

**Caracterización de zonas y estructuras elevadas presentes en el territorio nacional con
mayor cantidad de impactos de rayos (HOTSPOTS)**

Javier Alexander Mora Russi, Julián Rodrigo Rojas Avellaneda

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

Édison Andrés Soto Ríos

Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Bucaramanga

2020

Contenido

	Pág.
Introducción	17
1. Antecedentes del estudio de descargas atmosféricas en Colombia	19
1.1 Densidad de descargas a tierra (DDT) y Nivel Cerámico (NC).	19
1.2 Comportamiento y formación de los tipos de descargas atmosféricas	22
1.3 Eficiencia de detección del sistema de localización de rayos – LINET	26
1.4 Daños físicos y fallas en sistemas eléctricos y electrónicos.	28
1.5 Lugar del evento	29
2. Metodología para el análisis de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos presentes en el territorio nacional.....	31
2.1 Selección de los departamentos y sus respectivas ciudades de análisis.....	31
2.2 Selección de estructuras elevadas y lugares de evento, clasificación y localización geográfica	32
2.3 Software QGIS.....	33
2.4 Relación de datos de impactos procedentes de la red LINET y localización geográfica mediante el software QGIS	34
2.5 Ubicación de polígonos de 600 metros en los municipios a analizar.	34
2.6 Obtención del total de impactos por Cuadrícula.....	35
3. Resultados de la caracterización de los sitios específicos y estructuras elevadas con mayor	

cantidad de impactos de rayos en Colombia.....	35
3.1 Municipios Barrancabermeja Yondó-Santander.....	36
3.1.1 Zona con mayor número de impactos de rayos.	37
3.2 Ciudad de Bogotá D.C.	41
3.2.1 Zona con mayor Número de impacto de rayos.	42
3.3 Ciudad de Medellín-Antioquia	45
3.3.1 Zona con mayor número de impactos de rayos.	46
3.4 Municipio de Cali-Valle del Cauca.....	49
3.4.1 Zona con mayor número de impactos de rayos.	50
3.5 Municipio de Tunja-Boyacá	53
3.5.1 Zona con mayor número de impactos de rayos.	53
3.6 Municipio de Sincelejo-Sucre.....	56
3.6.1 Zona con mayor número de impactos de rayos.	56
3.7 Municipio de Valledupar-Cesar	59
3.7.1 Zona con mayor número de impactos de rayos.	59
3.8 Municipio de Bucaramanga-Santander.....	62
3.8.1 Zona con mayor número de impactos de rayos.	62
3.9 Municipio de Pereira-Risaralda	65
3.9.1 Zona con mayor número de impactos de rayos.	66
3.10 Municipio de Barranquilla-Atlántico.....	69
3.10.1 Zona con mayor cantidad de impacto de rayos.....	70
3.11 Municipio de Pasto-Nariño	73
3.11.1 Zonas con mayor número de impactos de rayos.....	73

3.12 Municipio de Cartagena-Bolívar.....	76
3.12.1 Zona con mayor número de impactos de rayos.	76
4. Conclusiones.....	80
Referencias Bibliográficas	82

Lista de Figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Mapa del nivel ceráunico que define el número de días al año en los cuales se escucha al menos un trueno.	21
<i>Figura 2.</i> Mapa de densidad de descargas a tierra para Colombia-2012(stroke/Km ² *año. El mapa de DDT reafirma que Magdalena medio, Choco y el Catatumbo, tienen la mayor actividad de rayos en Colombia.	22
<i>Figura 3.</i> Tipos de descargas entre nubes: i) Intranube; ii) Nube-ionosfera; iii) Internube.	25
<i>Figura 4.</i> Tipos de descarga a tierra: i) descendente negativa; ii) descendente positiva; iii) ascendente positivo; iv) ascendente negativo.	26
<i>Figura 5.</i> Mapa de eficiencia de la red de localización de rayos - LINET en Colombia. Los puntos negros indican la ubicación de cada sensor y las isocurvas indican el porcentaje de eficiencia. Usado con permiso de Keráunos S.A.S.	27
<i>Figura 6.</i> Ubicación estructuras elevadas e impactos de rayos en la ciudad de Barrancabermeja.	37
<i>Figura 7.</i> Zona con mayor impacto de rayos (adquirido de Google Earth).	38
<i>Figura 8.</i> Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Barrancabermeja-Yondó	40
<i>Figura 9.</i> Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Barrancabermeja: (a) 5. Estructura de transmisión con 76 impactos, (b) 7. Urbanización	

(Fábrica) con 65 impactos, (c) 9. Torre de telecomunicación con 62 impactos, (d) 9.

Refinería con 62 impactos, (e) 14. Hotel Super estrella con 46 impactos y (f) 16. Estructura de transmisión con 43 impactos..... 40

Figura 10. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Bogotá..... 44

Figura 11. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Bogotá: (a) 1. Parque habitacional Cedritos 32 impactos, (b) 1.Zona boscosa con 32 impactos, (c) 2. Torre de telecomunicación 1 con 28 impactos, (d) 3. Torre de telecomunicación 2 con 26 impactos, (e) 10. Edificios con 16 impactos, (f) 11. Museo Parque central con 13 impactos..... 44

Figura 12. Ubicación estructuras elevadas e impactos de rayos en Medellín 45

Figura 13. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Medellín. 48

Figura 14. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Medellín: (a) 1.Cerros padre Amaya con 417 impactos, (b) 5. Torre de Santa Helena con 95 impactos, (c) 2. Zona montañosa con 365 impactos, (d) 7. Torre de metro cable con 65 impactos y (e) 6. Banco popular con 72 impactos. 49

Figura 15. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Cali. 52

Figura 16. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Cali (a) 1. Cristo Rey con 111 impactos, (b) 4. Estructura de transmisión con 101 impactos, (c) 5. Torre de telecomunicación con 100 impactos, (d) 7. Estructura de transmisión con 83 impactos y (e) 9. Edificio Santa Rosa del Río con 27 impactos..... 52

Figura 17. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor

incidencia de rayos en la ciudad de Tunja. 55

Figura 18. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Tunja: (a)

1. Zona boscosa con 22 impactos (b) 5. Edificio Barlovento con 7 impactos, (c) 3. Mirador de la colina con 11 impactos y (d) 6. Torre Eskala con 6 impactos. 55

Figura 19. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor

incidencia de rayos en la ciudad de Sincelejo. 58

Figura 20. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Sincelejo:

(a) 1. Urbanización con 42 impactos, (b) 6. Estructura de Transmisión con 31 impactos (c) 5.

Edificio Magenta con 32 impactos, (d) 7. Banco de Bogotá con 30 impactos. 58

Figura 21. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor

incidencia de rayos en la ciudad de Valledupar. 61

Figura 22. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de

Valledupar: (a) 1. Zona Montañosa con 96 impactos, (b) 4. Refinería con 41 impactos, (c) 5.

Caja Agraria con 38 impactos, (d) 7. Torre de telecomunicación con 35 impactos y (e) 8. Torre de comunicaciones con 31 impactos. 61

Figura 23. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor

incidencia de rayos en la ciudad de Bucaramanga. 64

Figura 24. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de

Bucaramanga: (a) 4. Itacol con 12 impactos, (b) 9. Torre de telecomunicación con 9 impactos,

(c) 7. Edificio Puerto Mayor con 7 impactos y (d) 8. Torre Green con 6 impactos. 65

Figura 25. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor

incidencia de rayos en la ciudad de Pereira. 68

Figura 26. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Pereira:

(a)1. Zona Boscosa denominada Pueblo nuevo con 100 impactos, (b) 11. Torre de Transmisión con 43 impactos de rayos (c) 5. Torre Núcleo con 60 impactos y (d) 6. Edificio Pinares de Alameda con 51 impactos..... 68

Figura 27. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Barranquilla..... 72

Figura 28. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Barranquilla (a) 1. Zona Comercial (estructura) con 384 impactos (b) 3. Estructura de transmisión con 291 impactos, (c) 4. Estructura de Transmisión con 264 impactos, (d) 8. Estructura de Transmisión con 188 impactos, (e) 5. Torre de telecomunicación con 213 impactos, (f) 13. Hotel Barranquilla Plaza con 107 impactos y (g) 10. Puente Pumarejo con 176 impactos72

Figura 29. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de pasto. 75

Figura 30. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Pasto: (a)1. Zona boscosa (Mora Surco) con 31 impactos, (b) 3. Estructura de Transmisión con 19 impactos, (c) 6. Clínica los Andes con 4 impactos y (d) 8.Hotel Agualongo con 3 impactos..... 75

Figura 31. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Cartagena. 78

Figura 32. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Cartagena (a) Provincia de Tierra Grata, (b) Estructura de Transmisión con 66 impactos, (c) Estadio Jaime Morón con 40 impactos, (d) Torre de telecomunicación con 46 impactos y (e) Edificios Regata y Luna de Mar con 21 impactos..... 79

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Número de reportes, daños físicos y fallas en sistemas eléctricos y electrónicos por departamento.</i>	29
Tabla 2. <i>Eventos de rayos en sitios específicos del territorio nacional.</i>	30
Tabla 3 <i>Ciudades con población mayor a 200,000 habitantes para el año 2018. Coordenadas geográficas, Altura sobre el nivel del mar, densidad de rayos - DDT, área construida en km² y aeropuerto cercano.</i>	32
Tabla 4. <i>Estructuras elevadas analizadas en las ciudades de Barrancabermeja y Yondó del departamento de Santander.</i>	36
Tabla 5 <i>Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos.</i>	38
Tabla 6. <i>Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Bogotá, D.C con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.</i>	41
Tabla 7. <i>Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Bogotá.</i>	43
Tabla 8. <i>Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Medellín con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.</i>	46
Tabla 9. <i>Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Medellín.</i>	47
Tabla 10. <i>Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Cali con su respectiva latitud,</i>	

<i>longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.</i>	50
Tabla 11. <i>Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Cali.</i>	51
Tabla 12. <i>Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Tunja con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.</i>	53
Tabla 13. <i>Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Tunja.</i>	54
Tabla 14. <i>Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Sincelejo con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.</i>	56
Tabla 15. <i>Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Sincelejo.</i>	57
Tabla 16. <i>Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Valledupar con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.</i>	59
Tabla 17. <i>Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Valledupar.</i>	60
Tabla 18. <i>Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Bucaramanga con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.</i>	62
Tabla 19. <i>Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Bucaramanga.</i>	63
Tabla 20. <i>Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Pereira con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.</i>	66
Tabla 21. <i>Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Pereira.</i>	67

Tabla 22. <i>Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Barranquilla con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.</i>	69
Tabla 23. <i>Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Barranquilla.</i>	71
Tabla 24. <i>Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Pasto con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.</i>	73
Tabla 25. <i>Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Pasto.</i>	74
Tabla 26. <i>Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Cartagena con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.</i>	76
Tabla 27. <i>Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Cartagena.</i>	77

Resumen

Título: Caracterización de zonas y estructuras elevadas presentes en el territorio nacional con mayor cantidad de impactos de rayos (HOTSPOTS)*

Autor: Javier Alexander Mora Russi
Julián Rodrigo Rojas Avellaneda
Édison Andrés Soto Ríos**

Palabras Clave: Interacción suelo estructura, Amortiguamiento por radiación, Base fija, Base flexible, Cantidades de obra.

Descripción

El presente trabajo de grado se fundamenta en determinar los lugares donde se concentran la mayor cantidad de impactos de rayos (Hotspots) en sitios específicos del territorio nacional. Con ayuda de los programas Google Earth Pro y TCX Converter se localizaron las estructuras más altas de cada ciudad en estudio: Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena, Tunja, Bucaramanga, Barrancabermeja, Pasto, Sincelejo, Pereira y Valledupar obteniendo características como: coordenadas geográficas, altura, altitud, latitud, altura sobre el nivel del mar (msnm). Usando la información de actividad de rayos (nube-tierra) proporcionada por Red Colombiana de Detección Total de Rayos con tecnología LINET administrada por Keráunos SAS durante los periodos 2016, 2017, 2018, se caracterizaron los hotspots en cada una de las ciudades mencionadas anteriormente. Inicialmente se adquirió un conocimiento previo de parámetros que ayudaran a determinar dichas zonas tales como: densidad de descargas a tierra (DDT), nivel ceraunico (NC), formación propagación e incidencia de los tipos de descargas atmosféricas. La finalidad del presente trabajo de grado es dejar estudios sobre caracterización e impactos de rayos en estructuras elevadas, con el objetivo de ser una primicia en futuras investigaciones que busquen como mitigar los daños físicos y fallas en sistemas eléctricos y electrónicos. Dentro de los resultados obtenidos se encontró que no siempre los lugares donde se ubican las estructuras más altas son la de mayor incidencia de rayos. .

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
Director: Édison Andrés Soto Ríos Doctor en Ingeniería

Abstract

Title: Characterization of areas and elevated structures present in the national territory with the greatest amount of lightning impacts (HOTSPOTS)*

Author: Javier Alexander Mora Russi
Julián Rodrigo Rojas Avellaneda
Édison Andrés Soto Ríos **

Key Words: Rayos, Densidad de descargas a tierra (DDT), Nivel cerámico (NC), Estructuras, Análisis, Coordenadas geográficas, sitios específicos, Descargas atmosféricas

Description

The present grade work is based on determining the places where the greatest amount of lightning impacts (Hotspots) are concentrated in specific places of the national territory. With the help of the Google Earth Pro and TCX Converter programs, the highest structures of each city under study were located: Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena, Tunja, Bucaramanga, Barrancabermeja, Pasto, Sincelejo, Pereira and Valledupar obtaining characteristics such as: Geographic coordinates, height, altitude, latitude, height above sea level (masl). Using the information of lightning activity (cloud-land) provided by the Colombian Network of Total Lightning Detection with LINET technology managed by Keráunos SAS during the periods 2016, 2017, 2018, hotspots were characterized in each of the cities mentioned above. Initially, prior knowledge was acquired of parameters that would help determine these areas such as: earth discharge density (DDT), ceramic level (NC), propagation formation and incidence of atmospheric discharge types. The purpose of this degree work is to leave studies on characterization and impacts of lightning in high structures, with the aim of being a first in future research that seeks to mitigate physical damage and failures in electrical and electronic systems. Among the results obtained, it was found that not always the places where the highest structures are located are those with the highest incidence of lightning.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
Director: Édison Andrés Soto Ríos Doctor en Ingeniería

Introducción

En zonas tropicales, las tormentas eléctricas ocurren con mayor frecuencia con respecto a las zonas más templadas, siendo así Maracaibo Venezuela es el punto de mayor densidad de descargas a tierra, con un promedio de 233 rayos por kilómetro cuadrado (km²) al año. África central es la zona con mayor actividad de rayos formados por el contraste de temperatura del aire del suelo y las altas capas de la atmosfera, generando que el aire caliente y húmedo choque con el frío (Puig, 2004).

Colombia es una de las zonas más activa del mundo debido a las tres cordilleras que la atraviesan, generando una alta densidad de descargas atmosféricas entre el Valle del río Magdalena y el Catatumbo, ya que el país se encuentra en la zona de convergencia intertropical en la que confluyen los vientos alisios del sureste y del noreste. Investigadores y expertos en el tema indican que Colombia ha sido un país de rayos y que se calcula que en los 32 departamentos caen alrededor de 8 millones de descargas atmosféricas al año (Sanchez, 2002). Es de resaltar que la densidad de descargas en algunos lugares del país está entre los 60 y 80 rayos por kilómetro cuadrado al año. Se muestra que la región central Colombiana presenta un comportamiento bimodal, involucrando la implementación de políticas de prevención en: escenarios deportivos, parques, iglesias, edificios y estructuras elevadas (eléctricas y telecomunicaciones). Según la literatura, la mayor actividad de rayos en Colombia se da en los meses de abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre en el cual se registran más de 900.000 rayos, y los meses de enero, febrero y diciembre son los de menor actividad de rayos (Committee & Council, 1986).

El estudio del comportamiento de tormentas eléctricas es de particular importancia para elaborar planes encaminados a la protección de vidas humanas y diversos sectores de la economía. Estudios realizados en un periodo de cuatro décadas muestran que Colombia es un país que se ve sometido a diferentes fenómenos naturales, tal como las descargas eléctricas atmosféricas, hacen vulnerables los dispositivos de protección instalados en estructuras elevadas ocasionando daños materiales, pérdida económica y deterioro del patrimonio natural en muchas ocasiones. Por lo tanto, es indispensable continuar en la búsqueda científica en torno a la caracterización del fenómeno atmosférico, de tal forma que se logre entender en la medida que sea posible su comportamiento físico y de esta forma aportar estrategias metodológicas y preventivas para mitigar daños y perjuicios generados por dicho fenómeno natural. Estos problemas afectan directamente a diferentes sistemas de aviación, torres de telecomunicación, al igual que el transporte de energía eléctrica, espacios deportivos o escenarios con alta concentración de personas como lo son hospitales, zonas residenciales, centros comerciales y refinerías (Aranguren D. et al., 2013).

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente estudio pretende determinar los lugares donde se concentran la mayor cantidad de impactos en sitios específicos del territorio nacional, mediante información de rayos y ubicación de estructuras elevadas. Debido a la alta actividad cerámica de la región es de suma importancia estudiar y determinar los sitios de mayor densidad de descargas eléctricas o hotspots para de esta forma evidenciar si en estos puntos se encuentran estructuras elevadas como torres de transmisión, antenas de telecomunicación y edificios. Considerando que, estudios de evaluación de riesgos afirman que las estructuras en comparación con sitios públicos y espacios abiertos, son las más afectadas por impacto de rayos. Dicho lo anterior, se planteó la hipótesis de que las estructuras más elevadas eran la de mayor incidencia de rayos. Esta es la base

para realizar el estudio de la interacción de rayos con dichas estructuras y además brinda una noción de los parámetros que deben considerarse para el diseño de la protección contra rayos de las mismas.

1. Antecedentes del estudio de descargas atmosféricas en Colombia

Para el desarrollo del presente estudio es de vital importancia tener conocimientos sobre la metodología y procedimientos utilizados en la obtención de la información suministrada, como son las investigaciones acerca de la densidad de descargas a tierra, comportamiento y formación de tipos de descargas eléctricas, sistema de localización de rayos, daños físicos, fallas en sistemas eléctricos y electrónicos ocasionados por impacto de rayos y los lugares donde se presentaron los eventos.

1.1 Densidad de descargas a tierra (DDT) y Nivel Cerámico (NC).

Las primeras investigaciones sobre caracterización de impacto de rayos nacen con la implementación del primer mapa que indica los niveles cerámicos, en los años 1974 a 1988. (NC)

El nivel cerámico es un parámetro sobre la actividad de rayos en una región determinada y se mide en número de días de tormenta al año, ver Figura 1. Un día de tormenta se define, para este parámetro, como aquel en el cual es oído por lo menos un trueno, en el año 1990 se actualizó. Actualmente se utiliza la norma de protección contra rayos, NTC 4552 de 2008, la cual se

desarrolló en un periodo de 4 años, por el instituto Colombiano de Normas Técnicas, Icontec (Committee & Council, 1986). Con las limitaciones de los mapas ceráneos, se empezó a utilizar el parametro Densidad de Rayos (DDT) (ecuación 1), que determina el número de rayos (nube-tierra) que impactan en un área de un kilómetro cuadrado al año. Esta medición muestra mayor información, no solo sobre la actividad de rayos en un lugar determinado si no también de su intensidad. Este se calcula con equipos contadores de rayos y sistemas de localización, o mediante sistemas satelitales y con ecuaciones que relacionan la densidad de descargas a tierra con el Nivel Ceráneo (Bazelyan & Raizer, 2000). Ver Figura 2.

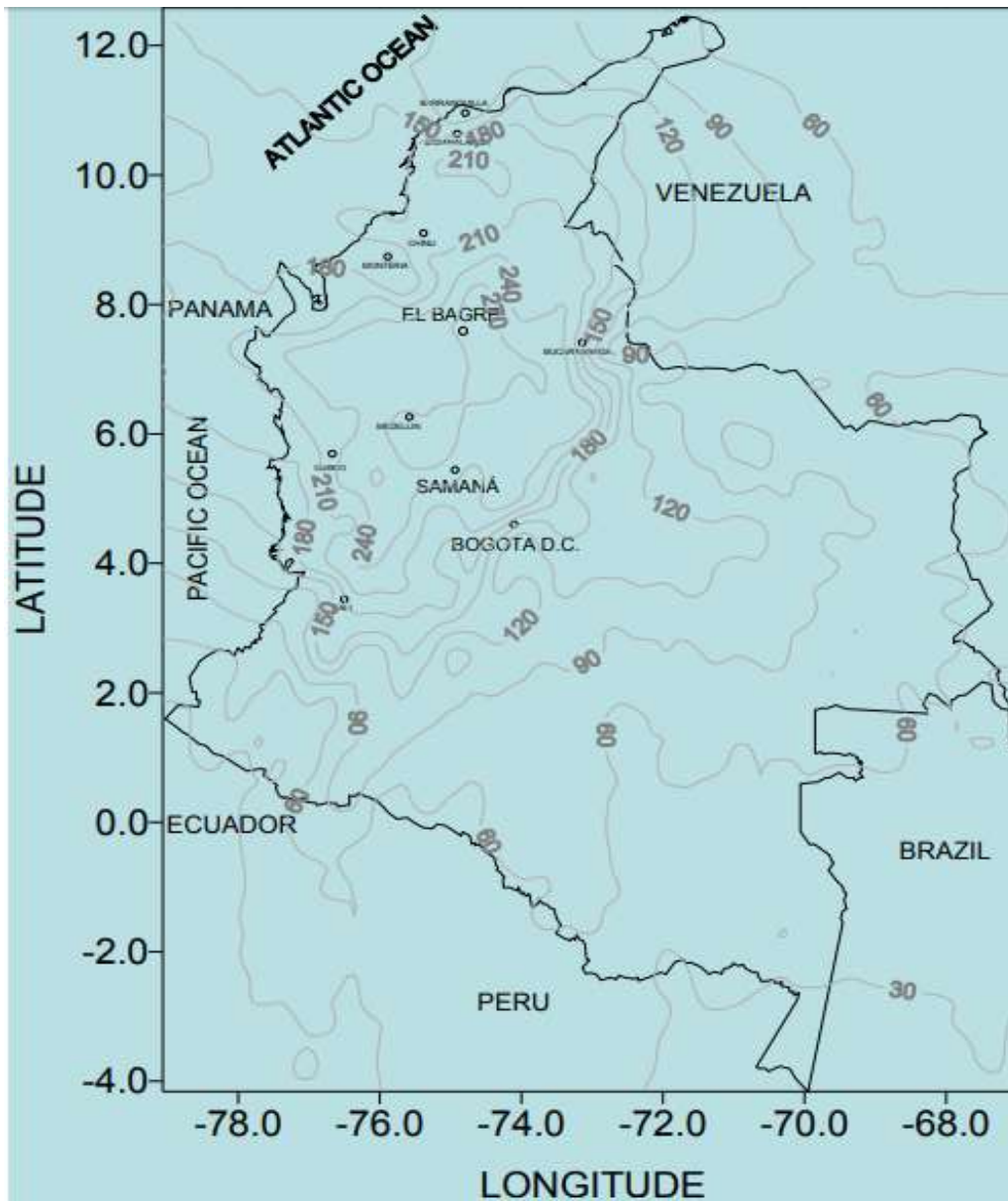


Figura 1. Mapa del nivel cerámico que define el número de días al año en los cuales se escucha al menos un trueno.

$$DDT = K \times NC^a \tag{1}$$

Donde **K** y **a** son constantes

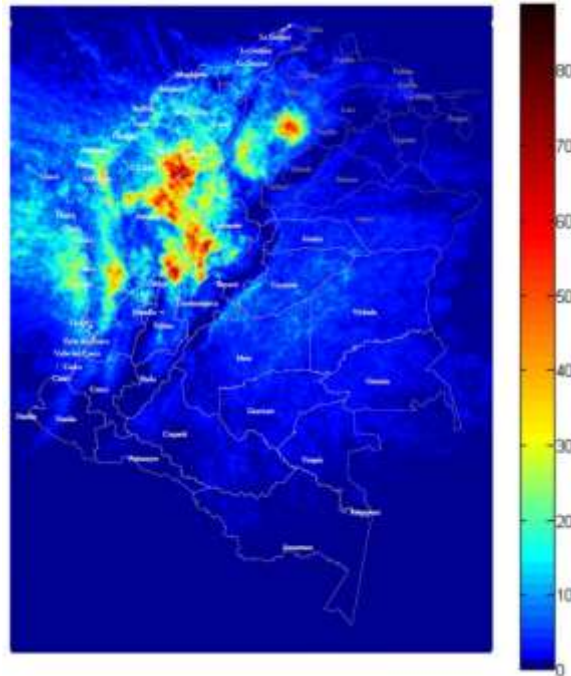


Figura 2. Mapa de densidad de descargas a tierra para Colombia-2012(stroke/Km²*año. El mapa de DDT reafirma que Magdalena medio, Chocó y el Catatumbo, tienen la mayor actividad de rayos en Colombia. Adaptado de: Younes C. & Torres, H. (2010) Caracterización de los parámetros del rayo en Colombia. Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

1.2 Comportamiento y formación de los tipos de descargas atmosféricas

Este capítulo aborda los tópicos generales del trabajo realizado. Se presenta el comportamiento, formación y tipos de descargas atmosféricas.

Comportamiento de descargas atmosféricas:

El comportamiento de una descarga atmosférica, se presenta debido al fenómeno de convección es decir cuando los vientos van de la una superficie a una de menor temperatura, estos son vapores de agua que llevan una estructura atómica ya sean protones y/o electrones, que van ascendiendo y cuando están a una altura determinada del orden de 5 a 10 km pasa a un estado sólido, en esencia hielo, esto debido a las bajas temperaturas y esto hace que por gravedad

comiencen a descender pero siguen ascendiendo estos vapores, donde se generan colisiones que permiten la formación de cargas que se disocian y se forman nubes que se distinguen por su color, dado que poseen gran cantidad de cargas eléctricas en forma de energía o fuerza que hacen que a un valor determinado de concentración de cargas, se genere un arco eléctrico y comienza a generarse propiamente el rayo (Torres-sánchez, 2014).

Tormentas eléctricas: se producen por condiciones de inestabilidad atmosférica y se generan por la exposición directa de la tierra a los rayos del sol, las características del relieve donde se inician son zonas montañosas desplazándose posteriormente a zonas planas, la tormenta de origen ciclónico impulsa la formación y desplazamiento de la nube de tormenta (MacGorman, MacGorman, & Rust, 1998).

El proceso de formación de una célula tormentosa consta de tres fases principales:

- **Fase de desarrollo:** Se forma la nube cumulo producto del ascenso del aire ácido y húmedo de las cargas inferiores de la atmosfera que se enfrían y se condensan producidas por condiciones de inestabilidad en la atmósfera.

Si las corrientes ascendentes siguen alimentándose la nube sigue creciendo y habrá existencia de cristales de hielo con temperatura de 0°C, con un crecimiento hasta la tropopausa a más de 10 km de altura y se le denominara cumulonimbo donde se producen las primeras precipitaciones y descargas eléctricas entre distintas zonas de la nube (relámpagos).

- **Fase de madurez:** la cima del cumulonimbo se expande horizontalmente hasta la tropopausa en forma de yunque allí se originan las precipitaciones de lluvia, nieve o granizo que producen las primeras descargas eléctricas o rayos desde la nube hasta la tierra alcanzando su máximo desarrollo.

- **Fase de disipación:** es donde la alimentación del cumulonimbo es interrumpida por la disipación de las corrientes descendentes, ocasionando que las precipitaciones y descargas eléctricas se desintegren y las ráfagas de viento disminuyan progresivamente.

Tipos de descargas eléctricas atmosféricas:

Las descargas eléctricas generadas en la atmosfera de la Tierra pueden ser debido las nubes cumulonimbos, erupciones volcánicas, tormentas de polvo y tormentas de nieve, en este trabajo se hizo referencia a las descargas eléctricas producidas debido a las nubes cumulonimbos.

Categorías principales:

- Descargas a tierra.
- Descargas a nube.

Las descargas eléctricas que tienen contacto se conocen como descargas a tierra y el resto se conocen como descargas entre nubes. Las descargas entre nubes se pueden dividir en tres categorías:

- Dentro de una misma nube (intranube o Intra-cloud (IC) en inglés).
- Entre una nube y otra (internube Cloud-to-Cloud (CC) en inglés).
- Entre nube y aire (Air discharge en inglés).

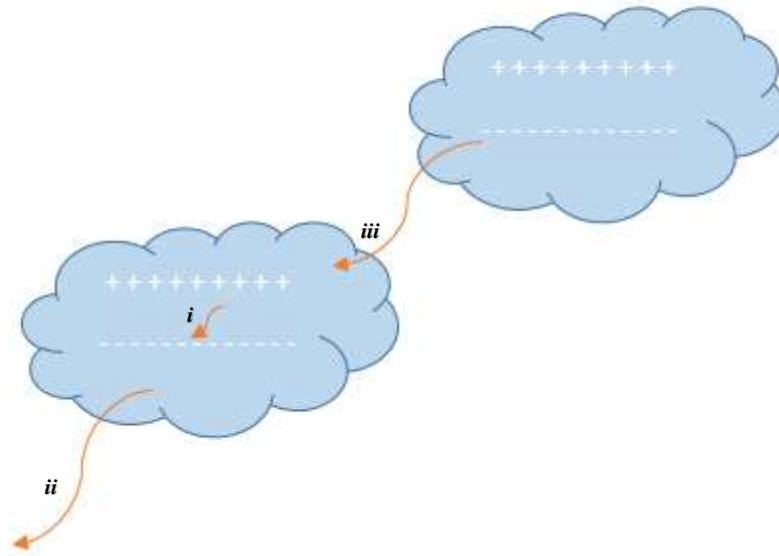


Figura 3. Tipos de descargas entre nubes: i) Intranube; ii) Nube-ionosfera; iii) Internube.

Una descarga a tierra se puede generar en cuatro categorías dependiendo de la polaridad de la carga en tierra y su punto de inicio. Estas cuatro categorías se ilustran en la Figura 4, descendente negativa, descendente positiva, ascendente negativo y ascendente positivo. La polaridad de la descarga se basa en la polaridad de la carga traída a la tierra desde la nube (Younes & Torres, 2002).

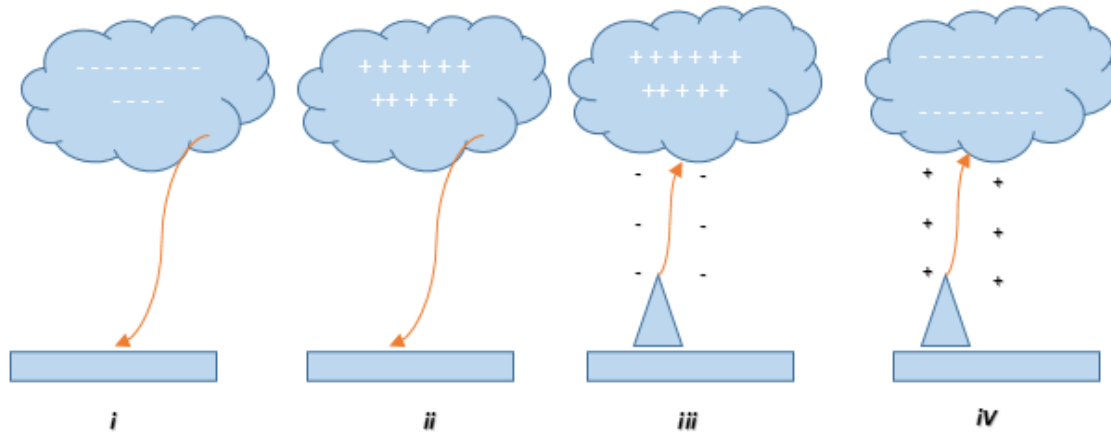


Figura 4. Tipos de descarga a tierra: i) descendente negativa; ii) descendente positiva; iii) ascendente positivo; iv) ascendente negativo.

1.3 Eficiencia de detección del sistema de localización de rayos – LINET

En septiembre de 2011 entra en operación la red de localización y detección de rayos (**LINET**). Esta tecnología fue desarrollada en la Universidad de Múnich Alemania y tiene la capacidad de ofrecer servicios asociados a la detección, medición, predicción y protección contra rayos tanto nube-tierra (CG) como rayos intranubes (IC), brindando soluciones en monitoreo y predicción de tormentas eléctricas que ocurren en el territorio colombiano. La densidad de descarga a tierra se estudió por primera vez en Colombia por el programa de investigación sobre adquisición y análisis de señales (PAAS), con el uso de un sensor de tormenta TSS-420 instalado con autorización en Bogotá (Body, 2019, pág. 61).

En las últimas décadas Colombia ha implementado la red **LINET** para obtener información de las descargas atmosféricas a tierra, la cual es administrada por Keráunos SAS. Esta tiene la capacidad de monitorear y entregar parámetros, tales como: el tiempo de ocurrencia, latitud, longitud, amplitud de la corriente de retorno, polaridad, tipo de descarga: intranube o nube tierra.

Para la obtención de estos datos se ubicaron más de 30 sensores en lugares estratégicos del territorio nacional donde la separación entre sensores varía entre 120 a 420 km (Aranguren D. et al., 2013). Con el fin de caracterizar la actividad de descargas eléctricas atmosféricas en una región, se ha puesto en funcionamiento el sistema de localización y eficiencia, ver Figura 5. Los puntos negros representan los sensores y las isocurvas indican el porcentaje de eficiencia la cual se obtiene mediante la captación de videos y fotografías de las descargas eléctricas atmosféricas capturadas por la cámara de detección las cuales se clasifican en dos tipos:

- A. Relámpagos: Únicamente se observa el destello en los videos capturados, pero no es posible observar el punto de impacto ni el canal de descarga del rayo.
- B. Canal de descarga visible: Se puede observar el canal de descarga del rayo desde la nube hasta el punto de impacto a tierra.

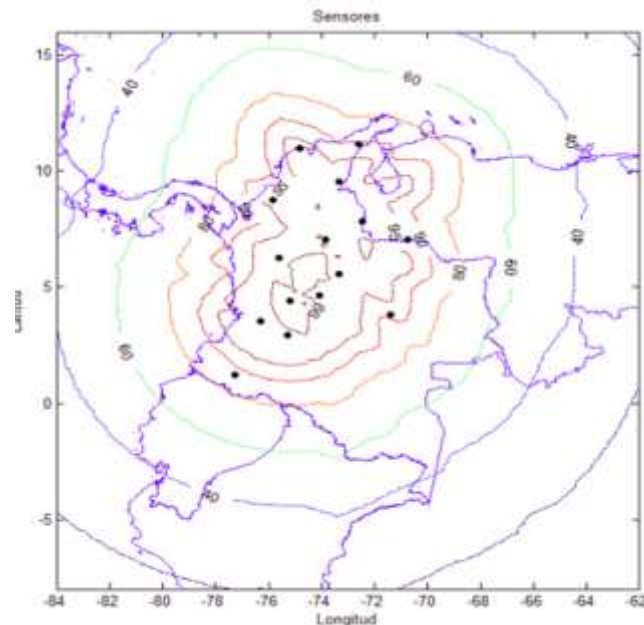


Figura 5. Mapa de eficiencia de la red de localización de rayos - LINET en Colombia. Los puntos negros indican la ubicación de cada sensor y las isocurvas indican el porcentaje de eficiencia. Usado con permiso de Keráunos S.A.S.

La técnica de detección de la red LINET, tanto para las descargas intranube y las descargas nube-tierra se define por la técnica del tiempo de arribo, por sus siglas en ingles TOA- time of arrival- usando unas modificaciones para obtener resultados en 3D (Perez Perez, 2014). Esta suministra información sobre su posición horizontal (latitud y longitud) y su posición vertical (altitud). Adicionalmente, los rayos con corrientes menores a 10 kA son detectables logrando así una mejora en la eficiencia de la detección de rayos. En la zona central colombiana prevalece la detección de rayos, ya que revela una corriente entre los 6 kA y los 8 kA, teniendo en cuenta que hay pequeñas ubicaciones donde se detectan rayos hasta con una corriente mínima de 2 kA, posteriormente en las zonas del Magdalena medio y de la Llanura del caribe se describen rayos con una corriente mínima de 4 kA. La corriente mínima detectable es la metodología que describe la eficiencia de detección (Cortés Cortés, 2018).

1.4 Daños físicos y fallas en sistemas eléctricos y electrónicos.

Los principales daños que se pueden presentar en los sistemas eléctricos y electrónicos son: fallas en líneas de transmisión, líneas de distribución, acometidas y transformadores, por otra parte los daños electrónicos se ven reflejados en los sistemas de protección. Por ende, se ha recopilado información de eventos relacionados con descargas eléctricas atmosféricas (rayos) entre los años 2010 y 2015, este último año hasta el mes de junio. La información proviene principalmente de noticias, periódicos virtuales nacionales y regionales. Adicionalmente, información de los años 2010 y 2012 proveniente de la base de datos de la Dirección de Preservación de la Integridad y Seguridad del Ejército (DIPSE). De las fuentes de información mencionadas se extraen datos como

fecha del reporte y del evento, lugar de ocurrencia y un resumen de la descripción del evento (Cruz Mosquera, 2015).

Para efectos del estudio se tomaron 11 de los 32 departamentos del territorio nacional, debido a que allí se concentra la mayor cantidad de población y estructuras elevadas que son propensas a impactos de rayos (HOTSPOTS). Ver Tabla 1

Tabla 1.

Número de reportes, daños físicos y fallas en sistemas eléctricos y electrónicos por departamento.

Departamento	Tipo de daños	
	Físicos	Eléctricos y electrónicos
Antioquia	26	7
Sucre	12	5
Valle del Cauca	10	3
Bolívar	6	2
Cesar	9	5
Cundinamarca	8	4
Boyacá	4	1
Nariño	1	0
Risaralda	4	2
Santander	7	2
Atlántico	7	3

1.5 Lugar del evento

Según investigaciones del lugar donde ocurrieron los eventos de rayos, se tomaron 3 grandes grupos: los que ocurrieron en estructuras, lugares públicos y espacios abiertos. Cada una de las categorías mencionadas se divide a su vez en subcategorías. Dentro de los eventos que ocurrieron en estructuras están: viviendas y edificaciones, aeropuertos y otros. Para los clasificados en los sitios públicos se encuentran: la vía pública y los que se presentaron en canchas de fútbol, estadios,

playas, parques y cementerios. Finalmente, para los eventos que ocurrieron en espacios abiertos están: fincas y campo abierto y lo que se presentaron en ríos, mar y lagunas, como se muestra en la Tabla 2, la cual presenta un reporte de los 32 departamentos, donde se evidencia un total de 137 daños físicos, donde se muestra que la mayor cantidad de eventos relacionados a impactos de rayos involucran daños físicos y fallas en sistemas eléctricos o electrónicos se registraron en estructuras (Cruz Mosquera, 2015).

Tabla 2.

Eventos de rayos en sitios específicos del territorio nacional.

Lugar de eventos		Tipos de daños	
		Físicos	Eléctricos y Electrónicos
En estructuras	Edificaciones	66	20
	Aeropuertos	7	3
	Otros	17	9
Sitios Públicos	Vías publicas	26	14
	Estadios, playas, parques	6	2
Espacios abiertos	Fincas/campos	13	1
	Ríos, Mares, Lagos	2	0
Total		137	49

2. Metodología para el análisis de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos presentes en el territorio nacional

2.1 Selección de los departamentos y sus respectivas ciudades de análisis

Para dar inicio a este trabajo de investigación fue necesario conocer el comportamiento de descargas atmosféricas y la zonas con mayor incidencia en el territorio colombiano, teniendo en cuenta que la inestabilidad atmosférica, nivel Ceráunico y Densidad de Descargas a tierra, permiten establecer que tan incidentes son ante este fenómeno. En Colombia, el estrechamiento de las cadenas montañosas, principalmente en las Cordilleras Oriental (Noroeste de Cundinamarca y Sudoeste de Boyacá) y Central (Noreste de Caldas, Sudeste de Antioquia), y los vientos que se aproximan a ellas, marcan la principal influencia en la definición del mayor o menor nivel Ceráunico y por tanto de la mayor actividad eléctrica atmosférica. Estudios recientes demuestran que la mayor actividad de rayos en Colombia se presentan en las zonas del Magdalena medio el Catatumbo; Y en los departamentos de Boyacá, Bolívar, Antioquia, Cundinamarca, Santander, Chocó (Aranguren D. et al., 2013). Teniendo en cuenta lo anterior, los departamentos que hicieron parte del estudio son: Cundinamarca, Antioquia, Valle del Cauca, Boyacá, Sucre, Cesar, Santander, Risaralda, Atlántico, Nariño y Bolívar.

2.2 Selección de estructuras elevadas y lugares de evento, clasificación y localización geográfica

Para la selección de las ciudades en estudio, se tuvo en cuenta la población y el área construida, dado que la información obtenida de la Tabla 2, afirma que las estructuras en comparación con sitios públicos y espacios abiertos, son las más afectadas por impacto de rayos. Por esta razón, se planteó la hipótesis de que las estructuras más elevadas eran la de mayor incidencia de rayos. En consecuencia, se realizó la selección de las estructuras más elevadas en las ciudades en estudio, donde se encuentran: Edificios, estadios, Hospitales, torres de telecomunicación, estructuras de transmisión, refinerías y aeropuertos, puesto que, por su altura, podrían ser vulnerables a descargas atmosféricas que pueden ocasionar daños en los sistemas eléctricos que poseen dichas estructuras. La Tabla 3 expone las características como Coordenadas geográficas, altura sobre el nivel del mar, densidad de descargas a tierra- DDT de cada departamento, área construida en km^2 y aeropuerto cercano. Los datos de DDT fueron extraídos del trabajo de grado Evaluación del Riesgo por Rayos incluyendo un Sistema de Alarma de Tormentas (SAT) en Colombia.

Tabla 3

Ciudades con población mayor a 200,000 habitantes para el año 2018. Coordenadas geográficas, Altura sobre el nivel del mar, densidad de rayos - DDT, área construida en km^2 y aeropuerto cercano.

Departamento	Ciudad	Latitud	Longitud	Población	Altitud	DDT	Área km^2	Aero puerto
Cundinamarca	Bogotá D.C	4,71	-74,07	8.200.000	2630	3.08	270	1
Antioquia	Medellín	6,25	-75,58	2.508.452	1495	11.3	86	1
Valle del Cauca	Cali	3,45	-76,53	2.471.474	1018	4.52	68	1
Boyacá	Tunja	5.3	-73.2	202 939	2822	3.21	12	0
Sucre	Sincelejo	9,3	-75,39	279.031	213	9.46	21	1

Departamento	Ciudad	Latitud	Longitud	Población	Altitud	DDT	Área km ²	Aero puerto
Cesar	Valledupar	10,46	-73,3	483.25	168	6.66	10	1
Santander	Bucaramanga	8,08	-72,76	528 694	959	1.52	20	1
	Barranca bermeja	7.3	-73.5	191 616	75	2.5	15	1
Risaralda	Pereira	4.81	-75.7	476 660	1411	21.52	16	1
Atlántico	Barranquilla	10.99	-74.8	1 232 766	18	2.77	35	1
Nariño	Pasto	1.21	77.28	455 863	2427	0.92	13	1
Bolívar	Cartagena	10.39	-75.49	1 036 412	2	7.95	22	1

2.3 Software QGIS

QGIS 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). Desde el inicio del proyecto en el año 2002. QGIS ofrece muchas funcionalidades SIG comunes proporcionado por las características principales y complementos, se puede crear, modificar, visualizar información geoespacial, importar y exportar archivos de datos de otros formatos; por medio de la importación de archivos de texto delimitado, el cual permitió ubicar los datos de las coordenadas GPS de la base de datos de la actividad de rayos brindados por la red LINET de las zonas de interés y usando las herramientas de selección por localización de QGIS, se procesaron los datos descartando los impactos que no incidían en el departamento y se logró individualizar la actividad dentro de cada municipio de Colombia para realizar un estudio más específico (Oliver, 2013).

La versión que se usó para el desarrollo de este trabajo de grado fue QGIS 3.8.3 Zanzibar, la cual se lanzó en el año 2019, otras versiones también han llevado el nombre de la localidad terrestre de las versiones anteriores como: Wrocław, Lisboa, Dufour, Valmeira, Brighton, Wien, Pisa, Lyon, Essen, y Nodebo, la razón de nombrar las de QGIS es para disminuir los riesgos legales.

2.4 Relación de datos de impactos procedentes de la red LINET y localización geográfica mediante el software QGIS

En el presente trabajo de grado se utilizó información registrada por la red de detección de rayos **LINET**, la cual es propiedad de Keráunos SAS. Esta red cuenta con registros de impactos de rayos (nube-tierra) en el territorio nacional desde el año 2011 hasta el año 2019. Para efectos del presente trabajo se tuvo en cuenta los años 2016, 2017 y 2018.

Dado que la información brindada de impactos de rayos (nube-tierra) abarcaba un perímetro mayor al área de la ciudad en estudio, aquellos impactos que no incidían en la zona de análisis fueron descartados mediante la herramienta (clip) del programa QGIS, que permite realizar una superposición entre la capa del mapa de la ciudad y la capa de impacto de rayos.

2.5 Ubicación de polígonos de 600 metros en los municipios a analizar.

Para la caracterización de las zonas con mayor incidencia de rayos nube-tierra, se crearon polígonos rectangulares con espaciados verticales y horizontales de 600 metros sobre la zona del municipio de interés, estas medidas fueron tomadas debido a que la Red de localización LINET tiene en promedio un error de localización de 250 metros de radio en que un rayo impacte en un área determinada. La ubicación de estos polígonos rectangulares se realizó mediante la función (Crear Cuadrícula) que posee el programa QGIS que permite hacer la superposición entre la capa de la cuadrícula y la capa del mapa de la ciudad. Resaltando que, para la correcta ubicación de esta herramienta, fue necesario establecer un centroide de la ciudad.

Cabe aclarar, que inicialmente se implementó una capa con circunferencias de 300 metros de radio dando como resultado errores en la caracterización de rayos en las estructuras en estudio, ya que no registraban completamente la cantidad de impactos.

2.6 Obtención del total de impactos por Cuadrícula

Mediante la herramienta análisis de puntos del programa QGIS, que permite enumerar cada polígono rectangular e individualizar la cantidad de impactos, se logró localizar las zonas Hotspots e identificar las cifras de descargas atmosféricas en estos sitios. Así mismo, se determinó el número de impactos que se encuentran ubicados dentro del área de 600 metros de cobertura del polígono rectangular, donde existe presencia de estructuras elevadas que reciben impactos que pueden ser considerados directos, en razón a la cercanía con las mismas.

3. Resultados de la caracterización de los sitios específicos y estructuras elevadas con mayor cantidad de impactos de rayos en Colombia

Usando las herramientas de investigación de QGIS y su selección por ubicación, se identificaron los datos de la actividad de rayos en cada una de las ciudades de interés, se realizó la tabulación en Excel y se procesaron los datos obtenidos en cada uno de los departamentos, haciendo una relación entre la información de impacto de rayos en Colombia obtenidos por la empresa Keráunos y las estructuras elevadas en estudio, partiendo de la metodología mencionada anteriormente.

3.1 Municipios Barrancabermeja Yondó-Santander

En la Tabla 4 se muestran las estructuras elevadas en el municipio de Barrancabermeja con su respectiva latitud, longitud, altura en metros y altura sobre el nivel del mar; Así mismo, la DDT dada en número de rayos por kilómetro cuadrado por año, altura sobre el nivel del mar y nivel Ceráunico que representa número de días al año en los cuales es oído por lo menos un trueno en el departamento de Santander. Dentro de estas estructuras se encuentran urbanizaciones, estadio de fútbol, hospitales, centros comerciales, puentes, estructuras de transmisión, torres de telecomunicación y refinerías.

Tabla 4.

Estructuras elevadas analizadas en las ciudades de Barrancabermeja y Yondó del departamento de Santander.

Departamento	Ciudad	DDT (descargas / km ² por año)	NC (días)	Altitud (msnm)
Santander	Barrancabermeja	2.5	84.4	75
Estructuras	Latitud	Longitud	Altura sobre el nivel del mar (m)	Altura de la estructura (m)
Hotel Súper Estrella	7°3'37.62" N	73°52'9.40" O	88	48
Terzetto Living	7°3'37.59" N	73°52'3.06" O	84	43
Portobello Condominio	7°3'51.33" N	73°51'16.83" O	85	43
Edificio Plaza San Pedro	7°4'17.51" N	73°51'26.26" O	81	43
Barvento	7°3'39.24" N	73°51'36.93" O	85	41
Park 48	7°3'31.63" N	73°51'18.62" O	84	40
Palmetto Condominio	7°4'32.33" N	73°51'3.27" O	86	37
Torres de San Francisco	7°3'38.29" N	73°50'54.16" O	80	33
Vivero Club	7°2'26.71" N	73°50'6.48" O	96	33
C.C San Silvestre	7°4'1.65" N	73°51'28.27" O	83	27

El programa QGIS permitió relacionar los datos de densidad de descargas eléctricas en un periodo de tres años (2016, 2017, 2018) y las estructuras elevadas mencionadas en la Tabla 4, mediante la función *añadir capa de texto delimitado*. La Figura 6, muestra la ubicación de las estructuras (cuadros verdes) y la cantidad de impactos de rayos nube-tierra sobre el municipio (puntos naranjas).

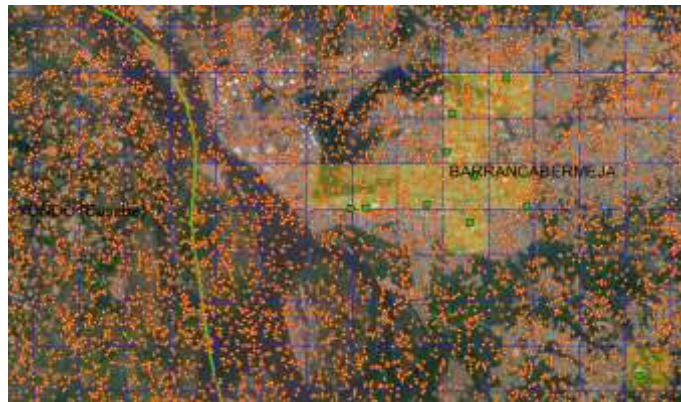


Figura 6. Ubicación estructuras elevadas e impactos de rayos en la ciudad de Barrancabermeja.

3.1.1 Zona con mayor número de impactos de rayos. Mediante la Herramienta *análisis de puntos* del programa QGIS que permite enumerar los polígonos rectangulares de todo el mapa en estudio e individualiza la cantidad de impactos, se determinó que la zona con mayor densidad de descargas es de 99. En esta zona de mayor impacto se concentra una gran densidad de zonas boscosas, se llamó de esta manera ya que no es posible determinar la existencia de estructuras en este sitio y es visible claramente la abundancia de vegetación, dado que la exploración a través de Google Street View no permite divisar más a profundidad dicho terreno. Esta zona recibe el nombre Chinchorrera y se localiza en los límites de Yondó y a la orilla del Río Magdalena. Ver Figura 7.



Figura 7. Zona con mayor impacto de rayos (adquirido de Google Earth).

En la Tabla 5 se presentan las zonas con alta densidad de rayos en el municipio ubicados de mayor a menor, resaltando en negrilla las zonas con las estructuras elevadas mencionadas en la Tabla 4. De los resultados obtenidos, se puede observar que la Torre San Francisco de 33 m de altura fue la estructura con mayor cantidad de impactos de rayos de las estructuras en análisis, 62. Sin embargo no corresponde a la estructura más elevada de las analizadas, tal como el Hotel Súper Estrella de 48 metros de altura, que presento 46 impactos. Esto evidencia que no siempre las estructuras más altas son la de mayor incidencia de rayos.

Tabla 5

Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos.

Ítem	Tipo de zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
1	Zona boscosa	97	6.873703°, -74.068817°	-
2	Zona boscosa	90	6.916841°, -74.022453°	-
3	Zona boscosa	85	6.912057°, -74.012220°	-
4	Zona boscosa	80	6.903664°, -74.007063°	-
5	Estructura de Transmisión	76	7.082800°, -73.893400°	40-45
6	Urbanización (Fábrica)	76	7.056553°, -73.817340°	10
7	Zona boscosa	65	7.071987°, -73.834493°	20

Ítem	Tipo de zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
8	Zona boscosa	63	7.101183°, -73.846813°	-
	-Estructura de transmisión		7.076283°, -73.897708°	40-45
	-Torre San Francisco		7.0606361°, -73.848377°	33
9	-Torre de telecomunicación	62	7.061251°, -73.847784°	40
	-Edificio (8 pisos)		7.060979°, -73.849079°	24
	-Refinería		7.074495°, -73.882895°	-
10	Urbanización	58	7.079260°, -73.850039°	-
	-Edificio (5 pisos)		7.071651°, -73.858373°	15
11	-Edificio plaza San Pedro	55	7.0606361°, -73.84837°	43
	-Edificio Barvento		7.060954°, -73.8602583°	41
12	-Palmetto Condominio	52	7.0756472°, -73.850908°	37
	-C.C San Silvestre		7.067125°, -73.857852°	27
13	Urbanización (5 pisos)	50	7.067764°, -73.861351°	15
14	Hotel Super Estrella	46	7.06045°, -73.869277°	48
15	Terzetto Living	44	7.0604416°, -73.867516°	43
16	Estructura de Transmisión	43	7.081349°, -73.904324°	40-45
	-Portobello Condominio		7.0642583°, -73.85467°	43
17	-Vivero Club	38	7.0407527°, -73.835133°	33
18	Park 48	38	7.0587861°, -73.855172°	40

Gracias a las coordenadas obtenidas de la Tabla 5, con el programa QGIS se localizaron las zonas con mayor impacto de rayos en la ciudad de Barrancabermeja, teniendo en cuenta que las estructuras elevadas y sitios específicos encontrados están ubicados por colores, estructuras en estudio (color morado), zonas boscosas (color verde), edificios (color azul), urbanizaciones (color naranja), estructuras de transmisión (color rojo), refinerías (color café) y torres de telecomunicación (color rosa), respectivamente, ver Figura 8. En la Figura 9 se presentan algunos de los sitios de la ciudad con mayor impactos de rayos, con su respectivo ítem al que pertenece cada imagen.

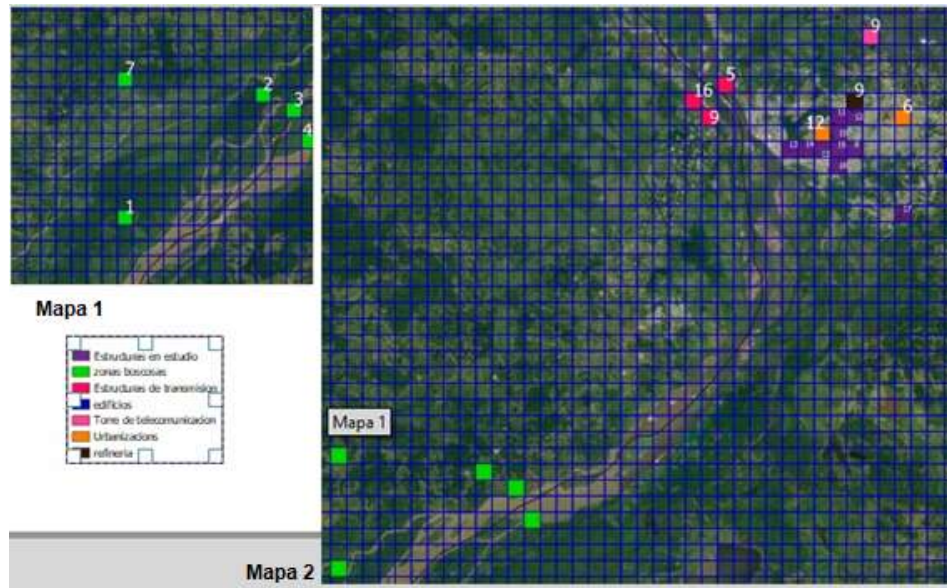


Figura 8. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Barrancabermeja-Yondó



Figura 9. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Barrancabermeja: (a) 5. Estructura de transmisión con 76 impactos, (b) 7. Urbanización (Fábrica) con 65 impactos, (c) 9. Torre de telecomunicación con 62 impactos, (d) 9. Refinería con 62 impactos, (e) 14. Hotel Super estrella con 46 impactos y (f) 16. Estructura de transmisión con 43 impactos.

Para la caracterización de las ciudades en estudio de este trabajo de investigación, se aplicó la misma metodología usada en los municipios de Barrancabermeja y Yondó; adicionalmente se utilizaron las mismas técnicas y algoritmos utilizados con el Software QGIS. Teniendo en cuenta lo anterior, se presentan los resultados para las ciudades de Barranquilla, Bogotá, Bucaramanga, Cali, Cartagena, Medellín, Pasto, Pereira, Sincelejo, Tunja y Valledupar.

3.2 Ciudad de Bogotá D.C.

Se encontró que Bogotá, es una de las ciudades con menor densidad de descargas a tierra, sin embargo, las condiciones orográficas presentan una región particular, ya que facilitan la probabilidad de ocurrencia de tormentas eléctricas, especialmente en zonas aledañas a los cerros (Yunda, 2018). La condición del viento soplando al oeste también puede considerarse como detonante de actividad eléctrica, por lo que la mayor cantidad de tormentas se presentan al norte de la ciudad, lo cual incluye las áreas de Suba y Engativá. La Tabla 6 presenta las estructuras elevadas en estudio.

Tabla 6.

Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Bogotá, D.C con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.

Departamento	Ciudad	DDT (descargas / km ² por año)	NC (días)	Altitud (msnm)
Cundinamarca	Bogotá	3.08	59.5	2630
Estructuras	Latitud	Longitud	Altitud sobre el nivel del mar (m)	Altura de la estructura (m)
Torre Bacatá	4°36'18.37" N	74°4'13.5" O	2619	216
Torre Atrio (torre norte)	4°36'58.09" N	74°4'20.14" O	2585	200
Centro de Comercio	4°36'56.74" N	74°4'16.60" O	2585	192

Departamento	Ciudad	DDT (descargas / km ² por año)	NC (días)	Altitud (msnm)
Internacional				
Torre E	4°43'55.17" N	74°1'24.66" O	2588	184
Torre Colpatria	4°36'39.36" N	74°4'13.04" O	2599	196
Museo Parque Central (torre 2)	4°36'59.82" N	74°4'15.88" O	2592	180
Edificio Avianca	4°36'9.33" N	74°4'20.47" O	2614	161
Ciudadela San Martin	4°37'8.78" N	74°4'3.67" O	2602	154
Aeropuerto el Dorado	4°42'2.17" N	74°8'35.61" O	2549	84
Estadio el Campin	4°38'45.76" N	74°4'38.90" O	2556	40

3.2.1 Zona con mayor Número de impacto de rayos. Se puede evidenciar que hay dos zonas con mayor impacto de rayos, una se encuentra dentro del casco urbano de la ciudad, y la otra a las afueras de la ciudad, las dos con una cantidad de 32 impactos de rayos. La primera es el parque habitacional Cedritos con coordenadas geográficas 4.730906°; -74.037421° y la segunda es una zona boscosa con coordenadas geográficas 4.648397°, -74.035720°, ver Figura 10.

La Tabla 7 muestra las zonas y estructuras elevadas con mayor cantidad de impacto de rayos. De los resultados se pudo identificar que las estructuras elevadas mencionadas en la Tabla 6, las cuales presentaban las mayores alturas, tuvieron los números más bajos de impactos de rayos (ver las que están en negrilla).

En comparación con estructuras de mayor altura, tal como la Torre Bacatá de 216 metros, la cual solo presentó 7 impactos y la Torre Atrio de 200 m con 13 impactos, se encontraron estructuras con menor altura pero con mayor cantidad de impacto de rayos, entre estas están el Hospital San Juan de Dios y la Clínica Nogal con un número de impactos de 28 y 24, respectivamente. Las zonas con mayor incidencia de impactos, fueron identificadas en sitios aledaños a los cerros del norte de Bogotá, los cuales presentan mayores niveles de precipitación y

por lo tanto mayor densidad de descargas a tierra, ver Figura 10. En la Figura 11 se presentan algunos de los sitios de la ciudad con mayor impactos de rayos.

Tabla 7.

Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Bogotá.

Ítem	Tipo de zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
1	-Parque Habitacional Cedritos (13 pisos) -Zona boscosa	32	4.730906°; -74.037421° 4.638397°, -4.035720°	40-43 -
2	-Hospital San Juan de Dios -Instituto materno	28	4.58850°, -74.086076° 4.58851°, -4.085172°	- -
3	-Torre de telecomunicación 1 Torre de telecomunicación 2	26	4.61211°, -4.074773° 4.70775°, -74.062511°	20-25 26-35
4	-Antena de telecomunicación -Edificaciones (18 pisos)	25	4.733507°, -74.090288° 4.736854°, -4.065909°	15-20 50-54
5	-Clínica Nogal (12 pisos) -Edificaciones (11 pisos) -Torre de telecomunicación	24	4.682349°, -4.057450° 4.685070°, -4.057054° 4.628158°, -4.076707°	36-40 30-35 20-25
6	Edificio (7 pisos)	23	4.667637°, -74.059632°	20-24
7	Country Club Bogotá	22	4.709998°, -74.042683°	-
8	Edificios (8 pisos)	21	4.686270°, -74.051772°	21-25
9	AEROPUERTO EL DORADO	20	4.7006028, -74.143225	-
10	Zona de edificios	16	4.624885°, -74.067497°	-
11	-Torre atrio (torre norte) -Centro de comercio Internacional -Museo parque central	13	4.6161361°, -4.0722611° 4.6157611°, -74.071277° 4.6166167°, -74.071077°	200 192 180
12	Torre E	10	4.7319917°, - 74.0235167	184
13	Edificio Avianca	9	4.6025917°, -74.072352°	161
14	-Torre Colpatria -Estadio el campin	8	4.6109333°, -74.070288° 4.6460444°, -74.077472°	196 40
15	Torre Bacatá	7	4.6051028°, -74.070416°	216

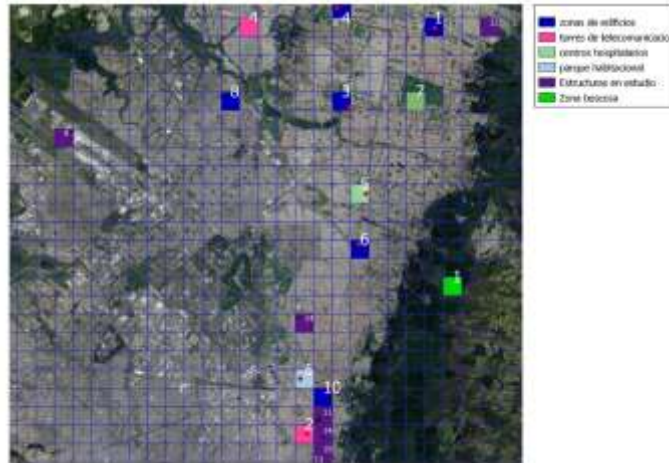


Figura 10. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Bogotá.



Figura 11. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Bogotá: (a) 1. Parque habitacional Cedritos 32 impactos, (b) 1.Zona boscosa con 32 impactos, (c) 2. Torre de telecomunicación 1 con 28 impactos, (d) 3. Torre de telecomunicación 2 con 26 impactos, (e) 10. Edificios con 16 impactos, (f) 11. Museo Parque central con 13 impactos.

3.3 Ciudad de Medellín-Antioquia

La ciudad de Medellín es la zona que presenta la mayor incidencia de impacto de rayos, considerando que cuenta con una particular geografía facilita que este tipo de fenómenos se den, dado que se encuentra ubicada en el centro geográfico del Valle de Aburrá. Adicionalmente, las cordilleras que lo encierran dan lugar a la formación de diversos microclimas, ya que estar en medio de montañas hace que se presente un calentamiento diurno que favorece el desarrollo de grandes cúmulos de nubes verticales (Zapata, 2018). Este fenómeno genera mayor movimiento interno dentro de las nubes, que tienen cargas negativas y positivas, generando inestabilidad y por ende producen tres elementos que van de la mano: el rayo, el relámpago y el trueno. Estos elementos generan la descargas eléctricas, que se dan entre nube y tierra. Este fenómeno se puede observar en la Figura 12 donde la mayor densidad de impactos están localizados hacia las zonas montañosas.



Figura 12. Ubicación estructuras elevadas e impactos de rayos en Medellín

Partiendo de lo anterior, en la Tabla 8 muestra las estructuras más elevadas de la ciudad, las cuales fueron localizadas hacia el centro de la ciudad.

Tabla 8.

Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Medellín con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.

Departamento	Ciudad	DDT (descargas / km ² por año)	NC (días)	Altitud (msnm)
Antioquia	Medellín	11.3	158	1479
ESTRUCTURAS	LATITUD	LONGITUD	Altitud sobre el nivel del mar (m)	Altura de la estructura (m)
Edificio Coltejer	6°14'59.76" N	75°33'58.44" O	1492	175
Torre del Café	6°14'55.60" N	75°34'7.52" O	1495	160
Cámara de Comercio	6°14'59.11" N	75°33'49.76" O	1505	139
Torre Veracruz	6°11'2.13" N	75°33'40.80" O	1742	121
Torre Q Concept	6°10'57" N	75°33'55.19" O	1721	111
Torre de la Libertad	6°14'3.25" N	75°34'29.03" O	1470	105
Banco Popular	6°14'58.09" N	75°34'3.19" O	1494	102
Plaza Business Center	6°12'26.03" N	75°34'19.28" O	1527	100
Edificio Colseguros	6°15'2.20" N	75°33'48.60" O	1498	97
Estadio Atanasio Girardot	6°15'24.31" N	75°35'25.56" O	1488	42

3.3.1 Zona con mayor número de impactos de rayos. En la Tabla 9 se presentan los sitios específicos donde se evidencia la mayor incidencia de rayos en la ciudad de Medellín. La zona con mayor impacto de rayos no se encuentra en el casco urbano de la ciudad. Esta zona se conoce como el Cerro Padre Amaya con coordenadas geográficas 6.279844°; -75.686857° con una cantidad de 417 impactos, donde se observan antenas de televisión, radio, comunicaciones militares y civiles, así mismo, con las coordenadas adquiridas se realizó un rastreo adquiriendo la imagen, ver Figura 14 (a). Se evidencia que las zonas montañosas son los lugares con mayor afectación, debido a que la ciudad es el centro del Valle de Aburrá, se encuentra rodeada de zonas montañosas donde se presentan estos fenómenos, ver Figura 13 . Adicionalmente, las estructuras

encontradas durante la exploración: Torre Santa Helena, Torre San miguel y Torres prado, presentan alturas inferiores a las estructuras en estudio (ver las que están en negrilla), ya que registraron una cantidad de 95 impactos en comparación a las de estudio, donde la estructura con mayor número de impactos fue el Banco Popular con 72.

Dentro de las estructuras localizadas, se encontró una torre de metro cable con coordenadas 6.277289°, -75.531284°, que debido a su ubicación geográfica en zona montañosa, presentó 65 impacto de rayos , siendo la séptima zona con mayor actividad de densidad de descargas a tierra, ver Figura 14(d).

Tabla 9.

Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Medellín.

Ítem	Tipo de zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
1	Cerros padre Amaya	417	6.279844°, -75.686857°	30-45
2	Zona montañosa	365	6.279210°, -75.688219°	-
3	Zona boscosa	260	6.281911°, -75.687322°	-
4	Zona boscosa	100	6.287729°, -75.697594°	-
5	-Torre Santa Helena (21 pisos)	95	6.258143°, -75.558712°	60-65
	-Torre San Miguel (15 pisos)		6.255634°, -75.560245°	45-50
	-Torres prado (21 pisos)		6.256620°, -75.559914°	62-65
6	Banco popular	72	6.249471°, -75.567554°	102
7	-Edificio en construcción (18 pisos)	65	6.184143, -75.651175	50-55
	- Torre de metro cable		6.277289°, -75.531284°	-
8	Nuevo naranjal (22 pisos)	54	6.250444°, -75.582730°	50-55
9	Edificio el conquistador (11 pisos)	53	6.245329°, -75.582430°	27-33
10	Torres de Compostela (12 pisos)	50	6.222278°, -75.603009°	33-36
11	-Edificio Coltejer	49	6.2499333°, -75.5662333°	175
	-Cámara de Comercio		6.2497528°, -75.5638222°	139

Ítem	Tipo de zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
	-Edificio Colseguros		6.2506111°, -75.5635°	97
12	Plaza Businesscenter	33	6.2072306°, -75.5720222°	100
13	Torre Veracruz	31	6.183925°, -75.5613333°	121
14	Q concept	30	6.1825°, -75.5653306°	111
15	Torre del café	26	6.2487778°, -75.5687556°	160
16	Estadio Atanasio Girardot	24	6.2567528°, -75.5904333°	42
17	Torre de la libertad	22	6.2453°, -75.5747°	105

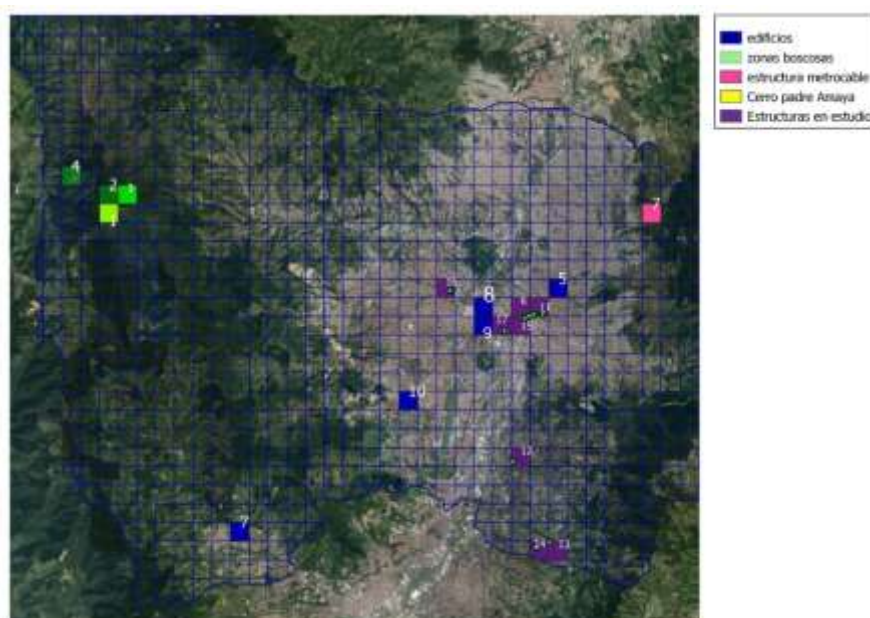


Figura 13. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Medellín.

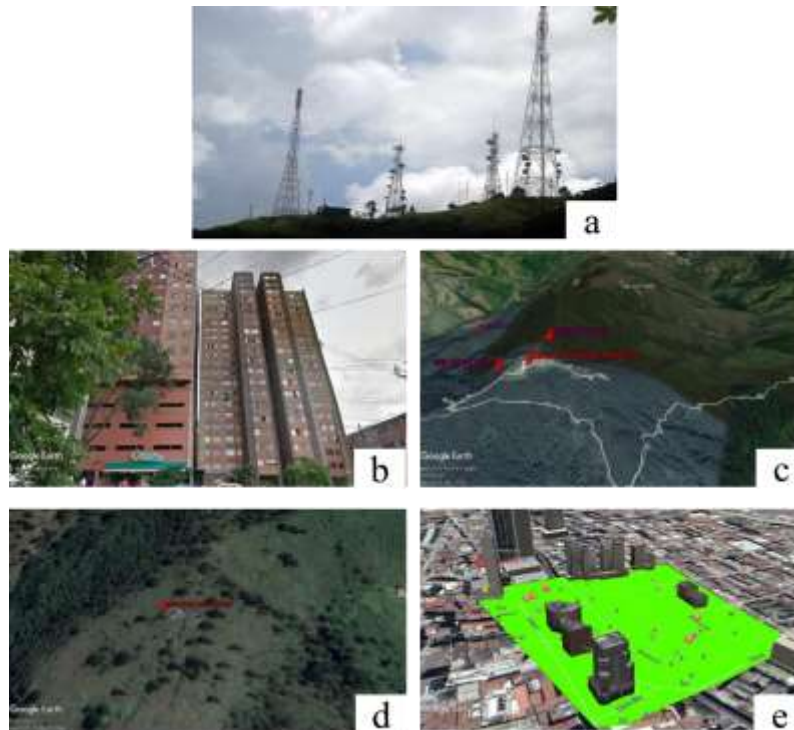


Figura 14. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Medellín: (a) 1. Cerros padre Amaya con 417 impactos, (b) 5. Torre de Santa Helena con 95 impactos, (c) 2. Zona montañosa con 365 impactos, (d) 7. Torre de metro cable con 65 impactos y (e) 6. Banco popular con 72 impactos.

3.4 Municipio de Cali-Valle del Cauca

Para el análisis de la ciudad de Cali se tuvieron en cuenta las 10 estructuras más altas, la Tabla 10 señala las características de cada una. Dentro de estas estructuras se encuentran el edificio torre de Cali, Edificio del Banco Popular el Estadio deportivo de Cali, este último no se le realizó el conteo de impactos debido a que la información suministrada sobre impactos de rayo nube-tierra no abarco dicha zona.

Tabla 10.

Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Cali con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.

DEPARTAMENTO	CIUDAD	DDT (descargas / km ² por año)	NC (días)	ALTITUD (msnm)
VALLE DEL CAUCA	CALI	4.52	84.4	1018
ESTRUCTURAS	LATITUD	LONGITUD	Altitud sobre el nivel del mar (m)	Altura de la estructura (m)
Torre de Cali	3°27'30.02" N	76°31'42.77" O	997	183
Corficolombiana	3°27'4.21" N	76°32'0.06" O	1011	130
World Trade Center	3°28'29.07" N	76°31'43.01" O	979	118
Edificio Banco Popular	3°27'4.96" N	76°32'2.15" O	1006	115
Torre Aristi	3°26'51.65" N	76°31'59.14" O	1011	110
Edificio el Castillo	3°27'18.32" N	76°32'11.62" O	1016	86
Club de Ejecutivos	3°27'59.26" N	76°31'35.06" O	981	79
Santa Rosa del Río	3°27'9.82" N	76°32'54.00" O	1054	78
Torre Estelar	3°26'57.65" N	76°32'20.42" O	1029	76
Estadio de Palmaseca	3°31'18.38" N	76°25'1.69" O	950	46

3.4.1 Zona con mayor número de impactos de rayos. Se determinaron las zonas con mayor incidencia de rayos, en la Tabla 11 evidencia la cantidad de impactos que presenta cada estructura en estudio. Se pudo observar que la zona con mayor impacto de rayos no se encuentra en el casco urbano de la ciudad, esta zona de incidencia se conoce como Cristo Rey con coordenadas geográficas 3.435857 °; - 76.564895°, con una cantidad de impactos de 111, ver Figura 16. Adicionalmente, se hallaron otras zonas tales como: torres de transmisión y antenas de telecomunicación, las cuales presentan una alta actividad de descargas eléctricas en la ciudad de Cali. Al igual que en las ciudades ya analizadas, se observa que las estructuras elevadas seleccionadas, son las zonas con menor impacto de rayos. Así mismo, con las coordenadas

obtenidas de las zonas con mayor densidad de descargas a tierra se ubicaron permitiendo obtener una imagen general de la ciudad, ver Figura 15. Además, la estructura “Estadio de Palmaseca” no registro ningún impacto, debido a que, en los años 2016, 2017, 2018 no se registró ninguna incidencia de rayos en esta zona.

Tabla 11.

Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Cali.

Ítem	Tipo de zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
1	Cristo Rey	111	3.435857 ° - 76.564895°	-
2	Zona montañosa	110	3.342486, - 76.694783	-
3	Zona montañosa	103	3.323394, -76.693661	-
4	Estructura de transmisión	101	3.429316, -76.563082	25-30
5	Torre de telecomunicación	100	3.432783, -76.565859	
6	torre de telecomunicación	91	3.436511, -76.557583	20-25
7	Torre de transmisión	83	3.431027, -76.572474	25-30
8	Zona boscosa	76	3.445505, -76.647103	-
9	Santa Rosa del río	27	3.4527278°, -76.5483333°	79
10	Edificio el Castillo	21	3.455088°, -76.53656°	86
11	Torre estelar	19	3.4493472°, -76.5390056°	76
12	Torre de Cali	18	3.4583389°, -76.5285472°	183
13	Torre Aristi	17	3.4476806°, -76.5330944°	110
14	Corficolombiana	16	3.4511694°, -76.53335°	130
	Edificio banco popular		3.4513778°, -76.5339306	115
15	Club de ejecutivos	15	3.4664611°, -76.5264056	79
16	World trade center	5	3.4747417°, -76.5286139	118
17	Estadio de Palmaseca	-	3.5217722°, -76.4171361°	46

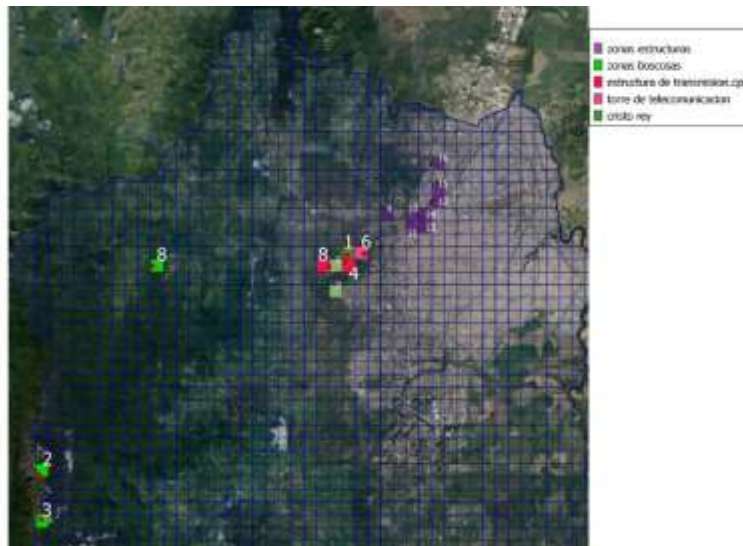


Figura 15. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Cali.

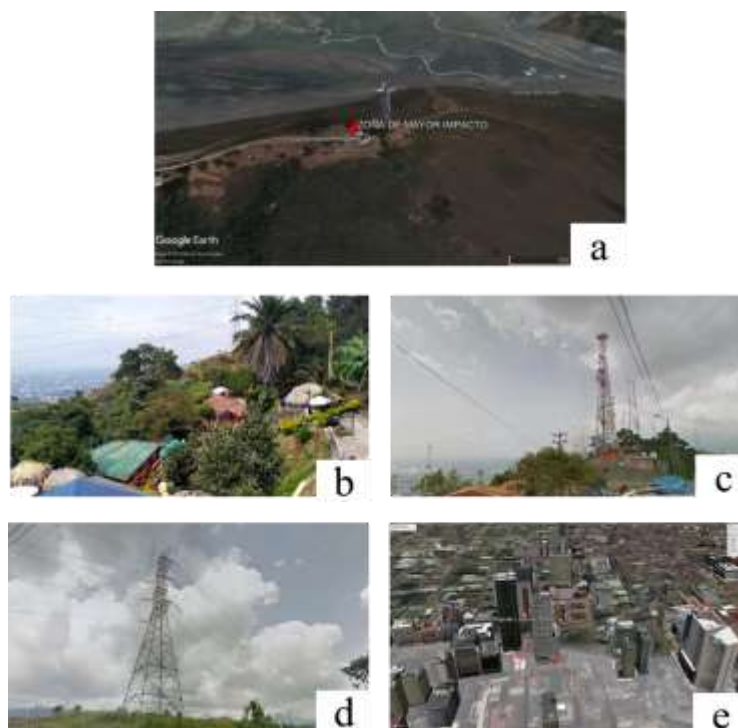


Figura 16. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Cali (a) 1. Cristo Rey con 111 impactos, (b) 4. Estructura de transmisión con 101 impactos, (c) 5. Torre de telecomunicación con 100 impactos, (d) 7. Estructura de transmisión con 83 impactos y (e) 9. Edificio Santa Rosa del Río con 27 impactos

3.5 Municipio de Tunja-Boyacá

La ciudad de Tunja-Boyacá fue la ciudad con menor incidencia de impactos de rayos, puesto que a medida que la altitud se incrementa la densidad de descargas a tierra disminuyen, y Boyacá cuenta con una altitud de 2822 metros sobre el nivel del mar (Cruz Mosquera, 2015). Es por esto que las estructuras elevadas en estudio que se presentan en la Tabla 12 no registraron gran cantidad de impacto de rayos, se debe agregar que, algunas no registraron impactos de rayos.

Tabla 12.

Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Tunja con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.

Departamento	Ciudad	DDT (descargas / km² por año)	NC (días)	ALTITUD (msnm)
BOYACÁ	TUNJA	3.35	59.5	2822
ESTRUCTURAS	LATITUD	LONGITUD	Altitud sobre el nivel del mar (m)	Altura de la estructura (m)
In Altezza	5°32'20.97" N	73°21'2.30" O	2696	96
Edificio San Sebastián	5°32'35.28" N	73°21'34.35" O	2708	57
Edificio Camol	5°32'3.38" N	73°21'42.01" O	2783	47
Mirador de la Colina	5°32'47.61" N	73°20'49.26" O	2685	41
Conjunto el Recreo	5°32'39.62" N	73°21'24.86" O	2693	42
Edificio Acarigua	5°32'38.78" N	73°21'15.70" O	2689	40
Edificio San Jorge	5°32'45.78" N	73°20'52.09" O	2708	39
Hotel Hunza	5°32'06.18" N	73°21'42.33" O	2782	38
Eskala	5°32'57.09" N	73°21'33.34" O	2687	38
Torres de Nauchatel	5°34'22.77" N	73°20'8.47" O	2530	26

3.5.1 Zona con mayor número de impactos de rayos. En la Tabla 13 se presenta el comportamiento de impactos de rayos en las estructuras en estudio y los sitios específicos. Los lugares de mayor incidencia de rayos se presentaron en zonas boscosas, tal como se puede observar

en la Figura 17. Específicamente, la de mayor incidencia de rayos se presentó en una zona que tiene coordenadas geográficas 5.532867°; -73.401142°. Como se puede observar en la Figura 18 (a), esta es una zona llana y en sus alrededores no se observa ningún tipo de estructura. Este lugar presenta una cantidad de 22 impactos de rayos siendo una de las ciudades con menos incidencia de rayos de las ciudades en estudio. Al estudiar los puntos donde se localizaron zonas con mayor impacto de rayos, se encontró que la ciudad de Tunja no se reconoce por ser una ciudad con incidencia de impacto de rayos a nivel nacional. En la Figura 18 se presenta la ubicación de cada uno los sitios específicos adquiridos con las coordenadas específicas. Adicionalmente, la estructura mirador de la colina fue la tercera zona con mayor actividad de rayos de las estructuras en estudio, ver Figura 18 (c).

Tabla 13.

Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Tunja.

Ítem	Tipo de zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
1	Zona boscosa	22	5.532867°; -73.401142°	
2	Zona boscosa	12	5.466489, -73.417320	-
3	Mirador de la colina	11	5.5465583°, -73.347016°	41
4	Zona boscosa	10	5.488820, -73.356735	-
5	Edificio barlovento (11 pisos).	7	5.546818°, -73.344461°	33-36
6	Eskala	6	5.5491917°, -73.359261°	38
7	Edificio San Jorge	4	5.54605°, -73.3478°	39
8	Torres de nauchatel	3	5.5729917°, -73.3356861	26
9	-In Altezza	1	5.5391583°, -73.350638°	96
	-Edificio Camol		5.5342722°, -73.361669°	47
	-Hotel Hunza		5.53505°, -73.3617583°	38
	-Edificio San Sebastián		5.5431333°, -73.359541°	57
10	-Conjunto el recreo	0	5.5443389°, -73.356905°	42
	-Edificio Acarigua		5.5441056°, -73.354361°	40

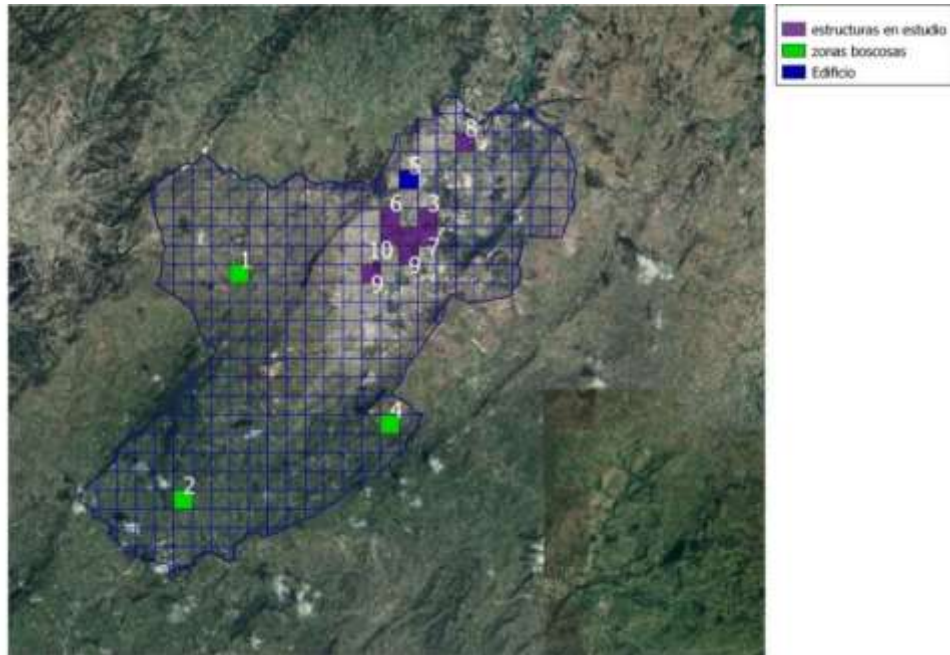


Figura 17. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Tunja.



Figura 18. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Tunja: (a) 1. Zona boscosa con 22 impactos (b) 5. Edificio Barlovento con 7 impactos, (c) 3. Mirador de la colina con 11 impactos y (d) 6. Torre Eskala con 6 impactos.

3.6 Municipio de Sincelejo-Sucre

Para el análisis de la ciudad de Sincelejo se tuvieron en cuenta 9 estructuras elevadas que están distribuidas en edificios, bancos, hoteles, y estadios. La Tabla 14 indica las coordenadas geográficas, altura sobre el nivel del mar y altura en metros de cada una de las estructura, cabe aclarar que municipio en estudio no presentaba gran cantidad de estructuras elevadas, lo que conlleva a que seleccionar solo 9 estructuras.

Tabla 14.

Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Sincelejo con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.

Departamento	Ciudad	DDT (descargas / km ² por año)	NC (días)	ALTITUD (msnm)
SUCRE	SINCELEJO	9.46	84.5	213
ESTRUCTURAS	LATITUD	LONGITUD	Altitud sobre el nivel del mar (m)	Altura de la estructura (m)
Edificio Caja Agraria	9°18'2.25" N	75°23'44.49" O	208	32
Banco de Bogotá	9°18'4.46" N	75°23'37.75" O	213	32
Edificio Magenta	9°18'20.97" N	75°22'32.71" O	197	28
Edificio la Sabana	9°18'13.40" N	75°23'37.77" O	217	27
Edificio Atikavia	9°18'17.18" N	75°22'30.43" O	201	25
Seguro Social	9°18'4.45" N	75°23'46.63" O	207	23
Edificio Dharma	9°18'12.25" N	75°22'36.76" O	209	22
Luxor	9°18'12.63" N	75°23'34.95" O	209	21
Hotel Malibu	9°18'9.09"	75°22'45.67"	211	17

3.6.1 Zona con mayor número de impactos de rayos. A continuación, se presentan las estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos que fueron encontrados durante este estudio. La Tabla 15 muestra la densidad de descargas atmosféricas en zonas boscosas,

se dice zona boscosa porque se prevé que no hay estructuras de ningún tipo, dado que la exploración no permite una buena visualización de la zona, también se encontraron edificios, estructuras de transmisión, la alcaldía de Sincelejo, entre otras. Adicionalmente, se obtuvo la ubicación de estos sitios específicos en el mapa de Sincelejo, evidenciando que estos lugares se encuentran por la parte oriental de la ciudad como se puede observar en la Figura 19. La zona con mayor incidencia de rayos, se encuentra una zona de urbanización con coordenadas 9.295111°, -75.379164, vereda que recibe el nombre de El bajo proveniente al municipio de Sincelejo. Este sitio específico presenta 42 impactos de rayo y se puede observar en la Figura 20 (a). Adicionalmente, se evidencia que el comportamiento de los HOTSPOTS tiene una característica muy particular, dado que se presentan en su gran mayoría en los alrededores de la ciudad. De forma general se puede observar que al igual de las demás ciudades, las zonas boscosas ubicadas fuera de la zona de urbanización predominan las zonas con mayor cantidad de impactos.

Tabla 15.

Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Sincelejo.

Ítem	Tipo de zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
1	Urbanización	42	9.295111°, -75.379164°	-
2	Zona boscosa	41	9.312906°, -75.369346°	-
3	Zona boscosa	39	9.318219°, -75.381604°	-
4	Zona boscosa	33	9.322353°, -75.377605°	-
5	-Edificio Magenta	32	9.305825, -75.3757528	28
	-Edificio Dharma	32	9.3034028, -75.3768778	22
	-Edificio Atikavia	32	9.3047722°, -75.3751194°	25
6	-Estructura de Transmisión	31	9.286007°, -75.375876°	40-45
	-Estructura de Transmisión	31	9.282311°, -75.376117°	40-45
7	-Banco de Bogotá	30	9.3012389, -75.3938194	32
	-Edificio caja Agraria	30	9.300625, -75.3956917	32
	-Seguro Social	30	9.3012361, -75.3962861	23

Ítem	Tipo de zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
8	-Hotel Malibú	25	9.302525, -75.3793528	17
9	-Edificio Luxor	22	9.3035083, -75.3930417	21
	-Edificio la Sabana	22	9.3037222, -75.393825	27



Figura 19. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Sincelejo.



Figura 20. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Sincelejo: (a) 1. Urbanización con 42 impactos, (b) 6. Estructura de Transmisión con 31 impactos (c) 5. Edificio Magenta con 32 impactos, (d) 7. Banco de Bogotá con 30 impactos.

3.7 Municipio de Valledupar-Cesar

En el análisis de la ciudad de Valledupar, la Tabla 16 presenta las 8 estructuras que son consideradas elevadas del municipio con sus respectivas características. Dentro de este estudio se localizan torres de telecomunicación, hoteles, el palacio de justicia. Al igual que la ciudad de Sincelejo la ausencia de estructuras elevadas genero la selección de solo 8 estructuras.

Tabla 16.

Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Valledupar con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.

Departamento	Ciudad	DDT (descargas / km ² por año)	NC (días)	Altitud (MSNM)
CESAR	Valledupar	6.66	84.4	168
ESTRUCTURAS	Latitud	LONGITUD	Altitud sobre el nivel del mar (m)	Altura de la estructura (m)
Caja Agraria	10°28'30.40" N	73°14'51.62" O	179	50
Edificio Altos de Sierra	10°28'59.50" N	73°14'59.73" O	180	49
Edificio X	10°29'35.06" N	73°16'25.36" O	218	35
Palacio de Justicia	10°28'26.92" N	73°15'7.36" O	176	34
Hotel Vajamar	10°28'32.05" N	73°14'42.44" O	169	30
Torres de Comunicación	10°29'39.44" N	73°16'15.16" O	219	25
Sonesta Hotel	10°29'44.58" N	73°16'9.02" O	215	22
Edificio Premium	10°28'26.30" N	73°15'9.72" O	176	19

3.7.1 Zona con mayor número de impactos de rayos. La Tabla 17 se presenta los sitios específicos donde se encuentra la mayor cantidad de impacto de rayos, así como también la ubicación geográfica de estos sitios específicos: zonas boscosas, zonas montañosas, urbanizaciones, refinería y torres de telecomunicaciones entre otros, ver Figura 21. La mayor incidencia se presentó en una zona montañosa la cual no se encuentra en el casco urbano de la

ciudad, ver Figura 22 (a). Esta zona es llamada El Oasis con coordenadas geográficas 10.307796°, -73.575836° y presento 96 impactos. Es de resaltar en esta ciudad que una estructura ubicada en la zona urbana como la de la Caja agraria y el Palacio de Justicia con 50 m y 34 m de altura respectivamente, presentó un cantidad de impactos significativos, 38. En comparación con las demás ciudades en estudio, la mayor cantidad de impacto de rayos no se registraron a los alrededores de la ciudad, contrario a esto, se situaron dentro del casco urbano.

Tabla 17.

Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Valledupar.

Ítem	Tipo de Zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
1	Zona montañosa	96	10.307796°, -73.575836°	-
2	Zona montañosa	81	10.563683°, -73.289358°	-
3	Urbanización	43	10.48033°, -73.272525°	-
4	Refinería	41	10.488248°, -73.259325°	-
	-Palacio de Justicia		10.4741444°, -73.2520444°	34
5	-Caja Agraria	38	10.4751111°, -73.2476722°	50
	-Urbanización		10.474630°, -73.251491°	27
6	Edificio Premium	37	10.4739722°, -73.2527°	19
7	Torre de telecomunicación	35	10.479975°, -73.248052°	40
8	Torre de Telecomunicación	31	10.4942889°, -73.2708778°	25
9	-Edificio X	27	10.4930722°, -73.2737111°	35
	-Sonesta hotel		10.4957167°, -73.2691722°	22
10	Edificios altos de Sierra	26	10.4831944°, -73.249925°	49
11	Hotel Vajamar	25	10.4755694°, -73.2451222°	30



Figura 21. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Valledupar.



Figura 22. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Valledupar: (a) 1. Zona Montañosa con 96 impactos, (b) 4. Refinería con 41 impactos, (c) 5. Caja Agraria con 38 impactos, (d) 7. Torre de telecomunicación con 35 impactos y (e) 8. Torre de comunicaciones con 31 impactos.

3.8 Municipio de Bucaramanga-Santander

En el análisis de la ciudad de Bucaramanga Santander se encontró que las estructuras más altas están ubicadas hacia los cerros orientales considerado uno de los puntos topográficos más altos de la ciudad, allí se localizan el edificio Majestic y la torre Aqua Tower, adicionalmente la Tabla 18 formula las características de las estructuras elevadas de interés.

Tabla 18.

Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Bucaramanga con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.

Departamento	Ciudad	DDT (descargas / km ² por año)	NC (días)	Altitud (msnm)
Santander	Bucaramanga	1.52	84.4	959
Estructuras	Latitud	Longitud	Altitud sobre el nivel del mar (m)	Altura de la estructura (m)
Edificio Majestic	7° 7'25.01"N	73° 6'21.45"O	1072	163
Torre Green	7° 7'13.50"N	73° 6'56.97"O	993	150
Oasis de Mardel	7° 6'17.48"N	73° 7'13.89"O	934	138
Torre Ararat	7° 6'45.35"N	73° 6'17.04"O	999	129
Aconkagua Vertical	7° 7'0.99"N	73° 6'26.13"O	1029	122
Aqua Tower	7° 7'26.29"N	73° 6'22.81"O	1067	118
Vista Azul	7° 4'30.83"N	73° 6'33.81"O	882	107
Ventus	7° 4'3.14"N	73° 6'30.28"O	839	105
Torres de Don David I y II	7° 7'10.48"N	73° 6'24.76"O	1039	93
Montearroyo	7° 7'27.49"N	73° 6'23.43"O	1069	92

3.8.1 Zona con mayor número de impactos de rayos. Por otra parte, Bucaramanga no es considerada una ciudad con alta actividad de rayos, ya que su densidad de descargas a tierra es de 1 rayo por kilómetro cuadrado-año aproximadamente, comparada con el municipio de

Barrancabermeja que posee una densidad entre 20 y 30 rayos por kilómetro cuadrado-año, lo anterior dado que el Magdalena Medio es una zona que, por su ubicación y presencia de diversos fenómenos atmosféricos. Por esta razón las estructuras elevadas que fueron encontradas en la Tabla 19 no registran gran cantidad de impactos. Sin embargo, los sitios con mayor densidad se localizan alrededor del casco urbano de la ciudad en zonas montañosas, como se aprecia en la Figura 23. De los resultados se pudo evidenciar que el Edificio Majestic siendo la estructura más elevada con 163 m, fue de las zonas con menor impacto de rayos, lo que afirma que no siempre las estructuras más altas son la de mayor incidencia de rayos. Dicho esto, el sitio específico con mayor incidencia de descargas atmosféricas está ubicado por la vía a Girón con coordenadas geográficas 7.131891°, -73.155126°, donde se observa una planta de alimentos y una torre de telecomunicación, ver Figura 24 (a).

Tabla 19.

Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Bucaramanga.

Ítem	Tipo de zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
1	Planta de Alimentos	18	7.131891°, -73.155126°	
2	Zona boscosa	15	7.253899°, -73.083927°	-
3	Zona boscosa	14	7.101504°, -73.150967°	-
4	Italcol	12	7.083611°, -73.157324°	-
5	-Torre de telecomunicación	9	7.100291°, -73.144291°	22-28
	-Edificación		7.102891°, -73.141246°	40-42
	-Oasis de Mardel		7.1048556°, -73.120525°	138
6	-Torres Altobelo (18 pisos)	9	7.108013, -73.136010	54-57
	-Torre porto (15 pisos)		7.119341, -73.118162	45-50
7	Edificio puerto mayor (22 pisos)	7	7.107588, -73.115366	60-65
8	-Torre Green	6	7.1236139°, -73.1059583°	150
	-Ventus		7.0675389°, -73.1084111°	105

Ítem	Tipo de zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
9	-Torre Ararat	3	7.1125972°, -73.1047333°	129
	-Aconkagua vertical		7.1169417°, -73.1072583°	122
	-Torres de don David i y ii		7.1195778°, -73.1068778°	92
10	Vista azul	4	7.0752306°, -73.1093917°	107
11	-Edificio Majestic	2	7.1236139°, -73.1059583°	163
	- Aqua Tower		7.1239694°, -73.1063361°	118
	-Montearroyo		7.1243028°, -73.1065083°	92

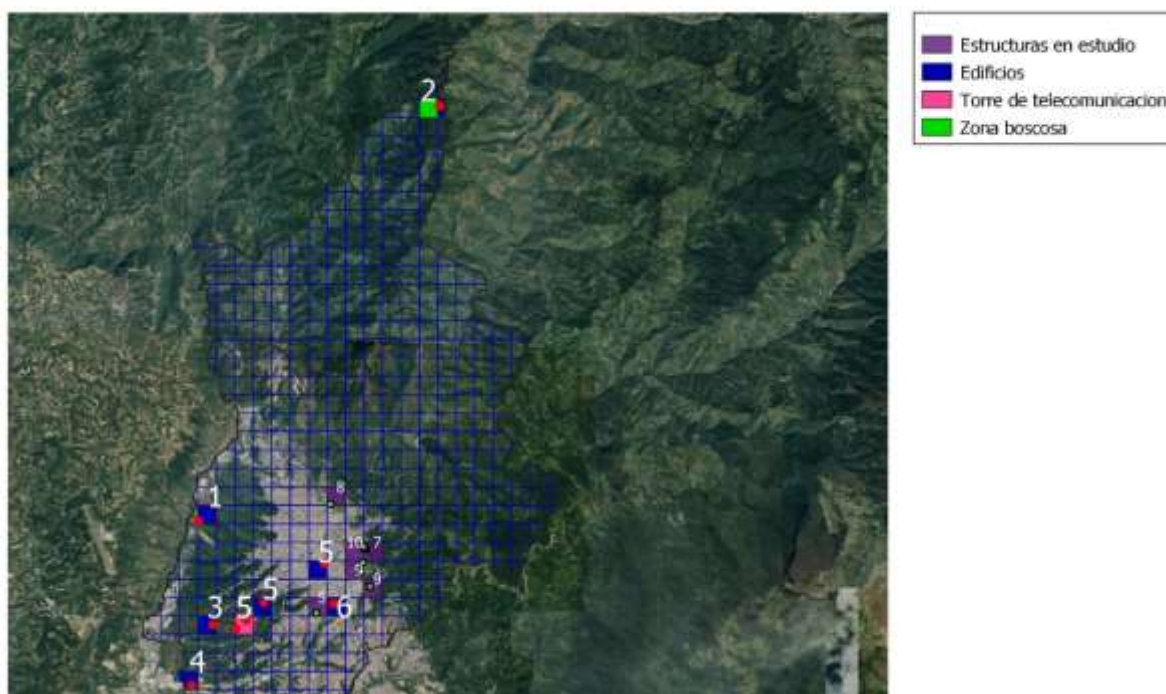


Figura 23. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Bucaramanga.

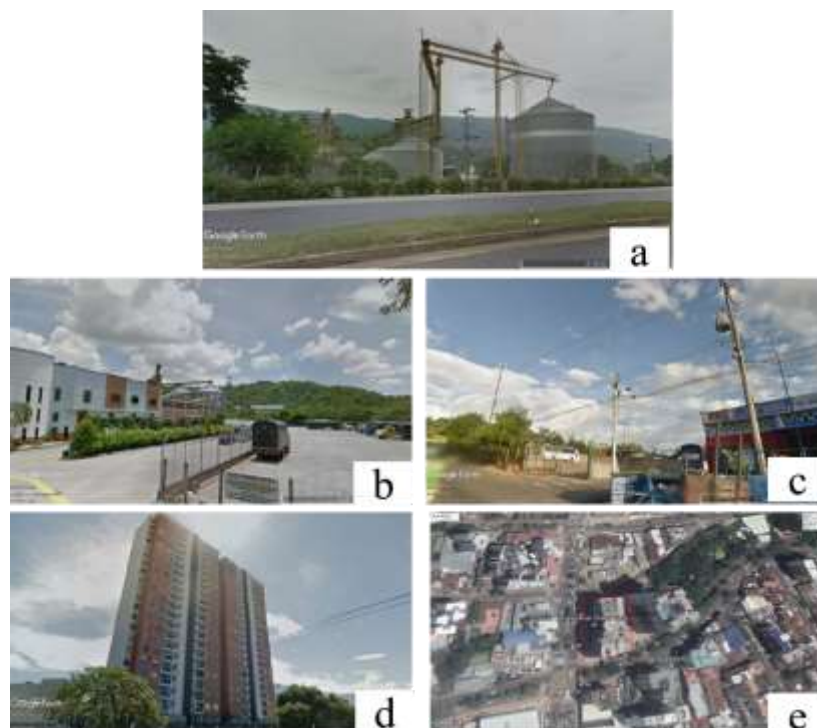


Figura 24. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Bucaramanga: (a) 4. Itacol con 12 impactos, (b) 9. Torre de telecomunicación con 9 impactos, (c) 7. Edificio Puerto Mayor con 7 impactos y (d) 8. Torre Green con 6 impactos.

3.9 Municipio de Pereira-Risaralda

En el análisis de la ciudad de Pereira se tuvieron en cuenta 10 estructuras elevadas, dentro de las cuales se encuentra el aeropuerto INTERNACIONAL MATECAÑA, el estadio Hernán Ramírez Villegas y edificios que son considerados estructuras elevadas en la ciudad, ver Tabla 20

Tabla 20.

Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Pereira con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.

Departamento	Ciudad	DDT (descargas / km ² por año)	NC (días)	Altitud (msnm)
Risaralda	Pereira	21.52	84.5	1411
Estructuras	Lattud	Longitud	Altitud sobre el nivel del mar (m)	Altura de la estructura (m)
El diario del Otún	4°48'44.53"N	75°41'41.01"O	1415	95
Pinares de Alameda	4°48'3.83"N	75°41'8.86"O	1428	90
Pinamar E/C	4°48'9.63"N	75°41'5.33"O	1423	80
Banco Comercio	4°48'48.66"N	75°41'38.68"O	1413	75
Trilogía E/C	4°48'0.98"N	75°41'33.96"O	1424	65
Perla del Otún	4°48'44.94"N	75°41'41.12"O	1418	63
Pinares Campestre	4°48'2.45"N	75°41'5.73"O	1438	63
Edificio parque Bolívar	4°48'55.15"N	75°41'40.09"O	1425	60
Estadio Hernán Ramírez Villegas	4°48'16.82"N	75°45'8.77"O	1269	26
Aeropuerto INTERNACIONAL MATECAÑA	4°48'54.40"N	75°44'10.90"O	1343	28

3.9.1 Zona con mayor número de impactos de rayos. Ahora bien, la Tabla 21 presenta el estudio de las estructuras con mayor impacto de rayos, entre estas están urbanizaciones, bancos, torres de telecomunicación, estructuras de transmisión ,el estadio Hernán Ramírez Villegas, el aeropuerto INTERNACIONAL MATECAÑA y zonas boscosas. Sin embargo en la Figura 25 se puede evidenciar que la mayor incidencia se presenta en las zonas boscosas de la ciudad. Como se puede apreciar la zona con mayor cantidad de impacto de rayos es de 100, este lugar recibe el nombre de Pueblo Nuevo, está clasificado como boscosa y esta distanciada de la ciudad con coordenadas geográficas 4.845888°, -75.722535°, Figura 26 (a). Adicionalmente, se logró identificar una torre de transmisión con 43 impactos, ver Figura 26 (b).

Tabla 21.

Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Pereira.

Ítem	Tipo de Zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
1	Zona boscosa	100	4.845888°, -75.722535°	-
2	Zona boscosa	66	4.732400°, -75.608446°	-
3	Zona boscosa	60	4.781334°, -75.706341°	-
4	Edificio (11 pisos)	60	4.807019°, -75.689541°	33
5	Torre Núcleo (8 pisos)	60	4.808776°, -75.686816°	24
6	Pinares de alameda	51	4.8010639°, -75.6857944°	90
7	Edificio (8 pisos)	50	4.801597°, -75.680820°	24
8	Torre de telecomunicación	48	4.812151°, -75.766038°	40
9	Edificio (7 pisos)	46	4.806965°, -75.721687°	21
10	Edificio (9 pisos)	44	4.801187°, -75.694715°	27
11	Torre de Transmisión	43	4.798056°, -75.672934°	40-45
12	Edificio (21 pisos)	43	4.8002722, -75.6927667	63
13	Edificio pinares campestre	43	4.8010639, -75.6857944	63
	-Perla del Otún		4.812484°, -75.694727°	63
	-Trilogía E/C		4.8002722°, -75.6927667°	65
14	-Banco comercio	41	4.813508°, -75.694037°	75
	-Edificio parque Bolívar		4.8153194°, -75.6944694°	60
15	Edificio Pinamar E/C	27	4.802675, -75.6848139	80
	-El diario del Otún			
	-Estadio Hernán		4.814030°, -75.694613	60
	-Ramírez Villegas		4.8123694°, -75.694725°	95
16	-Aeropuerto INTERNACIONAL MATECAÑA	25	4.8046722°, -75.7524361°	26
			4.8153194°, 4.8153194°	60

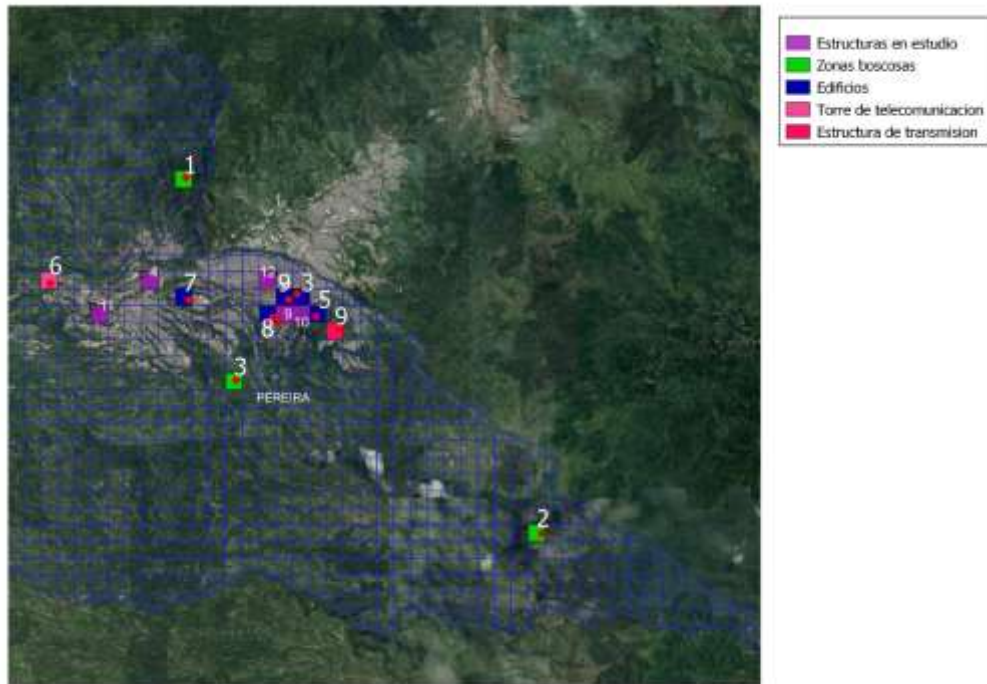


Figura 25. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Pereira.



Figura 26. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Pereira: (a) 1. Zona Boscosa denominada Pueblo nuevo con 100 impactos, (b) 11. Torre de Transmisión con 43 impactos de rayos (c) 5. Torre Núcleo con 60 impactos y (d) 6. Edificio Pinares de Alameda con 51 impactos.

3.10 Municipio de Barranquilla-Atlántico

Barranquilla es el municipio con mayor incidencia de rayos registrados en las estructuras en estudio, se caracterización de las estructuras elevadas y los impactos de rayos presentes en el municipio, por otro lado Tabla 22 exhibe las estructuras que son consideradas las más elevadas de la ciudad, con sus respectivas características de latitud, altitud, altura sobre el nivel del mar y sus respectivas alturas. Es de resaltar que la densidad de impactos de rayos en Barranquilla presentan un comportamiento particular, no observado en otras ciudades.

Tabla 22.

Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Barranquilla con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.

Departamento	Ciudad	DDT (descargas / km ² por año)		NC (días)	ALTITUD (msnm)
		2.77			
Atlántico	Barranquilla			84.5	18
Estructuras	Latitud	Longitud		Altitud sobre el nivel del mar (m)	Altura de la estructura (m)
Torre Luxe	11° 0'26.76"N	74°48'39.95"O		80	175
Mirage 57	11° 0'29.21"N	74°48'33.18"O		78	163
Grattacielo	11° 0'30.76"N	74°48'34.06"O		71	154
The Icon	11° 0'25.09"N	74°48'20.31"O		55	148
Iluminatta	11° 0'29.65"N	74°48'35.14"O		71	145
Solara Towers	11° 0'28.50"N	74°48'34.14"O		73	142
Green Towers	11° 0'21.98"N	74°48'11.13"O		50	101
Hotel Barranquilla Plaza	11° 0'13.10"N	74°48'40.39"O		80	92
Edificio Malibú	11° 0'12.14"N	74°48'44.80"O		90	80
Estadio Metropolitano Roberto Meléndez	10°55'36.93"N	74°48'2.37"O		51	43

3.10.1 Zona con mayor cantidad de impacto de rayos. Barranquilla registró la mayor incidencia de rayos en las estructuras de estudio, puesto que es un lugar con altos periodos de lluvias debido a movimientos en las diferentes capas de la atmósfera. Adicionalmente esta ciudad está condicionada por su ubicación, en una zona intermedia entre dos extremos climáticos: el árido del norte (desierto de la Guajira) y la región húmeda al sur que se inicia en el valle medio del Magdalena y recibe la influencia del mar Caribe, lo que propicia un movimiento ciclónico y la temperatura (Benavides, 2007). Este fenómeno hace que el océano se cargue de energía que es totalmente opuesta a la carga eléctrica concentrada en las nubes, generando impacto de rayos, los cuales afectan de manera aleatoria a toda la ciudad, Ver Tabla 23.

El sitio llamado Villa Celia con coordenadas geográficas 10.964348° , -74.879400° es la zona con mayor incidencia de impacto de rayos, con una cantidad de 384 impactos, en este lugar está ubicado empresa de colchones, ver Figura 28(a). Así mismo, estructuras de transmisión y torres de comunicación son zonas de alta incidencia de impactos. En Barranquilla se resaltan dos estructuras urbanas el Puente Pumarejo y el Hotel Barranquilla plaza ya que también presentaron alta incidencia de rayos 176 y 107 respectivamente.

La zona conocida como Platanal El Peludo, es el lugar donde abundan edificaciones, como lo son: Estructuras de Transmisión (ítem 3 y 4) y Torre de telecomunicación (ítem 5), registrando que reciben una gran cantidad de rayos de 291, 264 y 213, respectivamente. En comparación con las estructuras en estudio (ver las que están en negrilla) que tienen mayor altura, se evidencia que a mayor altura de la estructura, no incide el aumento de impacto de rayos, ver Figura 27.

Tabla 23.

Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Barranquilla.

Ítem	Tipo de zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
1	Zona Comercial (estructura)	384	10.964348°, -74.879400°	5
2	Zona boscosa	352	10.964843°, -74.879400°	-
3	Estructura de transmisión	291	10.960539°, -74.867048°	40-45
4	Estructura de transmisión	264	10.942909°, -74.831060°	40-45
5	Torre de telecomunicación	213	10.944037°, -74.845672°	35
6	Urbanización (6 pisos)	207	10.959538°, -74.855923°	18
7	Zona comercial (estructura)	188	10.947773°, -74.835205°	10
8	Estructura de transmisión	188	10.949462°, -74.834222°	40-45
9	Urbanización (10 pisos)	176	10.992727°, -74.818869°	30
10	Puente Pumarejo	176	10.950699°, -74.759187°	16
11	Urbanización (14 pisos)	167	10.993609°, -74.823881°	42
12	Urbanización (16 pisos)	136	10.991217°, -74.815524°	48
13	Hotel Barranquilla plaza (30 pisos)	107	11.003638°, -74.8112194°	92
14	Urbanización (13 pisos)	103	10.998326°, -74.810088°	39
15	-Edificio Green Towers (34 pisos)	76	11.0061056°, -74.8030917°	101
	-Edificio The Icon (50 pisos)		11.0069694°, -74.8056417°	148
16	-Edificio Grattacielo (52 pisos)	71	11.0085444°, -74.8094611°	154
	-Mirage 57		11.0081139°, -74.8092167°	163
	-Iluminatta		11.0082361°, -74.8097611°	145
	-Solara Tower		11.0079167°, -74.8094833°	142
	-Torre luxe		11.0074333°, -74.8110972°	175
	-Edificio Malibú		11.0033722°, -74.8124444°	80
17	Estadio metropolitano Roberto Meléndez	67	10.926925°, -74.8006583°	43
18	Urbanización	50	10.945650°, -74833152°	-

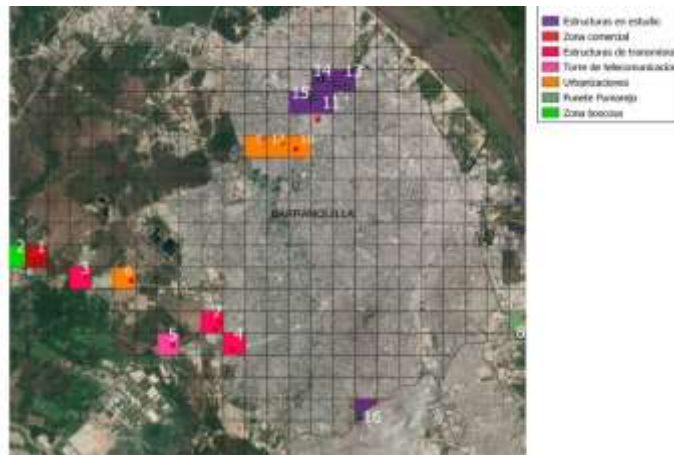


Figura 27. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Barranquilla.



Figura 28. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Barranquilla (a) 1. Zona Comercial (estructura) con 384 impactos (b) 3. Estructura de transmisión con 291 impactos, (c) 4. Estructura de Transmisión con 264 impactos, (d) 8. Estructura de Transmisión con 188 impactos, (e) 5. Torre de telecomunicación con 213 impactos, (f) 13. Hotel Barranquilla Plaza con 107 impactos y (g) 10. Puente Pumarejo con 176 impactos

3.11 Municipio de Pasto-Nariño

Para el análisis de la ciudad de Pasto-Nariño, se tomaron en cuenta 10 estructuras que son consideradas las más elevadas en el municipio, la Tabla 24 plantea la latitud, longitud, altura sobre el nivel del mar, altura en metros, están caracterizadas en edificios de urbanización, hotel Agualongo, la iglesia San Andrés, la clínica los Andes y el Estadio de fútbol la Libertad.

Tabla 24.

Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Pasto con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.

Departamento	Ciudad	DDT (descargas / km ² por año)	NC (días)	ALTITUD (msnm)
Nariño	Pasto	0.92	72	2527
Estructuras	Latitud	Longitud	Altitud sobre el nivel del mar (m)	Altura de la estructura (m)
Edificio Campos de Castilla	1°13'16.37" N	77°17'11.45" O	2532	65
Hotel Agualongo	1°12'53.55" N	77°16'44.20" O	2539	54
Edificio Sindamanoy	1°13'7.30" N	77°16'47.00" O	2529	50
Edificio Portal Valle de Atriz	1°13'58.92" N	77°17'11.32" O	2476	47
Cámara de Comercio	1°13'58.92" N	77°16'48.10" O	2529	37
Torre Refugio del Valle	1°13'57.59" N	77°17'11.19" O	2476	32
Edificio los Hexágonos	1°13'8.94" N	77°17'15.15" O	2512	31
Iglesia San Andrés	1°13'1.93" N	77°16'52.85" O	2510	30
Clínica los Andes	1°13'39.04" N	77°17'10.58" O	2470	29
Estadio la Libertad Pasto	1°13'52.29" N	77°16'40.04" O	2530	25

3.11.1 Zonas con mayor número de impactos de rayos. La Tabla 25 se presentan las zonas con mayor cantidad de impactos de rayos, así como la ubicación geográfica de estructuras elevadas, ver Figura 29. Al igual que Tunja, se puede observar que Pasto es una de las localidades

en estudio con menor incidencia de rayos, en vista de que estos se concentran en zonas boscosas no afectan las estructuras elevadas que se consideraron para el presente estudio. La zona con mayor incidencia de rayos con una cantidad de 31 impactos, este lugar recibe el nombre de Mora Surco, donde no se encuentran estructuras en estos sitios de mayor densidad de descargas atmosféricas, ver Figura 30(a).

Tabla 25.

Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Pasto.

Ítem	Tipo de Zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
1	Zona boscosa	31	1.328598°, -77.312768°	-
2	Zona boscosa	27	1.223647°, -77.231066°	-
3	Torre de transmisión	19	1.256262°, -77.267485°	-
4	Zona boscosa	11	1.245620°, -77.257433°	-
5	Zona boscosa	5	1.257489°, -77.274985°	-
6	-Edificio portal valle de Atriz	4	1.2330333°, -77.2864778°	47
	-Clínica los Andes		1.2275111°, -77.2862722°	29
8	-Hotel Agualongo	3	1.214875°, -77.2789444°	54
	-Edificio Sindamanoy		1.2186944°, -77.2797222°	50
	-Cámara de Comercio		1.2330333°, -77.2800278°	37
	-Estadio la Libertad Pasto		1.2311917°, -77.2777889°	25
	-Iglesia San Andrés		1.2172028°, -77.2813472°	30
9	Edificio los hexágonos	2	1.21915°, -77.2875417°	31
10	-Edificio campos de castilla	1	1.2212139°, -77.2865139°	65
	-Torre refugio del valle		1.2326639°, -77.2864417°	32

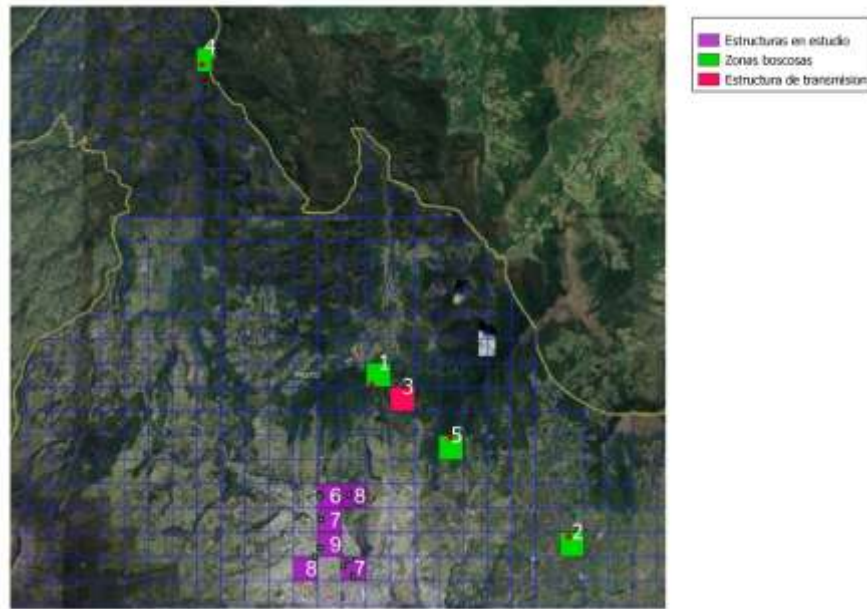


Figura 29. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Pasto.



Figura 30. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Pasto: (a)1. Zona boscosa (Mora Surco) con 31 impactos, (b) 3. Estructura de Transmisión con 19 impactos, (c) 6. Clínica los Andes con 4 impactos y (d) 8. Hotel Agualongo con 3 impactos.

3.12 Municipio de Cartagena-Bolívar

Efectuado el análisis en la ciudad de Cartagena, es necesario resaltar que, al ser un distrito turístico y cultural, se encuentra posicionado como uno de los destinos más concurridos del país. Esto sumado a más de un millón de habitantes, hace que la demanda hotelera incremente, generando la construcción de estructuras que son consideradas elevadas para el estudio como lo muestra la Tabla 26; Que ilustra las características de latitud, longitud, altura sobre el nivel del mar y altura en metros.

Tabla 26.

Estructuras elevadas analizadas en la ciudad de Cartagena con su respectiva latitud, longitud altura sobre el nivel del mar y altura en metros.

Departamento	Ciudad	DDT (descargas / km² por año)	NC (días)	ALTITUD (MSNM)
Bolívar	Cartagena	7.95	84.5	2
Estructuras	Latitud	Longitud	Altitud sobre el nivel del mar(m)	Altura de la estructura (m)
Hotel Estelar	10°23'39.85" N	75°33'38.08" O	20	202
Plaza Bocagrande	10°24'39.62" N	75°33'4.78" O	4	190
Gran Bay Club	10°23'53.63" N	75°33'19.92" O	20	170
Edificio Palmetto	10°24'15.49" N	75°33'17.55" O	12	160
Hotel Palmetto Eliptic	10°24'9.81" N	75°33'22.43" O	5	156
Edificio Luna de Mar	10°24'46.32" N	75°32'23.14" O	10	145
Edificio Regata	10°24'38.73" N	75°32'19.11" O	4	136
Edificio Infinito	10°24'29.21" N	75°33'6.70" O	7	130
Edificio Infinitum	10°24'8.05" N	75°33'14.98" O	6	130
Edificio Ocean Tower	10°24'13.44" N	75°33'19.70" O	9	125

3.12.1 Zona con mayor número de impactos de rayos. De acuerdo con la Tabla 27 se realizó el análisis satelital, arrojando zonas como el canal del Dique, refinерías, torres de telecomunicación

y el estadio de Fútbol Jaime Morón. Ver Figura 31. Según el estudio realizado en la capital del departamento de Bolívar, es preciso señalar que el punto geográfico con mayor incidencia de descargas atmosféricas, es la provincia de Tierra Grata, encontrando una estructura de Transmisión, con coordenadas geográficas 10.535596°; -75.381467°, en la que se registraron 66 impactos; Siendo la principal característica la presencia de bosque y estructuras de transmisión, como se muestra en la Figura 32(a).

En el estudio de las zonas con mayor cantidad de impacto de rayos, se registró que las estructuras en estudio las zonas como: El canal del Dique, el barrio Olaya Herrera y el Estadio Jaime Morón, que no son edificaciones con una considerable altura, son mucho más incidentes a descargas atmosféricas en comparación a las estructuras en estudio (ver las que están en negrilla).

Tabla 27.

Estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Cartagena.

Ítem	Tipo de zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
1	Estructura Transmisión (tierra grata)	66	10.535596°-75.381467°	-
2	Zona árida	63	10.569118°, -75.375039°	-
3	Zona boscosa	61	10.260637°, -75.536051°	-
4	Canal del Dique	60	10.276861°, -75.519767°	-
5	Urbanización	56	10.369945°, -75.500577°	-
6	Barrio Olaya Herrera	50	10.409685°, -75.488679°	-
7	-Planta yara -Fepco	48	10.303583°, -5.499251° 10.324580°, -75.489627°	-
8	Antena de telecomunicación	46	10.395762°, -75.504856°	20-25
9	Polybol	45	10.351742°, -75.493430°	-
10	Estadio Jaime Morón	40	10.405126°, -75.497674°	-
11	-Edificio regata -Edificio luna de mar	21	10.4107583°, -75.5386417° 10.4128667°, -75.5397611°	136 145
12	Gran bay club	15	10.3982306°, -75.5555333°	170

Ítem	Tipo de zona	Cantidad de impactos	Coordenada geográfica	Altura (m)
13	-Hotel Palmetto Eliptic	14	10.402725°, -75.5562306°	156
	-Edificio Palmetto		10.4043028°, -75.554875°	160
	-Edificio Ocean Tower		10.4037333°, -75.5554722°	125
	-Edificio infinito		10.4081139°, -75.5518611°	130
	-Edificio infinitum		10.4022361°, -75.5541611°	130
14	Hotel estelar	12	10.3944028°, -75.5605778°	202
15	Plaza Bocagrande	1	10.4110056°, -75.5513278°	190

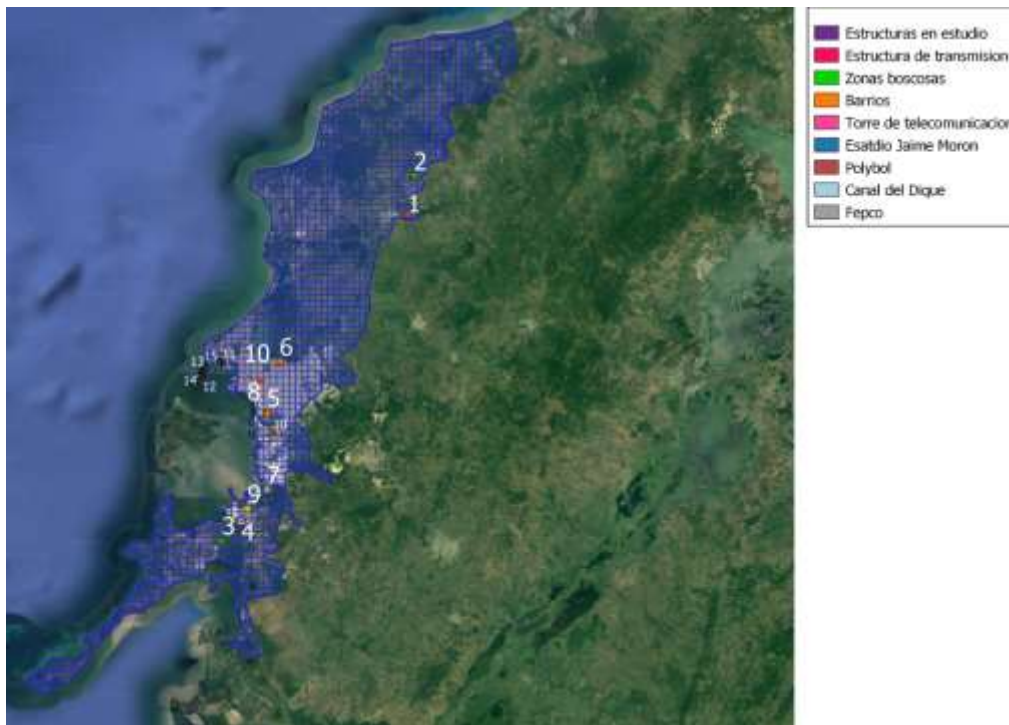


Figura 31. Ubicación geográfica de estructuras elevadas y sitios específicos con mayor incidencia de rayos en la ciudad de Cartagena.

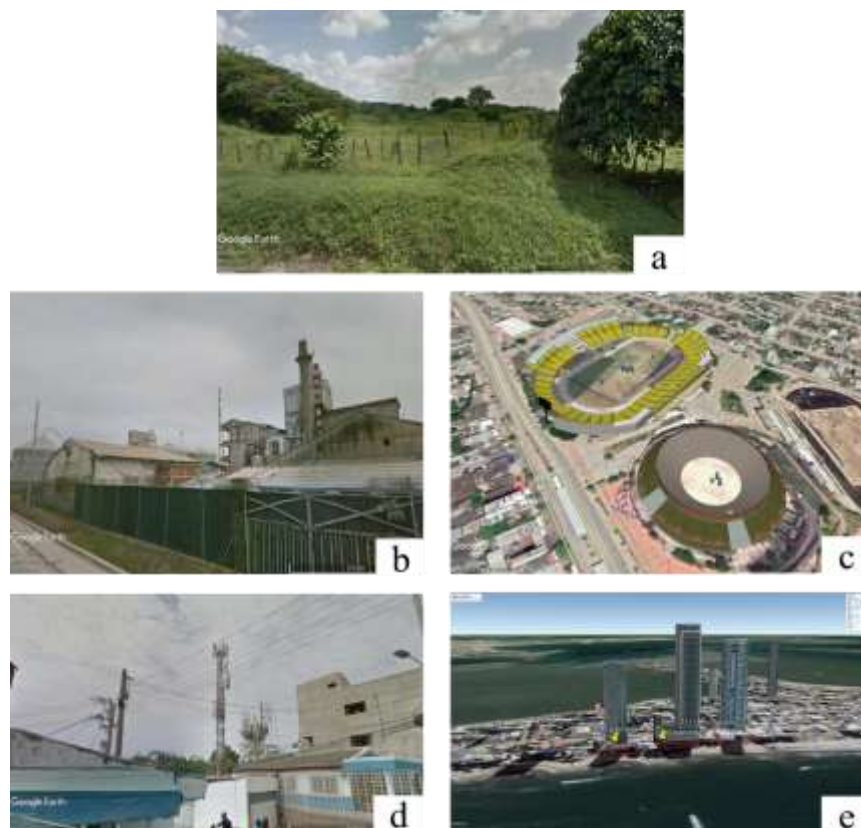


Figura 32. Sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos en la ciudad de Cartagena (a) Provincia de Tierra Grata, (b) Estructura de Transmisión con 66 impactos, (c) Estadio Jaime Morón con 40 impactos, (d) Torre de telecomunicación con 46 impactos y (e) Edificios Regata y Luna de Mar con 21 impactos.

4. Conclusiones

Gracias a las herramientas proporcionadas por el software QGIS, se caracterizó adecuadamente la información obtenida por Keráunos SAS y las estructuras elevadas que fueron objeto de estudio, suministrando el número de descargas eléctricas que pueden impactar una estructura elevada dentro de un polígono cuadrado con espaciados verticales y horizontales de 600 metros. Adicionalmente, se logró obtener las coordenadas geográficas de los sitios específicos con mayor cantidad de impacto de rayos.

Con las fuentes de información de rayos proveídas por la red LINET, se pudo comprobar que gran parte de las zonas con mayor densidad de descargas atmosféricas de las ciudades en estudio, no se encuentran en el casco urbano, puesto que se localizan en zonas boscosas y zonas montañosas de los municipios, evidenciando que no siempre las estructuras más altas son la de mayor incidencia de rayos.

Se constató que, de las zonas en estudio, Medellín presenta la mayor actividad de descargas atmosféricas nube- tierra en los periodos 2016, 2017, 2018 con un total de 417 impactos. Este sitio recibe el nombre de Cerro Padre Amaya, con coordenadas geográficas 6.279844°; -75.686857. Teniendo en cuenta que es una ciudad que posee una particular geografía que facilita que este tipo de fenómenos se den, dado que se encuentra ubicada en el centro geográfico del Valle de Aburrá y las cordilleras que lo encierran.

Los resultados obtenidos en este trabajo de grado de impactos de rayos, muestran que las estructuras elevadas que presentan mayores descargas atmosféricas pertenecen a la ciudad de

Barranquilla, puntualmente el Hotel Barranquilla Plaza registrando con 107 impactos. Atribuyendo este resultado a que, la capital del departamento del Atlántico es una zona semiárida donde los vientos alisios del noreste soplan paralelos al litoral, absorbiendo la humedad, empujándola hacia el interior de la Región Caribe hasta las estribaciones de la cordillera de los Andes, donde producen abundantes precipitaciones.

Una vez cuantificada la información suministrada por la red LINET, sobre la densidad de descargas a tierra, se observó que ciudades como: Tunja, Pasto, Bucaramanga y Bogotá, presentan la menor incidencia de rayos por áreas de 600 m. En consecuencia, a mayor altura de la superficie terrestre respecto al nivel del mar, menor es la presión del aire y menor inestabilidad atmosférica, generando menor descargas atmosféricas.

Analizadas las cifras de impactos en cada una de las estructuras elevadas objeto de estudio, se demostró que en la ciudad de Tunja, las estructuras: Edificio San Sebastián, Conjunto el Recreo, y el Edificio Acarigua, no tienen registro alguno de descargas atmosféricas, ya que no fueron impactadas durante el periodo de interés.

Una vez ubicados los sitios específicos con mayor impacto de rayos nube-tierra a través de la implementación del programa QGIS, se encontró que el comportamiento de los HOTSPOTS en cada una de las ciudades fue muy similar, ya que se evidenció que estaban localizados en los alrededores de la ciudad. Esto se debe a que están rodeados de valles y/o zonas montañosas, razón por la cual las Torres de Telecomunicación y Transmisión, son las estructuras elevadas con mayor afectación por la densidad de descargas a tierra.

Referencias Bibliográficas

- Aranguren D. et al. (2013). Colombian Total Lightning Detection Network and early detection of failure risks for power systems. *Simp. Int. sobre Calid. la Energía Eléctrica (VII SICEL)*, 1–6.
- Bazelyan, E. M., & Raizer, Y. P. (2000). *Lightning physics and lightning protection., 1st Editio.*
- Benavides, H. O. (2007). Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. *Ideam doi: IDEAM–METEO/008-2007*, 1–102.
- Body, C. (2019). *International Electrotechnical Commission.*
- Committee, G. S., & Council, N. R. (1986). *The Earth's Electrical Environment. National Academies Press.*
- Cortés Cortés, A. H. (2018). *Implementación de un Sistema MDF- GIS de Detección , Localización y Monitoreo de Descargas Atmosféricas en Tiempo Real Implementación de un Sistema MDF- GIS de Detección , Localización y Monitoreo de Descargas Atmosféricas en Tiempo.*
- Cruz Mosquera, C. A. (2015). *Evaluación del riesgo por rayos incluyendo un Sistema de Alarma de Tormentas (SAT) en Colombia.*
- MacGorman, D., MacGorman, R., & Rust, W. (1998). *The electrical nature of storms.*
- Oliver, J. (2013). *Identificación y análisis de los sitios con mayor actividad de rayos en el departamento de Santander.* Universidad Industrial de Santander.
- Perez Perez, D. d. (2014). *Eficiencia de los sistemas de localización del rayo en zonas montañosas.*

Puig, J. M. (2004). *Estudio de la carga eléctrica asociada al rayo: caracterización de las tormentas en Cataluña*. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

Sanchez, H. T. (2002). *El espacio y el tiempo en los parametros del rayo*.

Torres-sánchez, H. (2014). *¿Qué rayos sabemos?*

Younes, C., & Torres, H. (2002). *Evaluación de parámetros del rayo con mediciones terrestres y satelitales para Colombia*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Yunda, J. G. (2018). *Bogotá, una de las ciudades con más densidad de población del mundo*. Bogotá.

Zapata, G. O. (2018). *¿Por qué caen cientos de rayos durante una hora en el Valle de Aburrá?* Medellín .