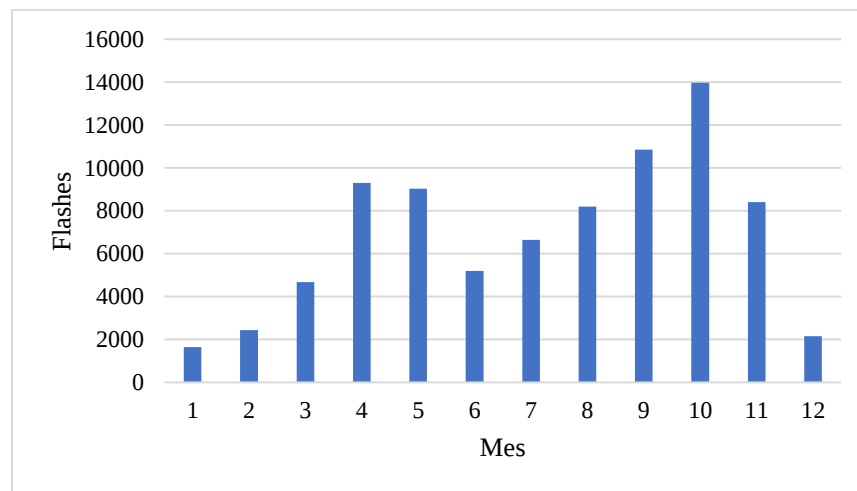
Los títulos de cuarto nivel se presentan a una interlinea del párrafo anterior, con sangría de 1, 27 cm, negrita y sin cursiva. Estos títulos de cuarto nivel deben finalizar con punto y se deja un espacio para iniciar el texto en el mismo renglón donde finalizo el título.

5.1 Caracterización de impactos de rayo en EE

En la Figura 7 se muestran los flashes que impactan en las EE de la zona de estudio durante un periodo de tiempo de 8 años, desde el 2014 hasta el 2021. Con respecto al presente estudio, se observa un comportamiento bimodal con picos de actividad en los meses de Abril-Mayo y Septiembre-Octubre, lo que concuerda con lo presentado por (Torres, 2002) donde los meses con mayor actividad atmosférica coinciden exactamente. En (Herrera, Younes & Porras, 2018) en el

periodo entre 1997 y 2001 los picos de actividad fueron obtenidos en los meses de mayo y septiembre, pero para el periodo comprendido entre 2007 y 2015 variaron a abril y septiembre. El comportamiento de la cantidad de flashes en EE coincide con los resultados obtenidos con la red LINET comprendidos entre 2014 y 2016 en el departamento de Santander donde los meses con mayor actividad fueron abril, septiembre y octubre (Ardila Murillo, Soto Ríos, & Velandia López, 2022).

Figura 7. Distribución mensual de flashes en estructuras elevadas

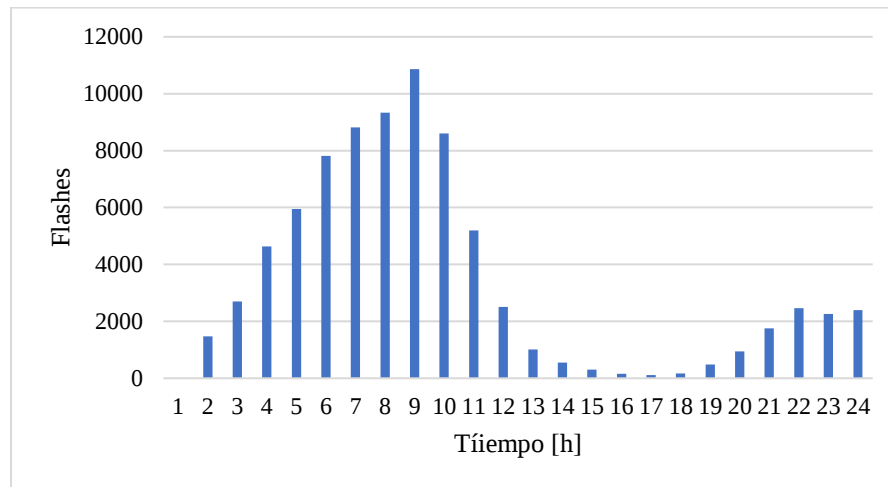


Nota. En la gráfica se muestra la distribución mensual de los flashes en estructuras elevadas, la cual se llevó a cabo analizando los datos proporcionados por la red LINET con el software QGIS.

Analizando la tendencia horaria, los patrones de actividad eléctrica atmosférica tienen una mayor cantidad de eventos entre el periodo de tiempo correspondiente a las 7:00 y las 10:00 h, con su pico máximo mayor a los 10000 flashes obtenido a las 9:00 h como se evidencia en la Figura 8. No obstante, este comportamiento tiende a volverse decreciente hasta llegar al periodo entre las 16:00 y 17:00 h, siendo así el horario más seguro para las EE y con menos actividad atmosférica siendo así menos propenso a recibir impactos de rayos. Entre las 22:00 y 23:00 h hay un ligero

aumento de la cantidad de rayos en EE que puede ser debida a precipitaciones nocturnas que se presentan en la zona.

Figura 8. Distribución horaria de flashes en estructuras elevadas

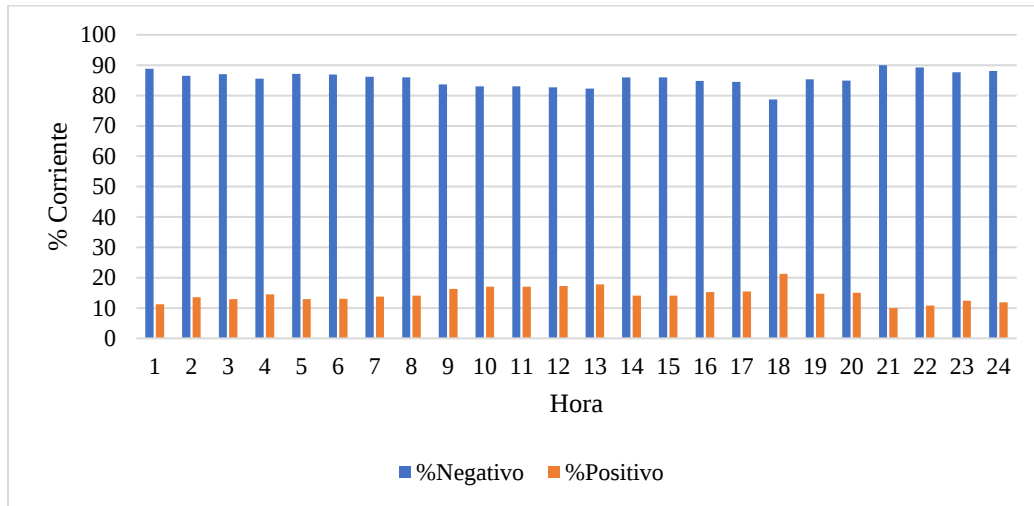


Nota. En la gráfica se muestra la distribución horaria de los flashes en estructuras elevadas, la cual se llevó a cabo analizando los datos proporcionados por la red LINET con el software QGIS

Así mismo, la Figura 9 presenta la polaridad de la corriente de la descarga de retorno teniendo como variación la hora. En el contexto de la actividad atmosférica y los rayos, se ha observado que hay diferencias en la polaridad de los rayos durante diferentes momentos del día. Al obtener el porcentaje de la polaridad de corriente de la descarga según su periodo de tiempo, estipulado desde las 0 horas hasta las 24. Se comprueba un resultado esperado, siendo tendencia con un 85.6% las descargas negativas, Los valores obtenidos son congruentes con los presentados en (Herrera, Younes & Porras, 2018), con un estudio de la actividad atmosférica en un periodo de 14 años donde se observa una tendencia de flashes negativos mayor al 80%. La polaridad de los rayos está determinada por varios factores, como lo son la carga eléctrica en la atmósfera, la formación de nubes y las condiciones meteorológicas locales. Por lo tanto, es posible que la

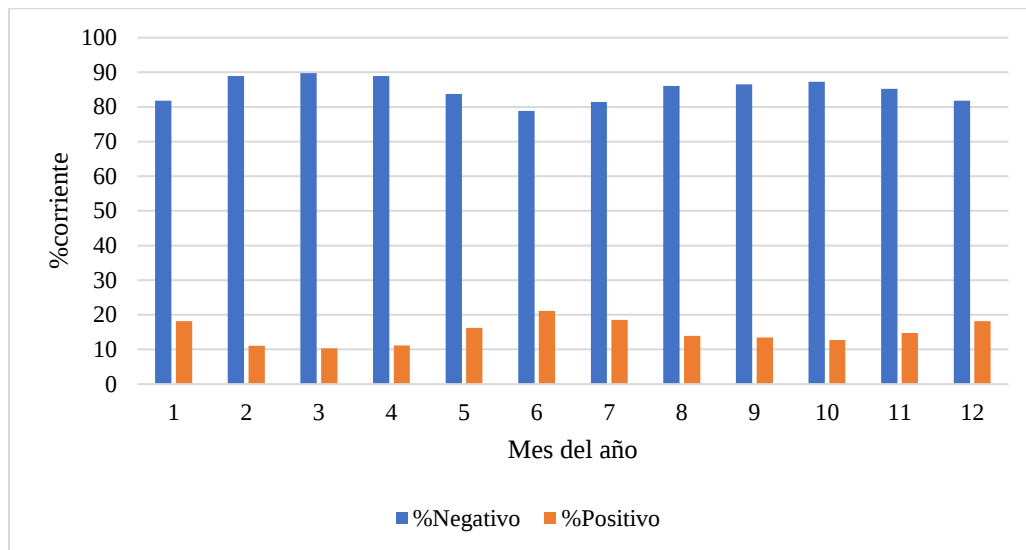
polaridad de los rayos varíe durante diferentes franjas horarias en función de las condiciones específicas en el área de estudio.

Figura 9. Polaridad de la corriente de flashes en estructuras elevadas



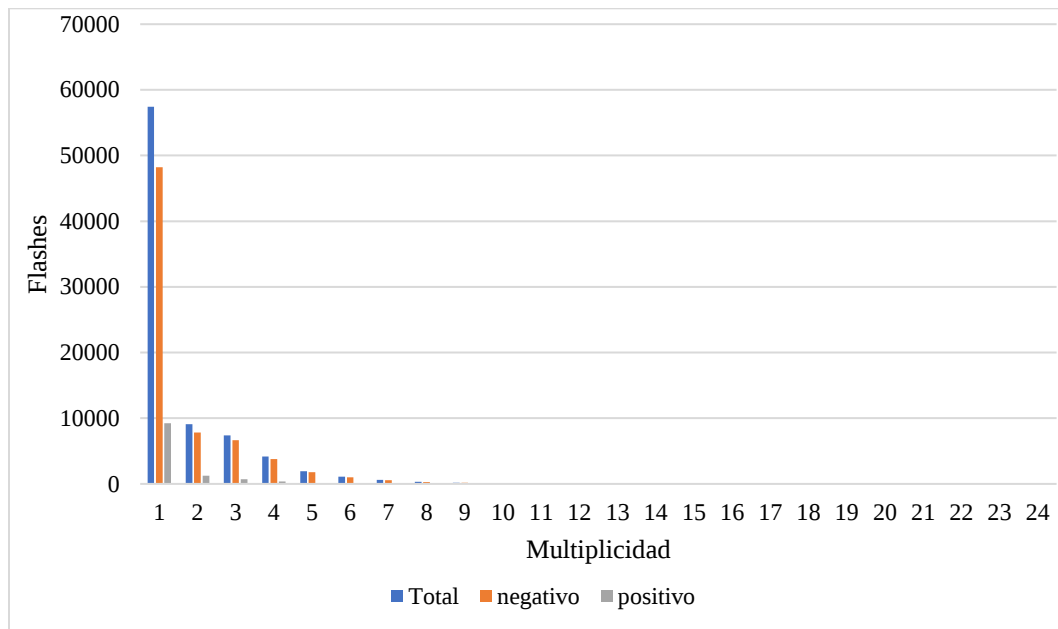
Nota. En la gráfica se muestra la Polaridad de la corriente de flashes en estructuras elevadas, la cual se llevó a cabo analizando los datos proporcionados por la red LINET con el software QGIS.

En la figura 10 se observa la variación mensual de la polaridad de la corriente de descarga de retorno con una tendencia mayormente negativa. Se evidencia que la relación de flashes negativos y positivos permanece aproximadamente constante a lo largo de los meses.

Figura 10. Variación mensual de la polaridad de la corriente del rayo

Nota. En la gráfica se muestra la Variación mensual de la polaridad de la corriente del rayo en estructuras elevadas, la cual se llevó a cabo analizando los datos proporcionados por la red LINET con el software QGIS.

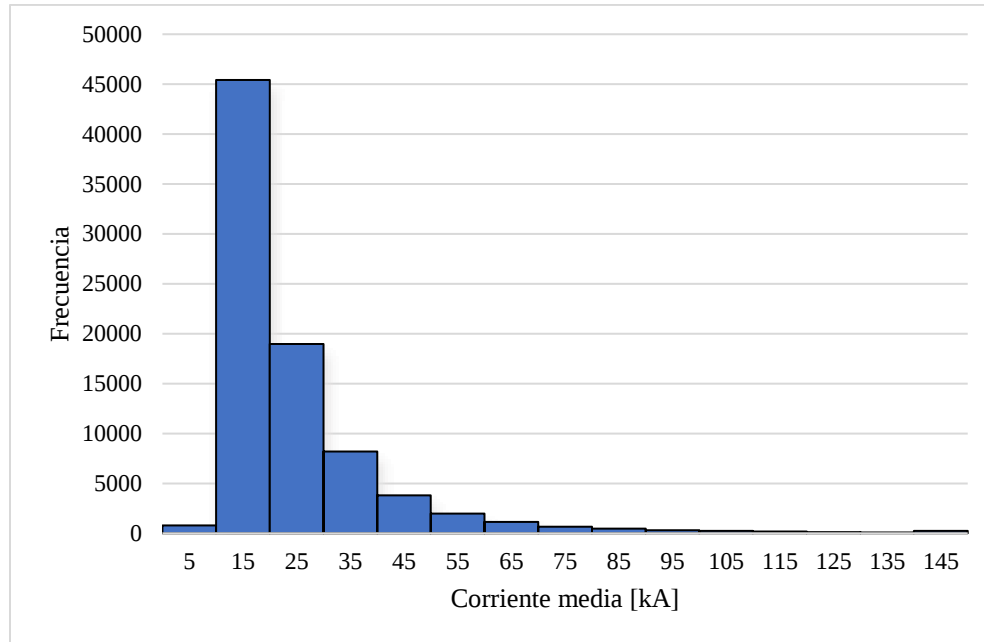
La Figura 11 establece la variación de la multiplicidad de los flashes en EE teniendo en cuenta los datos analizados en el periodo de estudio. Para este parámetro se obtuvo una mediana de 1.73 strokes/flash. Así mismo alrededor de un 70 % de los flashes cuentan con una multiplicidad de 1, seguido por un 11,6% de multiplicidad igual a 2, un 8% correspondiente a una multiplicidad de 3 y cerca de un 10.4% mayor o igual a 4. El mayor valor de multiplicidad lo tuvo un flash compuesto por 23 strokes registrado en septiembre del 2015, sin embargo, estos son casos atípicos.

Figura 11. Multiplicidad de flashes en estructuras elevadas

Nota. En la gráfica se muestra la multiplicidad de flashes en estructuras elevadas, la cual se llevó a cabo analizando los datos proporcionados por la red LINET con el software QGIS.

En la Figura 12 se presenta el histograma de frecuencias de la corriente de descarga gracias a los datos suministrados por la red LINET. Se observa que cerca del 55% de las corrientes registradas se encuentran entre 10 y 20 kA. No obstante, en gran parte se registraron eventos con rangos entre el 20 a 30 kA y 30 a 40 kA, con porcentajes de 23% y 14.6% respectivamente. Así mismo, se tiene una cantidad no despreciable de corrientes superiores a los 65 KA. Se observa que la corriente de descarga presenta un sesgo a la derecha ya que la mayoría de los valores corresponden a corrientes pequeñas grupadas por debajo de la media.

Figura 12. Histograma de corriente de descarga de retorno de flashes en estructuras elevadas



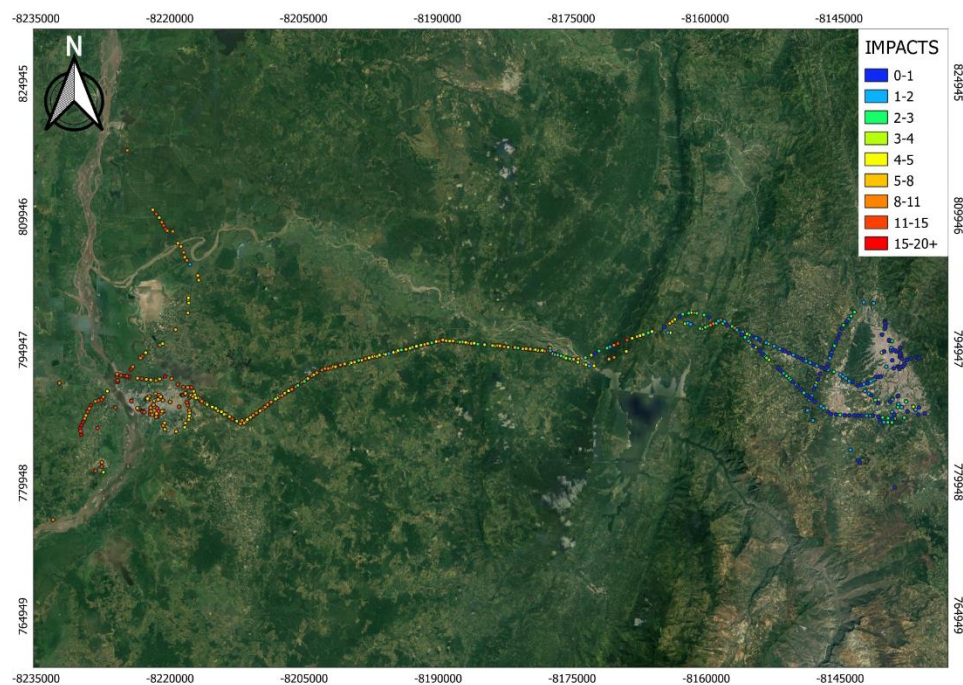
Nota. En la gráfica se muestra el histograma de corrientes de descarga de retorno de flashes en estructuras elevadas, la cual se llevó a cabo analizando los datos proporcionados por la red LINET con el software QGIS.

5.2 Variación espacial de impactos de rayo en EE

En la Figura 13 se presenta la variación espacial de los impactos de rayo en EE. Se observa cómo la cantidad de impactos de rayo disminuye en el área metropolitana de Bucaramanga y va aumentando progresivamente hasta llegar a Barrancabermeja y Yondó. Esto se debe a que en lugares elevados la actividad de rayos se ve disminuida dado que la presión atmosférica también lo hace, lo que se ve reflejado en un decremento de la temperatura, haciendo de estos entornos fríos menos propicios para la formación de nubes de tormenta.

El fenómeno opuesto ocurre en los municipios ubicados al oeste de la zona de estudio a orillas del río Magdalena, dado que la zona se encuentra ubicada en los sectores aledaños a la Serranía de los Yariguíes con cadenas montañosas a alturas entre los 2400 y los 3400 msnm que actúan como barrea natural para forzar a los vientos húmedos y cálidos subir, lo que desencadena la colisión de granizo y hielo que se encuentran en la atmósfera y propicia las condiciones ideales para la formación de tormentas eléctricas (Ardila Murillo & Soto Ríos, 2022).

Figura 13. Mapa de cantidad de impactos en estructuras elevadas



Nota. En la figura se muestra el mapa de cantidad de impactos en estructuras elevadas, el cual se llevó a cabo analizando los datos proporcionados por la red LINET con el software QGIS.

5.3 Variación numérica del número de impactos en EE

Para este estudio se estableció una muestra de estructuras teniendo en cuenta su altura. Se tienen estructuras de transmisión entre los 27 m y los 133.5 m, torres de telecomunicaciones entre

los 25 m y los 65 m. Por último, edificaciones entre los 12.08 m y 44.54 m para Barrancabermeja y entre los 70 m y los 163 m para Bucaramanga.

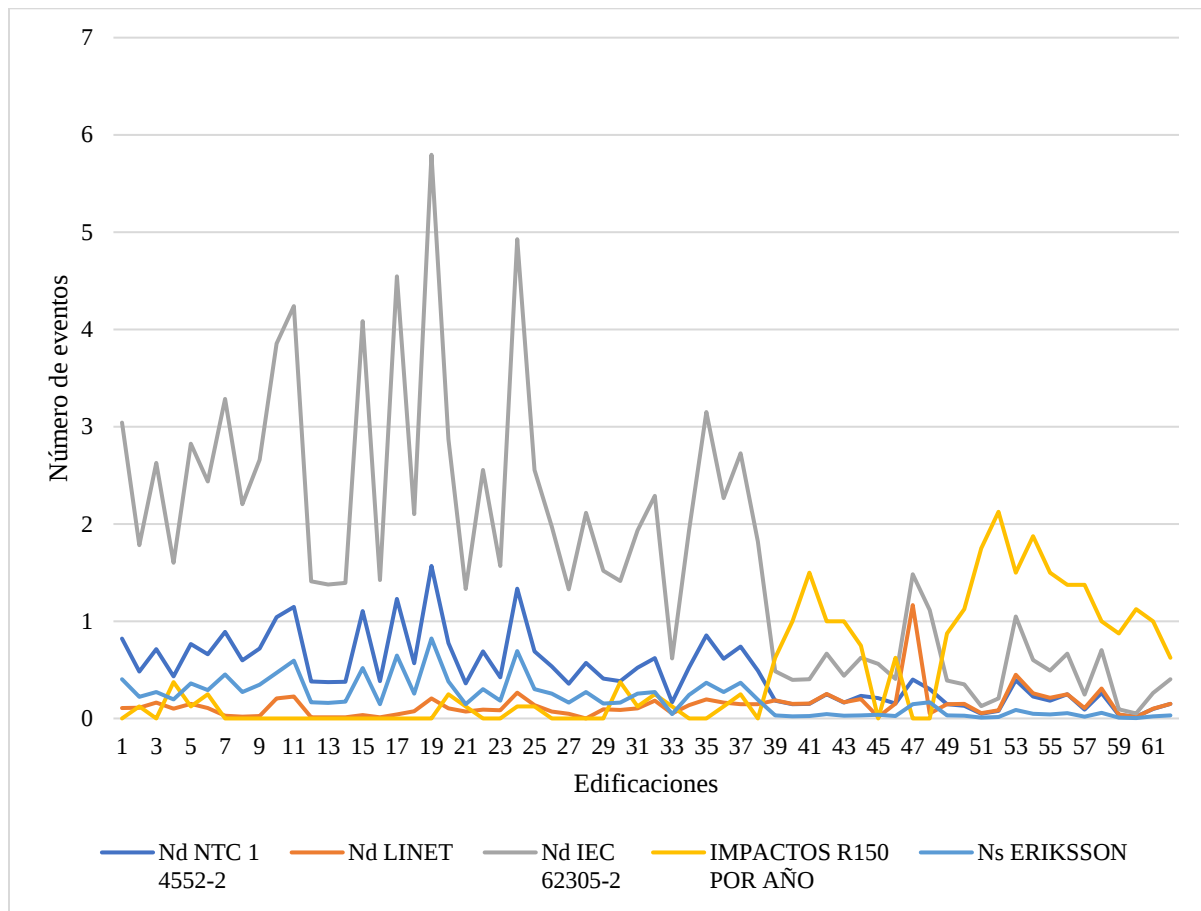
La muestra total de estructuras elevadas que se utilizó en este estudio fue de 607, consta de 62 edificaciones de las cuales 39 se encuentran en el área metropolitana de Bucaramanga y los 23 restantes en Barrancabermeja, 36 estructuras de telecomunicaciones ubicadas en Barrancabermeja y 507 torres de transmisión ubicadas desde Bucaramanga hasta Yondó.

En este trabajo se llevó a cabo una comparación de las diferentes metodologías usadas para hallar el número de impactos es estructuras elevadas, a continuación, se realiza la descripción de cada una de las variables calculadas:

- El número de eventos peligrosos debido a impactos directos en la estructura según la NTC 4552 (Nd NTC 4552) se calculó teniendo en cuenta el nivel cerámico (N_c) para hallar la DDT, la altura (H), el área de dispersión (A_d) y el factor de localización relativa (C_d).
- El número de eventos peligrosos debido a impactos directos en la estructura según la IEC 62305 (Nd IEC 62305) se calculó teniendo en cuenta el nivel cerámico (T_d) para hallar la DDT, la altura (H), el área de dispersión (A_d) y el factor de localización relativa (C_d).
- El número de eventos peligrosos debido a impactos directos en la estructura según la red LINET (Nd NTC LINET) se realizó teniendo en cuenta la DDT calculada con los impactos suministrados por la red LINET, la altura (H), el área de dispersión (A_d) y el factor de localización relativa (C_d).
- El número de impactos en EE según Ericksson (N_s Ericksson) se calculó teniendo cuenta la altura (H) de cada estructura elevada.

- La cantidad de impactos según la red LINET (Impactos R150) se calcularon usando un radio de incidencia de 150 m en cada una de las estructuras elevadas del estudio y se realizó el conteo de cada uno de los impactos suministrados por la red LINET en estos radios.

En la Figura 14 se muestra la comparativa de comportamiento del número de impactos de rayo para edificaciones. Se observa que para las edificaciones ubicadas en el área metropolitana de Bucaramanga (izquierda de la gráfica) el cálculo de la cantidad de impactos de rayo se sobredimensiona usando la expresión de la IEC 62305, lo anterior debido a que esta metodología utiliza el nivel cerámico para calcular la DDT y por tanto introduce una incertidumbre considerable en el cálculo. Ahora bien, para las edificaciones ubicadas en Barrancabermeja (derecha de la gráfica) el número de impactos calculado mediante la red LINET se hace mayor al calculado usando las demás metodologías. Este último valor brinda más confiabilidad ya que se realiza directamente con impactos CG suministrados por dicha red.

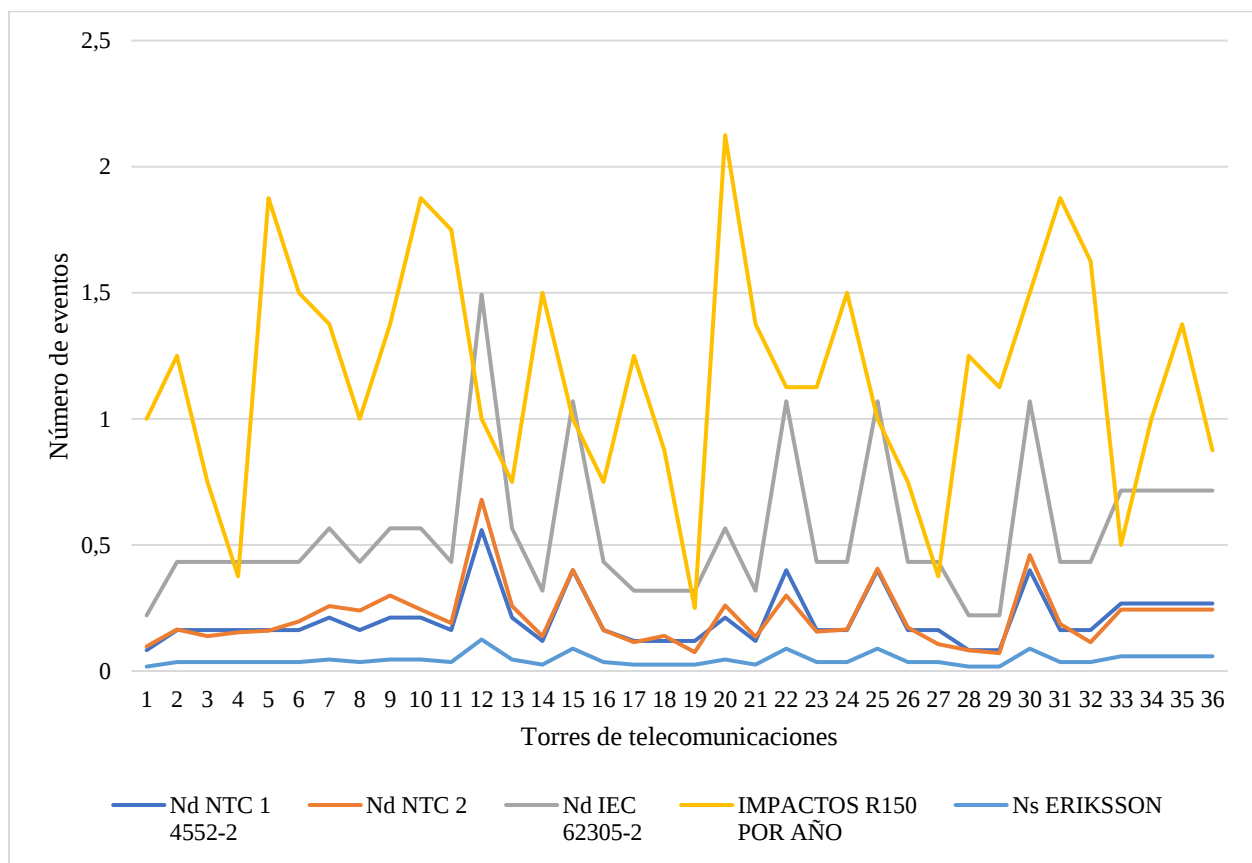
Figura 14. Comparación de número de impactos de rayo en edificaciones

Nota. En la Gráfica se muestra comparativa del número de impactos de rayo en edificaciones, el cual se llevó a cabo analizando los datos proporcionados por la red LINET con el software QGIS.

En la figura 15 se lleva a cabo la comparativa del número de impactos para las torres de telecomunicaciones ubicadas en Barrancabermeja los resultados son los esperados. Teniendo en cuenta que las fórmulas tradicionales fueron desarrolladas en otros países con diferentes latitudes y climas, lo que se puede apreciar es que el número de impactos calculados con la red LINET son en promedio 26 veces más que los calculados con la metodología de Eriksson, 5.7 más que los calculados con la NTC 4552, 5.5 más que con la NTC 4552 con DDT calculada mediante red LINET y 0.47 más que los calculados con la IEC 62305. Dado que los resultados proyectados por

la red LINET son muchos mayores en comparación que las metodologías tradicionales, las edificaciones estarían expuestas a un riesgo más elevado en cuanto a daños estructurales o la misma integridad de la vida humana. Esto implica que hay que tomar medidas de protección adicionales para cuidar la integridad de los dispositivos eléctricos, electrónicos y la misma estructura del edificio.

Figura 15. Comparación del número de impactos en estructuras de telecomunicaciones

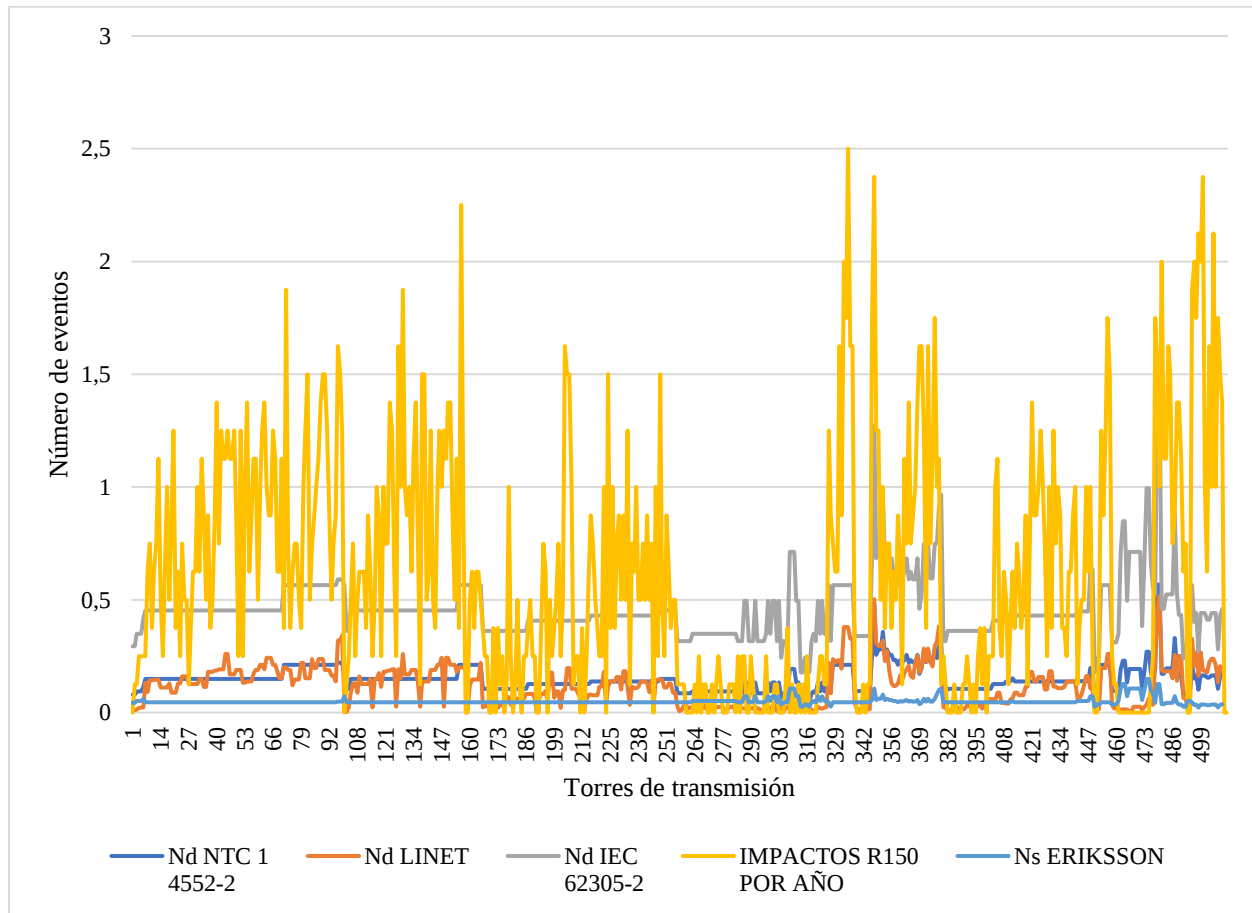


Nota. En la Gráfica se muestra comparativa del número de impactos en estructuras de telecomunicaciones, el cual se llevó a cabo analizando los datos proporcionados por la red LINET con el software QGIS.

En la figura 16 se presenta la comparación gráfica entre las metodologías tradicionales y los impactos de rayo calculado por medio de la red LINET para 507 estructuras de transmisión en

la zona de estudio. Se puede apreciar que el número de impactos calculados con la red LINET son en promedio 12 veces más que los calculados con la metodología de Ericsson, 3.9 más que los calculados con la NTC 4552, 4.75 más que con la NTC 4552 con DDT calculada mediante red LINET y 1.27 más que los calculados con la IEC 62305. La red LINET es capaz de detectar una cantidad de impactos de rayo mucho mayor que las metodologías tradicionales. Esto tendría implicaciones serias en términos de riesgo, seguridad y diseño de antenas de telecomunicaciones, lo que conlleva a implementar medidas de protección adicionales. Además, estos resultados podrían influir en la toma de decisiones al momento de determinar la ubicación de torres de telecomunicaciones futuras.

Figura 16. Comparación del número de impactos en estructuras de transmisión



Nota. En la Gráfica se muestra comparativa del número de impactos en estructuras de transmisión, el cual se llevó a cabo analizando los datos proporcionados por la red LINET con el software QGIS.

5.4 Elaboración del modelo para cálculo de impactos en estructuras de transmisión

Informes internos de las empresas comercializadoras de energía eléctrica en Colombia indican que alrededor del 40% al 80% de fallas en una línea de transmisión se deben a impactos de rayo que caen sobre estas líneas, con un máximo de 8.97 averías por cada 100 kilómetros al año (D. Aranguren et al., 2017). Es por eso por lo que en esta investigación se creó un modelo matemático con base en los datos suministrados por la red LINET de impactos reales, analizados en áreas de incidencia de 150 m de radio en cada una de las estructuras elevadas.

Para crear el modelo se usó el método de regresión múltiple, es una técnica estadística que en este caso será utilizada para analizar la relación entre una variable dependiente, que son los impactos reales calculados con la red LINET y dos independientes que son la altura (H) y la densidad de descargas a tierra (DDT). En el método de regresión múltiple, se busca encontrar una ecuación lineal que mejor se ajuste a los datos observados y que permita predecir el valor de la variable dependiente en función de las variables independientes. La ecuación de regresión múltiple se representa como:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 \quad (16)$$

La ecuación matemática que modela el número de rayos que impactan a una torre de transmisión en el periodo de un año, en la zona de estudio corresponde a la expresión 17.

$$N_d = 0.024878 + 0.00002012 \cdot H + 0.1170427 \cdot DDT \quad (17)$$

Donde:

N_d Es el número de rayos que impactan a una torre de transmisión en un año.

DDT Es la densidad de descargas a tierra en área donde se encuentra la torre en impactos/ km^2 /años.

H Es la altura de la torre de transmisión en metros.

En esta ecuación aprecia que por un aumento de 1 impacto/ km^2 /año en la DDT, incrementará en 0.12 el número de impactos anuales en cada torre de transmisión conservando la altura constante, e incrementará en 0.00002 impactos conservando la DDT constante por cada 1 metro de altura en la torre. En la tabla 2 se aprecian los coeficientes estadísticos de la regresión empleada.

Tabla 2. Coeficientes estadísticos de la regresión

Parámetro	Valor
Coefficiente de correlación múltiple	0.812120583
Coefficiente de determinación R^2	0.659539842
R^2 ajustado	0.656500019
Error típico	0.3382188
Observaciones	507

Nota. En este recuadro podemos apreciar los parámetros de la regresión múltiple, los cuales junto a las variables independientes explican el comportamiento de la variable dependiente.

En este recuadro la variable dependiente es el número de impacto, se relaciona de manera directamente proporcional con las dos variables independientes que son la altura H y la DDT, estas tienen una asociación con la independiente que corresponde al 81.21%, así mismo, la variación del

número de impactos en estructuras elevadas es del 65.95% y esta se puede interpretar por la variación de la DDT en el área de la donde se encuentra la torre y a la altura de esta. Estos resultados son el cociente de la suma de cuadrados del SSR (49.638) con la suma total de cuadrados del SST (75.262). De la misma manera, existe en la variación del número de impactos en dichas estructuras un 34.05% que no será explicado en este estudio, si no que será objeto de estudios futuros, abarcando la iniciación de rayos que impactan estructuras elevadas, con el análisis topológico de las nubes que los conforman, el estudio de sus centros de carga, y por último examinar que polaridad tienen los líderes que provocan los impactos de rayo en estructuras elevadas. Se debe contemplar incluir una variable más conlleva a la pérdida de un grado de libertad, por lo tanto, se necesita evidencia suficiente de que el aporte realizado por esa variable tenga suficiente capacidad explicativa de la variable independiente. El número de impactos en las torres de transmisión efectuado por la DDT y la altura H, tiene una explicación que corresponde al 65.65%, teniendo en cuenta el total de torres analizadas y las variables independiente. Finalmente, el error típico o desviación estándar corresponde al 0.33 impactos, lo que infiere un rango de predicción en estructuras elevadas de la cantidad de impactos de rayo de ± 0.66 flashes aproximadamente.

6. Conclusiones

A partir de los resultados, se observa que la cantidad de flashes que impactan cada estructura crece hacia Barrancabermeja y Yondó; municipios que encuentran a las orillas del río Magdalena a 75 msnm, y decrece hacia Bucaramanga; ciudad que se encuentra ubicada sobre la cordillera oriental con una altura de 959 msnm. Esta observación permite deducir que existe una

relación proporcional inversa entre la altura sobre el nivel del mar y el número de flashes que impactan cada estructura.

Con las 507 estructuras de transmisión que se encuentran en la parte central de central del departamento de Santander, entre los municipios de Bucaramanga y Yondó, se elaboró un modelo matemático que puede pronosticar el número de impactos en torres de transmisión relacionando dos variables: La altura de las torres (H) y la densidad de descargas a tierra. Con el modelo de regresión múltiple se obtuvo el 65.95% de la variación del número de impactos en las torres de transmisión, con una desviación estándar o error típico de 0.33 impactos.

Del análisis realizado sobre el número de impactos calculado con las metodologías tradicionales y el realizado en base a la red LINET en estructuras elevadas, se corroboró que el número de impactos de rayo es 19 veces más que los calculados con la metodología de Eriksson, 4.8 más que los calculados con la NTC 4552, 5.25 más que con la NTC 4552 con DDT calculada mediante red LINET y 0.88 más que los calculados con la IEC 62305 para torres de transmisión y telecomunicaciones, por lo tanto se concluye que la red LINET proporciona datos más precisos y detallados sobre el número de impactos de rayo sobre estructuras elevadas lo que contribuye a una mejor evaluación de los riesgos y una mejor planificación de la protección contra rayos en EE.

Por último, al recopilar una muestra de 82525 flashes que involucran impactos directos o indirectos cerca de las EE ubicadas, de las cuales se muestra una tendencia del 85.6% de CG- y el 14.4% CG+. Estos eventos en su mayoría tienen corrientes pico promedios que oscilan entre los 10kA y 30kA. De los cuales, los meses con más actividad atmosférica son octubre, septiembre y abril consecutivamente. Teniendo congruencia con los resultados presentados en (Herrera, Younes & Porras, 2018), donde se hizo un estudio teniendo en cuenta los datos suministrados en un periodo entre 1997 y 2001 donde los meses con mayor actividad estuvieron comprendidos entre mayo y

septiembre, con una variación a abril y septiembre cuando se recopiló la información del periodo entre 2007 y 2015.

7. Recomendaciones

El presente trabajo de grado recomienda complementar el modelo planteado con otras variables como:

La altura sobre el nivel del mar.

La altura de las regiones de carga de nubes de tormenta.

La estructura de carga en nubes de tormenta.

Además, recomienda estudiar el efecto de la inclinación del terreno en el número de flashes en las estructuras elevada.

Referencias Bibliográficas

- Abdul Rahim, N., Izadi, M., Ab Kadir, M. Z. A., Rameli, N., & Nizam, S. (2014). On the behavior of lightning return stroke current incidence to tall towers. In Proceedings of the 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference, PEOCO 2014 (pp. 281–285). IEEE Computer Society. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2014.6814440>.
- Aranguren, D., González, J., Cruz, A., Inampué, J., Torres, H., & Pérez-Tobón, P. S. (2017). Lightning strikes on power transmission lines and lightning detection in Colombia. In 2017 International Symposium on Lightning Protection, XIV SIPDA 2017 (pp. 273–278). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/SIPDA.2017.8116936>.
- Aranguren, Daniel, López, J., Inampué, J., Torres, H., & Betz, H. D. (2014). Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography. In 2014 International Conference on Lightning Protection, ICLP 2014. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2014.6973430>.
- 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), 67–85. <https://doi.org/10.14483/22487638.17679>.
- 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>.
- D. F. Del Río Trujillo, (2018). Evaluación del efecto urbano sobre los parámetros del rayo. Caso colombiano [Trabajo de grado - Doctorado].

- Drabkin, M. M., Mui, C. Y. A., & Mun, O. L. (2012). Lightning protection of tall structures. In 2012 31st International Conference on Lightning Protection, ICLP 2012. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2012.6344248>.
- 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> [8]. Eriksson, A. J. (1987). The incidence of lightning strikes to power lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2(3), 859–870. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.1987.4308191>.
- H. D. Betz et al, (2009). “LINET-An international lightning detection network in Europe,” *Atmos Res*.
- H. Torres, E. Perez, C. Younes, D. Aranguren, J. Montana, and J. Herrera, (2015). “Review of ground flash density and keraunic levels reported in tropical regions” *Asia-Pacific International Conference on Lightning*.
- IEC 62305-1.(2006). *Protection Against Lightning. Part 1: General Principles*. Geneva:International Electrotechnical Commission.
- J. Herrera, C. Younes, and L. Porras, (2018). “Cloud-to-ground lightning activity in Colombia: A 14-year study using lightning location system data”, *Atmos. Res.*, vol. 203, pp. 164- 174.
- Martin A. Uman. (2008). *The Art and Science of Lightning Protection*. Cambridge University, 25–230.
- Montana, J., & Silva, J. (2013). Estimation of the lightning parameters in the North Region of Colombia: Results of a study based on linet information system and using statistics models. In 2013 International Symposium on Lightning Protection, SIPDA 2013 (pp. 11–16). IEEE Computer Society. <https://doi.org/10.1109/SIPDA.2013.6729221>.

- Montanyà, J., van der Velde, O., & Williams, E. R. (2014). Lightning discharges produced by wind turbines. *Journal of Geophysical Research*, 119(3).
- NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 4552-1. (2008).
- NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 4552-2 PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ELÉCTRICAS ATMOSFÉRICAS (RAYOS). PARTE 2: MANEJO DEL RIESGO. (2008).
- NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 4552-3. (2008).
- N. Pineda, J. Montanyà, A. Salvador, O. A. van der Velde, and J. A. López, (2018). “Thunderstorm characteristics favouring downward and upward lightning to wind turbines,” *Atmos. Res.*, vol. 214, pp. 46–63.
- Rahimian, M. S., & Hussein, A. M. (2012). Calculation of tall-structure lightning current parameters using particle swarm optimization technique. In 2012 31st International Conference on Lightning Protection, ICLP 2012. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2012.6344391>.
- R. I. Albrecht, S. J. Goodman, D. E. Buechler, R. J. Blakeslee, and H. J. Christian, (2016). “¿Where are the lightninghotspots on earth?”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 97, no. 11, pp. 2051-2068.
- Rizk, F. A. M. (1994). Modeling of Lightning Incidence to Tall Structures Part II: Application. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 9(1), 172–193. <https://doi.org/10.1109/61.277690>.
- Torres, H. (2002). *El Rayo: Mitos, Leyendas, Ciencia y Tecnología*. Universidad Nacional de Colombia.
- Torres-Sanchez, H. (2017). The interdisciplinarity of lightning. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(159), 174– 186. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.475>.

- V. March,(2018). “Key issues to define a method of lightning risk assessment for wind farms,”
Electr. Power Syst. Res., vol. 159, pp. 50–57, 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2017.08.020.
- 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*, 62(12). <https://doi.org/10.1175/JAS3615.1>.
- Younes-Velosa, C. (2020). Characterization of lightning parameters in Colombia based on terrestrial and satellite lightning locating systems, a 20 years analysis. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales*, 44(173), 960–973. <https://doi.org/10.18257/RACCEFYN.1171>.
- Zhu, Y., Rakov, V. A., Mallick, S., & Tran, M. D. (2015). Characterization of negative cloudto-ground lightning in Florida. *Journal of Atmospheric and SolarTerrestrial Physics*, 136.
- Keraunos S.A.S., (2016). “Red Colombiana de detección total de rayos LINET,” Ficha técnica.