

Artículo original

Caracterización de la carga eléctrica en nubes de tormenta en el trópico y sus aplicaciones

Characterization of electric charge in tropical thunderstorm clouds and its applications

Horacio Torres-Sánchez

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Resumen

En este artículo se presenta un avance en la caracterización de la estructura eléctrica de las nubes de tormenta en el trópico a partir de las mediciones realizadas utilizando Sistema Colombiano de Mapeo de Rayos (*Colombian Lightning Mapping Array - COLLMA*), molinos de campo eléctrico (EFM) y la Red Colombiana de Detección Total de Rayos (*Colombian Total Lightning Detection System - CTLDN*). Mediante el análisis de los datos obtenidos, se determinaron la carga eléctrica puntual, la altura y la polaridad, así como los patrones de comportamiento y los ciclos de vida en una zona tropical típica en la que nunca se habían desarrollado estudios con equipos integrados de alta definición y mediciones de campo electrostático. Los resultados obtenidos confirmaron que a menor latitud (trópico), mayor es la corriente pico de retorno del rayo. Con ejemplos prácticos, se recomienda la forma de utilizar correctamente la protección contra rayos en zonas tropicales como Colombia.

Palabras clave: Rayos; Estructura eléctrica; Zona tropical.

Abstract

This paper presents an advance in the characterization of the electrical structure of tropical storm clouds from measurements obtained with the Colombian Lightning Mapping Array (COLLMA), electric field mills (EFM), and the *Colombian Total Lightning Detection System (CTLDS)*. The analysis of the data obtained determined the point electrical charge, the height, and the polarity, as well as the behavior patterns and life cycles in a typical tropical zone. Studies using integrated high-definition equipment and electrostatic field measurements had never been conducted in this region. The results of the study confirmed that the peak lightning return current increases at lower latitudes (tropics). Using practical examples, the study recommends how to achieve effective lightning protection in tropical zones such as Colombia.

Keywords: Lightning; Electrical structure; Tropical zone.

Introducción

Hipótesis de investigación

La hipótesis de investigación sobre la variación espacial y temporal de los valores de los parámetros del rayo ha estado presente desde hace más de 40 años en todos los proyectos académicos y tesis de pregrado, maestría y doctorado del Programa de Investigación en Adquisición y Análisis de Señales de la Universidad Nacional de Colombia (PAAS-UN) (Torres, 1998).

La hipótesis se fundamentó en los principios científicos planteados por los físicos ingleses Wilson (1920) y Whipple (1929) sobre el circuito eléctrico global y la contribución dominante, por una superposición de efectos, de las tres mayores zonas de convección profunda tropical del planeta: la Suramérica tropical, el centro de África y el continente marítimo (sureste de Asia y Australia).

Citación: Torres-Sánchez H. Efecto Caracterización de la carga eléctrica en nubes de tormenta en el trópico y sus aplicaciones. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2026 Oct 14. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.4134>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Horacio Torres Sánchez;
htorress@gmail.com

Recibido: 11 de junio de 2026

Aceptado: 28 de septiembre de 2026

Publicado en línea: 14 de octubre de 2026



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Con base en los principios de Wilson y Whipple, en 1982 se inició la investigación para comprobar la hipótesis: se tomaron las primeras estimaciones del nivel ceráunico en Colombia (Torres, 1998) y posteriormente se hicieron mediciones, el análisis de modelos físicos y matemáticos y la revisión bibliográfica de los otros parámetros del rayo.

El parámetro del rayo más recientemente caracterizado ha sido la carga eléctrica de la nube de tormenta en el trópico, así como su altura sobre el nivel del piso y la polaridad en las nubes del tipo cumulonimbo, responsables del inicio de la actividad de los rayos nube-tierra, para comprender más objetivamente el comportamiento del rayo.

Este trabajo de investigación es muy importante para continuar verificando estadísticamente la variación de los valores de los parámetros de los rayos correspondientes a la densidad de rayos a tierra, la corriente pico del rayo, la carga eléctrica en nubes de tormenta, la polaridad y otros en la zona tropical (Torres, 1998) y compararlos con los de zonas templadas como los Estados Unidos, Europa o Asia (Torres *et al.*, 2015).

La zona tropical se ubica geográficamente en el centro del planeta, entre las latitudes del trópico de Cáncer y el trópico de Capricornio, en tanto que la zona templada se ubica en latitudes medias, entre los trópicos y los círculos polares, tanto en el hemisferio norte como en el hemisferio sur. Los resultados que aquí se presentan son fundamentales para el diseño de una objetiva protección contra rayos. Su variación estadística hace que las normas internacionales de protección contra rayos, desarrolladas en países situados en latitudes templadas (Estados Unidos, Europa o países asiáticos) como la IEC62305, la IEEE1410, la EN50536 y otras, deben tener en cuenta esta variación espacial y temporal para mitigar la alta mortalidad por rayos (Navarrete *et al.*, 2000; Cooper, 2007; Torres, 2015) o las frecuentes fallas de equipos eléctricos y electrónicos (ISA, 1989) que ocurren en la zona tropical (Torres, 1998; Barreto & Torres, 1996).

Datos y métodos de identificación de la estructura eléctrica típica de los rayos en el trópico

En la metodología diseñada en esta investigación, se utilizaron tres tecnologías diferentes para caracterizar las nubes de tormenta (Castro, 2019): los molinos de campo eléctrico (EFM), que son dispositivos desarrollados por el equipo de investigación PAAS-UN capaces de detectar todas las fases de la nube de tormenta midiendo la electrificación que se produce en ella antes, durante y al final de los eventos de tormenta. Miden las variaciones del campo eléctrico y predicen tormentas eléctricas con anticipación, informando constantemente sobre las condiciones ambientales en el sitio y emitiendo alertas tempranas (International Electrotechnical Commission - IEC, 2024).

Se empleó, asimismo, la Red Colombiana de Detección Total de Rayos (CTLDN), la cual se compone de sensores que operan en baja frecuencia (LF) y muy baja frecuencia (VLF) para detectar y localizar descargas atmosféricas. En Colombia esta red está instalada desde 2011 y actualmente cubre más del 70 % del territorio con un error promedio de 0,2 km en la localización (Aranguren *et al.*, 2017). Esta red utiliza la técnica de detección de tiempo de llegada y un algoritmo mejorado que permite obtener la latitud y la longitud de cada descarga detectada, la altura [m], la corriente [kA] y el error de ubicación.

También se contó con el Sistema Colombiano de Mapeo de Rayos (COLLMA), un sistema de alta precisión desarrollado por New Mexico Tech en el año 2000. Este sistema opera en muy alta frecuencia VHF y proporciona información sobre fuentes de radiación asociadas a rayos en tres dimensiones y en el tiempo. Las fuentes se detectan mediante la técnica de tiempo de llegada (Rison, 2001) en por lo menos seis estaciones, donde se obtiene la ubicación de las fuentes con un error de 6 a 12 m en el eje horizontal y de 20 a 30 m en el eje vertical.

Metodología para la identificación de la estructura eléctrica típica de las nubes de tormenta en el trópico

Inicialmente, la metodología se basó en un estudio realizado en Colombia (López *et al.*, 2018), concretamente en la ciudad de Santa Marta (11° 14' 50" latitud norte y 74° 12' 06" latitud oeste), que caracterizó la estructura eléctrica de dos tormentas a partir de

información de sistemas de alta definición que permitieron la identificación de las tres regiones de carga eléctrica y las regiones negativas superiores o capas de apantallamiento utilizando información del COLLMA, compuesta por siete sensores con tecnología *Lightning Mapping Array* (LMA).

La **Tabla 1** muestra los eventos de tormenta considerados en cada análisis de la presente investigación. El examen del comportamiento de las tormentas y la identificación de la estructura de la carga de los rayos requieren un análisis gráfico de cada líder y descarga detectada dentro de la tormenta. Esta información se analiza y procesa para obtener las distribuciones de carga en las nubes, las alturas de inicio de las descargas y su duración. Debe destacarse que los datos proporcionados por el COLLMA deben someterse a un análisis detallado para caracterizar los parámetros de cada descarga. Estos datos pueden distorsionar los resultados, por lo que cualquier información de baja calidad debe descartarse.

La información se analizó con la siguiente metodología:

- Evaluación del modelo de carga puntual con información del EMF y la CTLDN. Para ello se evaluaron 16 eventos de tormenta.
- Evaluación del modelo de carga puntual con información del EMF y del COLLMA. Para ello se evaluaron cinco eventos de tormenta.
- Análisis mediante algoritmos diseñados para la información del COLLMA. Para ello se evaluó el evento de tormenta del 15/07/2017.
- Análisis manual (gráfico) del COLLMA. Para ello se evaluó el evento de tormenta del 15/07/2017.
- Análisis integrado de la información de las tres fuentes.

Antes de entrar en la descripción del análisis de las mediciones, es importante

Tabla 1. Eventos de tormenta seleccionados

Fecha (día-mes-año)	Sistema Colombiano de Detección Total de Rayos	Molino de campo eléctrico	COLLMA
	Cantidad de impactos	Disponible/ no disponible	Disponible/ no disponible
14-07-2017	254	Disponible	Disponible
15-07-2017	829	Disponible	Disponible
16-07-2017	1.020	Disponible	Disponible
02-08-2017	1.015	Disponible	No disponible
03-08-2017	972	Disponible	Disponible
04-08-2017	195	Disponible	Disponible
09-08-2017	231	Disponible	No disponible
13-08-2017	236	Disponible	No disponible
25-08-2017	183	Disponible	No disponible
28-08-2017	211	Disponible	No disponible
30-08-2017	1.000	Disponible	No disponible
03-09-2017	141	Disponible	No disponible
17-09-2017	553	Disponible	No disponible
18-09-2017	171	Disponible	No disponible
23-09-2017	192	Disponible	No disponible
29-09-2017	1.162	Disponible	No disponible

diferenciar dos fenómenos: en el fenómeno electromagnético del rayo, un relámpago (*flash*) es el evento completo de la descarga eléctrica atmosférica, que dura milésimas de segundo. Por otra parte, un impacto (*stroke*) es cada uno de los pulsos eléctricos individuales que componen un relámpago (*flash*). Es decir, un solo relámpago (*flash*) puede contener varios impactos (*strokes*).

En la **Figura 1** se observa la señal de las tormentas del 2017-07-15 al 2017-07-15, de las cuales la primera se tomó como el caso de estudio de este estudio en el análisis manual y comparativo de solución de modelos de carga puntal a partir de las distintas fuentes de información utilizadas. Las variaciones de campo eléctrico se midieron con el molino de campo eléctrico (EFM).

Mediante estas mediciones es posible analizar cómo se formó la tormenta, cuánto tiempo pasó desde su formación hasta las primeras descargas eléctricas atmosféricas y la duración total de la tormenta hasta su disipación, entre otras conclusiones posibles a partir del análisis de la señal de campo eléctrico.

Asimismo, es posible visualizar los valores de las variaciones del campo eléctrico e identificar a qué distancia se producen dichas variaciones, las cuales se analizan con el modelo de carga puntal para obtener los valores de la carga y la altura de los centros de carga.

El COLLMA suministra información de las fuentes emitidas por los líderes de rayos en VHF, la cual se presenta de manera gráfica en franjas de 10 minutos. Se analiza entonces la distribución espacial de cada relámpago (*flash*) en un evento de tormenta para identificar los líderes de rayos asociados a las regiones de carga de la nube de tormenta, así como la distribución de su carga.

En la **Figura 2** se observa cómo se visualiza esta información. El recuadro azul muestra todos los relámpagos (*flashes*) detectados en función del tiempo y su altura; el recuadro verde muestra la ubicación (latitud y longitud) de todas las fuentes durante los 10 minutos, y los recuadros amarillo y rojo muestran la distribución de la altura en función de la latitud y longitud de las fuentes, respectivamente.

Por otro lado, es posible cambiar el código de colores del gráfico y visualizar la distribución de las fuentes según su altura, potencia emitida o velocidad.

En la **Figura 3** se observa la forma en que se identifica la polaridad de los líderes según la velocidad de propagación y la región de carga que atraviesa. En la parte superior se visualiza el instante de tiempo en que inicia el relámpago (*flash*) a analizar. Cada uno de los puntos visualizados se grafica con colores de acuerdo con el tiempo transcurrido, siendo

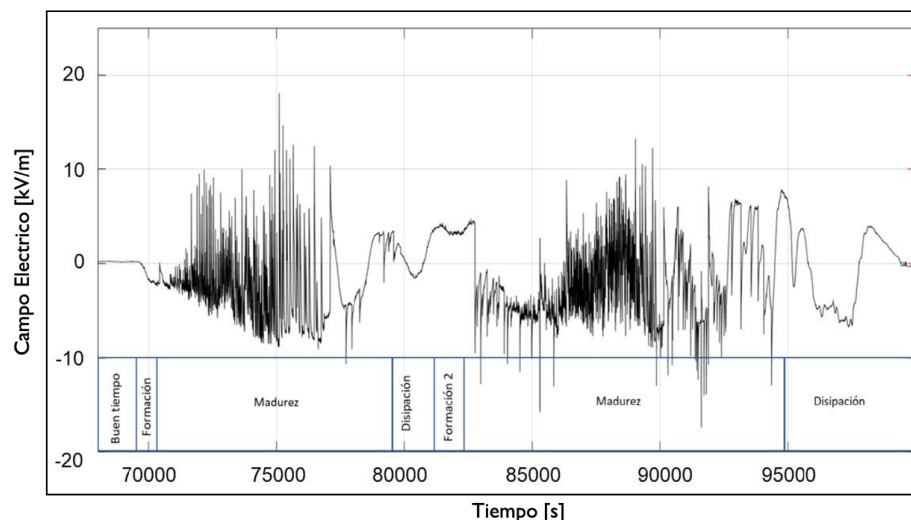


Figura 1. Tormentas del 15/07/2017 al 16/07/2017

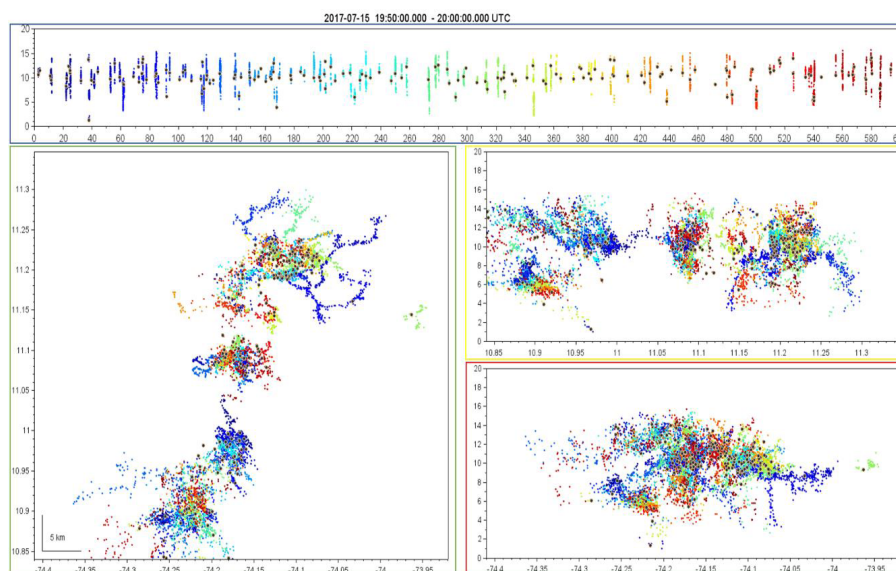


Figura 2. Ventana gráfica del COLLMA

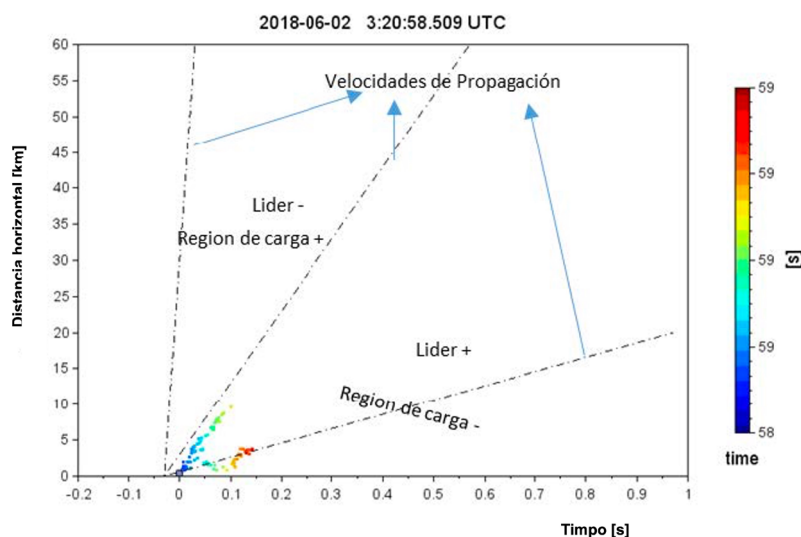


Figura 3. Análisis gráfico de las velocidades de propagación del líder del rayo

azul el comienzo y rojo el final; de esta forma se puede identificar el relámpago (*flash*) en el gráfico principal donde se visualizan todos ellos.

Dado que el análisis de las regiones de carga se hace en fracciones de 10 minutos, se hace un comparativo de cada evento con los que ocurren en los 10 minutos, es decir, se toman varios eventos seguidos y se determinan las regiones de carga, de manera que si aparece un evento atípico en el cual no se logra discernir bien la polaridad del líder, los datos no se alteran puesto que la muestra de 10 minutos de eventos de tormenta suministra la información necesaria para identificar las regiones, así no se depende de un solo relámpago (*flash*). Se toma, entonces, la polaridad y se promedian el máximo y el mínimo de altura de los líderes en los 10 minutos para así obtener la región de carga en ese tiempo. Este análisis se hizo para toda la tormenta del 15-07-2017.

Con el análisis propuesto es posible obtener la siguiente información:

Regiones de carga eléctrica de la nube de tormenta. Se validó con la información obtenida mediante el algoritmo desarrollado, a partir del cual se obtuvieron los valores de altura máxima y mínima de cada descarga con los cuales se obtuvo la región de carga.

Ciclo de vida de la tormenta. Al determinar cómo varió la altura de las regiones de carga e integrarla con la información de la CTLDN, fue posible establecer la relación entre los tipos de rayos producidos y la altura de dichas regiones. Teniendo en cuenta que es necesario determinar el centro de carga para realizar el análisis con la información del EFM y obtener la solución del modelo de carga puntual, se comenzó por eliminar la región de origen de la descarga y, posteriormente, se precisó el centro de carga. Para ello, primero se filtró cada relámpago (*flash*) detectado por la red de sensores de alta definición del COLLMA, ya que solo se analizaron aquellos con información suficiente.

Inicialmente, los impactos (*strokes*) se agruparon según el número de relámpagos (*flashes*) indicados en cada fuente y, dada la calidad y la cantidad de la información, se filtraron con menos de diez fuentes. Para eliminar esta región, se utilizó el algoritmo planteado por **Lund et al.** (2009) y modificado por **Caicedo et al.** (2018), el cual consiste en tomar la ubicación de la primera fuente detectada del relámpago (*flash*) en tres dimensiones, después los siguientes nueve puntos detectados y así obtener la ubicación promedio en coordenadas cartesianas para cada eje X, Y, y Z, y calcular la desviación estándar entre cada punto y el promedio. Una vez identificada la región de inicio del relámpago (*flash*), se almacenó este dato en una base de datos externa y se eliminó de cada uno de los relámpagos (*flashes*) que se iba a analizar. Posteriormente, se utilizó el algoritmo propuesto para aplicar un nuevo filtro que eliminara los relámpagos (*flashes*) cuya región posterior al inicio tuviera al menos diez fuentes y así determinar la posición de los centros de carga eléctrica. Para identificar el centro de carga del relámpago (*flash*) se promediaron la ubicación y la altura de los puntos restantes para cada relámpago (*flash*) y así se obtuvo la ubicación del centro de carga.

Se hicieron varios análisis y, en concordancia con **Maggio et al.** (2009), el modelo que mejor se ajustó fue el de carga puntual, lo que indica que promediar las ubicaciones permite obtener el centro de carga eléctrica para resolver el modelo después de eliminar la región de iniciación del relámpago (*flash*).

Para el análisis de la información del medidor de campo eléctrico contrastada con la información de la CTLDN y el COLLMA, se utilizó el procedimiento de ajuste y calibración propuesto por **Aranguren** (2011), que resulta en la solución del modelo de carga puntual utilizando diferentes criterios y mejoras. La información de la CTLDN y el COLLMA se sincronizó en el tiempo mediante una validación manual gráfica para luego derivar las mediciones del campo eléctrico y detectar las variaciones mayores de 400 V/m. Una vez que estas se determinaron, se localizaron los valores máximos del campo eléctrico tomando la derivada como punto medio y comparando el valor mínimo y el máximo 1,5 segundos antes y 1,5 segundos después del evento. Así se obtuvo el máximo y se asoció un instante de tiempo de la CTLDN o del COLLMA con el máximo identificado en el medidor de campo eléctrico en un rango de tres segundos. Con la información del instante y la variación del campo electrostático (ΔE), se procedió a refinar los datos para ajustar al modelo de carga eléctrica puntual.

La **Figura 4** muestra el modelo utilizado (**Aranguren**, 2011), el cual unifica la carga en un solo punto de la nube y la proyecta, posibilitando que se la observe con polaridad invertida en el suelo.

Para el análisis del campo eléctrico y los datos de la CLTDN, se tomaron 16 episodios de tormenta para ser procesados y filtrados. En el caso del análisis de la red EFM y el COLLMA, se tomaron cinco eventos de tormenta.

La cantidad total de rayos considerada para el ajuste, la validación y la solución del modelo de carga puntual con la información de la red CLTDN fue de 940 descargas nube-tierra después del proceso de depuración que posibilita que se asocien al mismo evento; se tomó el primer evento detectado como el centro de carga eléctrica del rayo. En el caso

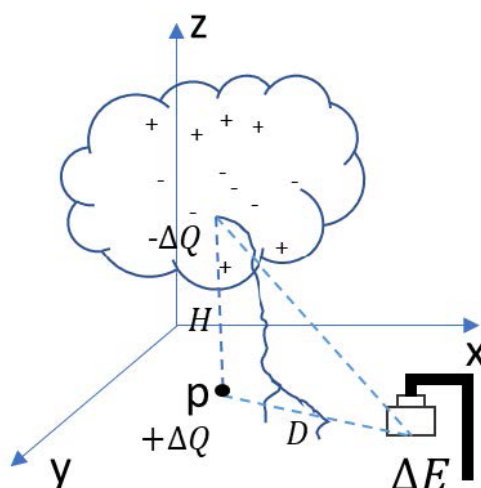


Figura 4. Modelo de carga eléctrica (adaptado de Aranguren, 2011)

del COLLMA, se obtuvieron 223 descargas nube-tierra después de utilizar el algoritmo propuesto para obtener las coordenadas del centro de carga eléctrica. La duración mínima de las descargas analizadas fue de 0,05 segundos, la máxima de 1,13 segundos y la duración promedio de 0,288 segundos. En el estudio de **López et al.** (2017) en la península Ibérica, se obtuvo una duración promedio entre 0,44 y 0,45 segundos y una máxima entre 1,82 y 2,39 segundos.

Discusión

Estos resultados representan un avance significativo en la caracterización de la estructura eléctrica de los rayos en el trópico mediante mediciones hechas con tres tecnologías: el mapeo de rayos (*Lightning Mapping Array - COLLMA*), los molinos de campo eléctrico (EFM) y la Red Colombiana de Detección de Rayos, CLTDLN.

La metodología empleada se aplicó en tres etapas: la clasificación y selección de episodios de tormenta, el procesamiento y análisis de datos de cada fuente y la generación de gráficos de solución.

En el estudio de dos tormentas se estableció que las regiones de iniciación de rayos se concentraban entre los 9 a 10 km y los 14 km.

En la **Tabla 2** se resumen los resultados obtenidos al solucionar el modelo de carga puntual con información del molino de campo eléctrico, de la Red Colombiana de Detección Total de Rayos y del COLLMA para zonas tropicales.

Además, se determinó que la actividad de rayos a tierra aumentaba cuando aparecía la región de carga positiva inferior.

Las regiones de carga presentadas en los estudios de **López et al.** (2018) en la misma región empleando únicamente la información del COLLMA se consideran similares a las encontradas en la tesis de maestría de **Castro** (2019), lo que permite proponer la estructura eléctrica de la nube de tormenta en la costa caribe colombiana como representativa de la región tropical terrestre.

En este estudio se seleccionaron eventos de tormenta ocurridos entre junio y septiembre de 2017 en la zona de cobertura del COLLMA en la ciudad de Santa Marta, Colombia, y sus alrededores, con el objetivo de determinar la estructura eléctrica típica de las tormentas en esta zona tropical. Asimismo, se consideró una región circundante de 20 km alrededor de un EFM instalado en el centro de la ciudad y se utilizó información de la CLTDLN con una cobertura y eficiencia del 90 % al 95 % en esta área. También se recopiló información de los días de tormenta de 2017 en un área de 40 km alrededor del EFM.

A nivel mundial, las mediciones de la estructura espacial de la carga eléctrica de una

Tabla 2. Resumen de la carga eléctrica puntual en la zona tropical y solución del modelo de carga puntual con datos de los molinos de campo eléctrico (EFM), de la red CTLDM y el sistema COLLMA

Parámetro	Cantidad de eventos de tormenta	Cantidad de rayos a tierra asociados a ΔE	Carga [Q]	Altura [km]
Red CTLDM	16	940	-9,415	9,9
Sistema COLLMA	5	223	-9,03	9,7

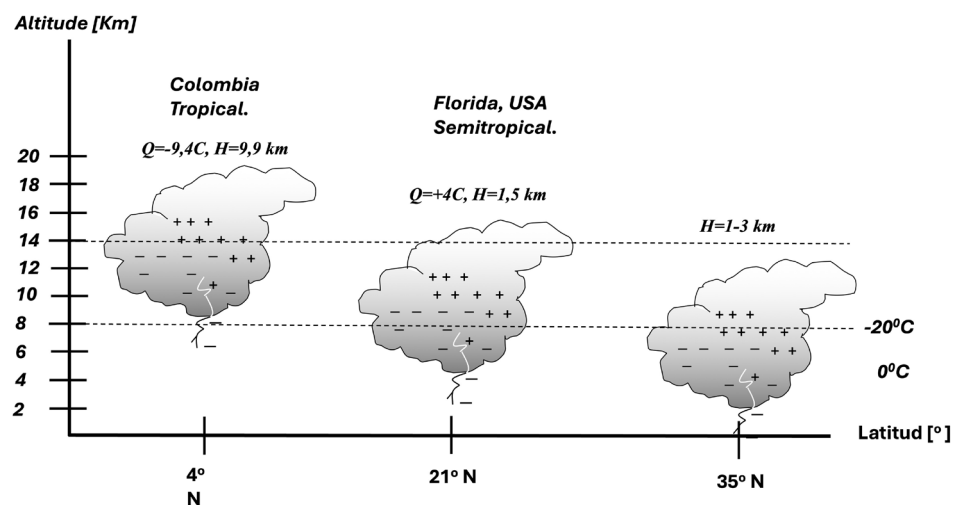
nube de tormenta han sido pocas, pero significativas. En 1941 los investigadores **Simpson y Robinson** (1941) lanzaron varios globos instrumentados en Inglaterra (latitud templada) y, utilizando un modelo físico, encontraron un valor de +4 culombios (C) a una altitud de 1,5 km, de -20 C a 3 km y de +24 C a 6 km. Por otra parte, **Taniguchi et al.** (1982) encontraron que durante el invierno japonés (otra latitud templada), las tormentas tenían una distribución de carga similar a la del verano, pero esta disminuía con la altitud, en tanto que la carga negativa principal estaba entre 1 y 3 km. En la **Figura 5** se muestra la comparación gráfica de la distribución de carga en función de la latitud y de la altitud sobre el nivel del piso en una región subtropical (Florida, Estados Unidos), una región templada (Japón) y una región tropical (Colombia).

Aplicaciones de los resultados del estudio de la estructura de la carga eléctrica en nubes de tormentas en el trópico

Esta investigación aspiraba a generar nuevo conocimiento y responder a la hipótesis sobre la variación espacial y temporal de los valores de los parámetros del rayo. En ese sentido, los resultados han permitido validar las teorías sobre la diferencia electromagnética del rayo en la latitud tropical y en la templada, así como resolver problemas prácticos propios de la zona tropical donde se encuentra Colombia y establecer las bases para que otros científicos continúen avanzando en la materia.

Corriente del rayo

Directamente relacionada con la carga eléctrica está la corriente pico negativa de retorno del rayo expresada en kA. El primer estudio que demostró claramente la dependencia de la corriente pico negativa de retorno del rayo con respecto a la latitud fue el de **Orville** (1990). En diciembre del año 2000, el grupo de trabajo WG 33.01.02 del Consejo

**Figura 5.** Distribución de la carga eléctrica en nubes de tormenta en función de la altitud en una región semitropical, una templada y una tropical (adaptado de **Simpson & Robinson**, 1941)

Internacional de Grandes Redes Eléctricas (CIGRE) (**De la Rosa et al.**, 2000) presentó una comparación de la probabilidad acumulada de la corriente pico de los rayos en cuatro sitios tropicales (Malasia, Rodesia, Brasil y Colombia); el valor estadístico promedio de la corriente de las mediciones en estos países tropicales fue de 45 kA. Veinte años más tarde, en el 2020, **Cooray et al.** (2020) presentaron un análisis basado en los resultados de **Orville** (1990) y, aparentemente, en los del grupo de trabajo del CIGRE (**De la Rosa et al.**, 2000), en el que demostraban que en las regiones tropicales la altura hasta el centro de carga negativa era de aproximadamente 8 a 10 km y los valores medianos de las corrientes pico del primer rayo y del subsiguiente rayo de retorno eran de aproximadamente 42 kA y 15 kA, respectivamente.

En la **Figura 6** se observan las corrientes pico de retorno que se obtendrían en distintas regiones geográficas con diferentes alturas desde el centro de carga, comparadas con las corrientes máximas de retorno medidas en el estudio de **Berger** (1975). Cabe destacar que las curvas marcadas en rojo corresponden a una altura de 4 km, la misma de la carga considerada en aquel estudio.

Obsérvese que en la región templada del planeta, la altura del canal podría ser del orden de 1 a 3 km, con una corriente media de 30 kA en Suiza (**Berger**, 1975) y en Japón (**Taniguchi et al.**, 1982). Esta es la corriente pico de retorno del rayo que tomó la norma IEC 62305. Según **Cooray et al.** (2020), en la región tropical se transformaría en una corriente media de aproximadamente 42 kA para una altura del centro de carga de 8 km. En el caso de las descargas de retorno subsiguientes, una corriente media de 12 kA se transformaría en una corriente media de aproximadamente 15 kA.

Si la altura hasta el centro de carga es mayor, como en el caso de una zona tropical como Colombia, en la cual es de 9,9 km (**Torres et al.**, 2015a; **Castro**, 2019), las corrientes máximas también aumentan. Por ejemplo, si la altura hasta el centro de carga negativa aumenta a unos 9 km, los valores medianos de las corrientes pico del primer rayo y los subsiguientes rayos de retorno aumentan a unos 45 kA y 16 kA, respectivamente.

Tomando como referencia las mediciones de **Berger** (1975) realizadas sobre el Monte San Salvatore, se demuestra que en regiones tropicales donde la altura del centro de carga negativa es de aproximadamente 10 km, los valores de la media de las corrientes pico del primer rayo y del subsiguiente rayo de retorno son de 45 kA y 16 kA, respectivamente. Estas estimaciones concuerdan razonablemente con los datos experimentales disponibles. Los resultados presentados también evidencian que la corriente pico del subsiguiente rayo de retorno en descargas iniciadas por torres disminuye a medida que aumenta la altura de la torre.

Justificación científica

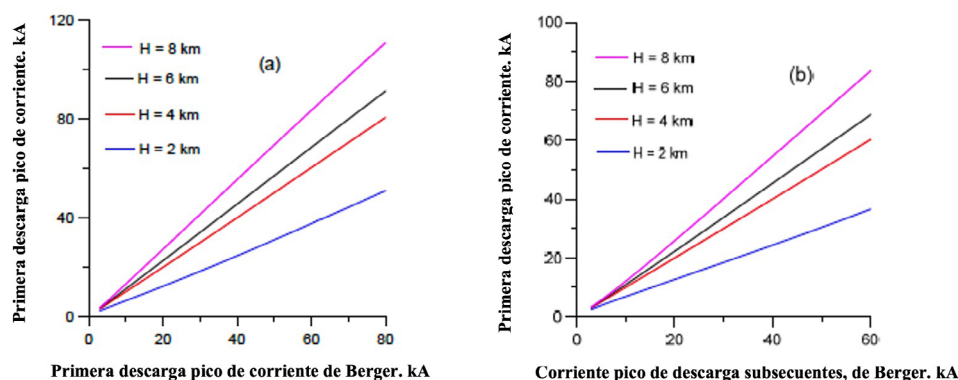


Figura 6. Corrientes pico correspondientes a las diferentes alturas de carga frente a las corrientes pico medidas por Berger (correspondientes a una altura de carga de 4 km). **a.** Primeras descargas de retorno. **b.** Descargas de retorno subsiguientes (adaptado de **Cooray et al.**, 2020)

En el trópico la altura de las nubes es mayor, como queda demostrado en el presente estudio, es decir, existe una mayor convección profunda, como lo pronosticaban Wilson y Whipple (Torres, 2015b). El calor constante y la elevada humedad generan corrientes ascendentes mucho más fuertes que en las zonas templadas, lo que permite que la nube de tormenta se desarrolle verticalmente, alcanzando mayor altura.

El mayor volumen de la nube de tormenta resulta en una separación de cargas eléctricas mucho mayor que en las zonas templadas. Cuando ocurre la descarga (especialmente la descarga a tierra), el canal que se forma es más largo y concentra una mayor cantidad de energía, lo que se traduce directamente en un pico de corriente mayor en kA.

En el trópico, la isoterma de 0 °C (donde se forma la fase mixta de granizo y cristales de hielo que electrifica la nube mediante colisiones) se encuentra a mayor altitud. Esta mayor distancia hasta la base de la nube y el suelo favorece la acumulación de energía antes de que se produzca la ruptura dieléctrica del aire.

Normas técnicas propias del entorno tropical

Con base en estos y otros resultados de investigaciones sobre los parámetros del rayo en zonas tropicales, entre 1994 y 2008 se estableció una norma técnica colombiana (NTC 4552-1,2,3, 2008) de protección contra rayos. En el 2004 el Ministerio de Minas y Energía de Colombia presentó el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), de obligatorio cumplimiento en el país, el cual incluye la NTC4552-1,2,3, 2008.

Además, se logró que el Consejo de la ciudad de Bogotá estudiara y aprobara el acuerdo 567 de 2014 (septiembre 2026) “[p]or el cual se establecen lineamientos para la gestión del riesgo por tormentas eléctricas en el distrito capital”.

Un ejemplo de la aplicación de la hipótesis de investigación sobre la variación espacial y temporal de los valores de los parámetros del rayo se presenta en la **Figura 7** con la aplicación de la norma técnica colombiana NTC 4552, 2008 y del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), de aplicación obligatoria desde el 2004.

Al aplicar los valores de los parámetros del rayo obtenidos en la zona tropical terrestre, la **Figura 7** muestra la tendencia de la mortalidad por rayos. Un índice que varió en el 2005 de 2,5 muertes por rayos por millón de habitantes a un valor de 1,5 en un periodo de 13 años. Con la aplicación obligatoria de la NTC4552 de 2008 mediante el RETIE, se logró evitar 400 muertes por rayos en un lapso de 13 años (Cruz, 2019; Torres, 2025b).

Confiabilidad energética en fuentes no convencionales de energía eléctrica

Otro ejemplo de aplicación de estos resultados es el aumento de la confiabilidad de la matriz energética, la cual indica la capacidad que tiene el sistema de generación de energía eléctrica de abastecer la demanda en todo momento, cumpliendo los requerimientos técnicos de calidad y suficiencia. El gran potencial de energía eólica y solar de Colombia

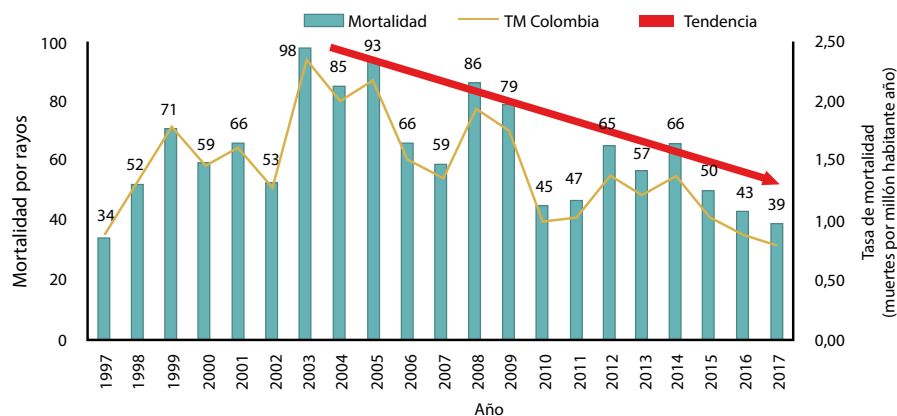


Figura 7. Tasa de mortalidad (TM) por rayos en Colombia, 1997-2017

se estima en 30 GW y 32 GW, respectivamente, lo que supera la capacidad instalada actual de Colombia de aproximadamente 19 GW (**Unidad de Planeación Minero-Energética - UPME**, 2020).

Lamentablemente, los valores de los parámetros de diseño de los equipos eléctricos y electrónicos, incluidos los paneles solares y los aerogeneradores, cumplen con las normas de las latitudes templadas donde son fabricados, pero no con las normas técnicas y reglamentos colombianos basados en los valores tropicales. A escala local, en el entorno tropical, las condiciones particulares de operación de estos equipos no coinciden con aquellas para las cuales fueron diseñados; es decir, no se tiene en cuenta el ambiente electromagnético en el cual van a operar: gran actividad de rayos con valores de parámetros diferentes y más elevados.

Para lograr una buena confiabilidad de los equipos y sistemas eléctricos y electrónicos, se desarrolló la norma NTC4552, 2008, basada en la tecnología del sistema integral de protección contra rayos, SIPRA, y luego desarrollada académicamente y en la práctica en el libro de **Torres** (2010) sobre protección contra rayos orientado a mitigar los efectos negativos de la actividad de rayos en la zona tropical terrestre.

Falla de los transformadores de distribución eléctrica

La falla de los transformadores de distribución, principalmente en zonas rurales con gran actividad de rayos, ha sido un problema constante para las empresas de energía del país en las últimas décadas, cuyos costos superan los seis millones de dólares anuales. El diseño estándar de los transformadores de distribución que se instalan en estos entornos rurales no es compatible electromagnéticamente con el medio. Un transformador es electromagnéticamente compatible cuando funciona satisfactoriamente, es decir, sin que el entorno electromagnético afecte su operación normal.

La tasa de fallas en los sistemas de distribución rurales en Colombia se ha analizado usando modelos de tiempo atmosférico en estado normal y adverso y valores tropicales de los parámetros del rayo. Con ellos se ha demostrado que en zonas de gran actividad de rayos, se presentan tasas de fallas de transformadores 45 veces por encima de lo normal, en tanto que en sistemas de distribución extensos las tasas de fallas son 75 veces mayores a las esperadas en condiciones de tiempo normal (**Aranguren et al.**, 2015; **Torres**, 2021). Hoy en día hay transformadores de distribución diseñados y construidos como prototipos que han funcionado adecuadamente en el entorno tropical colombiano.

Conclusiones

Una importante conclusión de este trabajo de investigación es la comprobación parcial de la hipótesis que planteamos durante la década de 1990 sobre la variación de los valores de los parámetros del rayo espacial y temporalmente. Los resultados permiten afirmar que el valor de la corriente pico negativa del rayo aumenta cuando disminuye la latitud. La aplicación fundamental de los resultados para Colombia, país ubicado en la zona tropical terrestre, se refleja en un sistema de protección contra rayos acorde con los valores propios de los parámetros del rayo en zonas tropicales con los siguientes beneficios: 1) Se salvan cientos de vidas. 2) Se disminuye el costo promedio anual de reposición de transformadores de distribución eléctrica afectados por impactos de rayo (estimado en Colombia en cerca de US\$6 millones por **Rodríguez**, 1999). El elemento más susceptible del Sistema Interconectado Nacional - SIN es el de los transformadores de distribución, cuya tasa anual de quema por rayos se acerca al 7 % del parque total de transformadores instalados, superando las 44.000 unidades. **Torres et al.** ilustran cómo los ciclos de vida de los transformadores de distribución en zonas de gran actividad de rayos se reducen a periodos incluso inferiores a los dos años (**Torres**, 2025). 3) Se mejora la confiabilidad de los sistemas de potencia eléctrica, incluidas las fuentes no convencionales de energía solar y eólica. 4) Se mejoran las tasas de fallas anuales en líneas de transmisión por causa de rayos, que en Colombia varían entre el 40 y el 60 % (**Torres**, 2015b).

Conflicto de intereses

Como autor del presente artículo declaro no tener ningún conflicto de intereses real, potencial o aparente, ni relación económica, personal o política que pueda influir en mi juicio.

Agradecimientos

El autor agradece al Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología de Colombia (COLCIENCIAS), actualmente Ministerio de Ciencia y Tecnología, a la empresa Keraunos y a su CEO Daniel Aranguren, por proporcionar los datos de la CTLDN, así como al grupo de investigación PAAS de la Universidad Nacional de Colombia, a Jesús López de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) por su apoyo académico y a Francisco Castro, estudiante de maestría de la Universidad Nacional de Colombia, autor de la tesis de maestría citada.

Referencias

- Aranguren, D., López, J. A., Inampué, J. C., Torres, H., Betz, H.D. (2017). Cloud-to-ground lightning activity in Colombia and the influence of topography. *Journal Atmospheric, Solar-Terrestrial Physics*, 154, 182–189.
- Aranguren, D. (2011). *Performance of Electrostatic Field Sensors in Storm Warning Systems (in Spanish)*. Universidad Nacional de Colombia, PhD Thesis.
- Aranguren, D., Tovar, C., Inampué, J., López, J., Soto, E., Torres, H. (2015). Lightning effects on distribution transformers and reliability of power distribution systems in Colombia. *Ingeniería e Investigación*, 35, 28-33.
- Berger, K. (1975). Parameters of Lightning Flashes, *Revista Electra*, 41, 23-37.
- Barreto, L. & Torres, H. (1996). *The lightning parameters and its spatial and temporal dependence. Work Document*. CIGRE.
- Caicedo J. A., Uman, M. A., Pilkey, J. T. (2018). Lightning Evolution In Two North Central Florida Summer Multicell Storms and Three Winter/Spring Frontal Storms. *Journal of Geophysical Research*, 123(2), 1155-1178.
- Castro, F. (2019). *Metodología para identificar la estructura eléctrica típica de los rayos en los trópicos*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia.
- Cooper, M. A. (2007). *Lightning injuries. Wilderness Medicine, Fifth ed.* Auerbach, Mosby.
- Cooray, V., Rubinstein, M., Rachidi, F. (2020) Latitude and Topographical Dependence of Lightning Return Stroke Peak Current in Natural and Tower- Initiated Negative Ground Flashes. *Atmosphere*, 11, 560. <https://doi.org/10.3390/atmos11060560>
- Cruz, A. (2019). *Evaluación del riesgo por rayos para Colombia*. Tesis MsC Universidad Nacional de Colombia.
- De la Rosa, F., Cummins, K., Deller, L., Diendorfer, G., Galván, A., Husse, J., Larsen, V., Nucci, C.A., Rachidi, F., Rakov, V., Torres, H., Uman, M.A. (2000). *Characterization of lightning for applications in Electric Power Systems*. Technical Brochure No.172, CIGRE WG. 33.01.02.
- Interconexión Eléctrica SA-ISA. (1989). Informe anual, Colombia. ISA.
- International Electrotechnical Commission-IEC. (2024). *International Standard. Protection against lightning – Thunderstorm warning systems*. IEC.
- Lopez, A., Montanyà, J., Van Der Velde, O. A., Pineda, N., Salvador, A. (2018). Charge Structure of Two Tropical Thunderstorms in Colombia. *Journal of Geophysical Research*, 5, 1-13.
- López J. A., Pineda N., Montanyà J., Van der Velde, O., Ferran, F. (2017). Spatio-temporal dimension of lightning flashes based on three-dimensional Lightning Mapping Array. *Atmospheric Research*, 197, 266-264.
- Lund, N. R., Macgorman, D. R., Schuur, T. J., Biggerstaff, M. I., Rust W. D. (2009). Relationships between lightning location and polarimetric radar signatures in a small mesoscale convective system. *Monthly Weather Review*, 137(12), 4151-4170. <https://doi.org/10.1175/2009MWR2860.1>
- Maggio C. R., Marshall T. C., Stolzenburg M. (2009). Estimations of charge transferred, and energy released by lightning flashes. *Journal of Geophysical Research Atmos*, 114 (14), 1-18.
- Navarrete, N., Cooper, M.A., Holle, R. (2014). *Lightning fatalities in Colombia from 2000 to 2009*. International Conference on Lightning Protection (ICLP). <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1254-9>

- Norma Técnica Colombiana NTC4552, 1-2-3 de protección contra rayos** (2008). Icontec, Colombia.
- Orville, R.** (1990). Peak-current variations of lightning return strokes as a function of latitude. *Nature*, 343, 6254.
- Reglamento de Instalaciones Eléctricas-RETIE.** (2024). Ministerio de Minas y Energía de Colombia, Resolución 40117, Bogotá, Colombia.
- Rison, W., Krehbiel, P., Thomas, R., Hamlin, T., Harlin, J.** (2001). *3-Dimensional Lightning Observations Using a Time-of-Arrival Lightning Mapping System*. ICOLSE.
- Rodríguez, C.A.** (1999). *Costos de Reposición de Transformadores Apropriados para Zonas Tropicales*. Tesis MsC. Universidad Nacional de Colombia.
- Simpson, G. & Robinson, G.D.** (1941). The distribution of Electricity in the Thundercloud. *Proceeding Royal Society London*, 117, 281-349.
- Taniguchi, T.** (1982). Charge distribution in Active winter Clouds. *Journal of atmospheric electricity (Institute of Electrical Engineers of Japan - IEE Japan)*, 2, 35-38.
- Torres-S, H.** (2025). The lightning phenomenon in intertropical zone. *Physics, Environmental Science Physics & Astronomy International Journal*, 9(3), 232-238. DOI: 10.15406/paij.2025.09.00394.
- Torres, H.** (1998). *Espacio y tiempo en los parámetros del rayo, prueba de una hipótesis de investigación*. Trabajo de investigación presentado a la Universidad Nacional de Colombia para su promoción a la categoría de Profesor Titular.
- Torres, H., Pérez, E., Younes, C., Aranguren, D., Montaña, J., Herrera, J.** (2015). Contribution to Lightning Parameters Study Based on Some American Tropical Regions Observations. *IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing*, 8 (8), 4086-4093.
- Torres, H.** (2015). *El rayo en el trópico, certezas temporales de investigación sobre el fenómeno del rayo*. Colección Apuntes Maestros, Universidad Nacional de Colombia.
- Torres, H.** (2025). The lightning phenomenon in intertropical zone. *Physics & Astronomy International Journal*, 9(3), 232-238. <https://doi.org/10.15406/paij.2025.09.00394>
- Torres, H.** (2010). *Protección contra rayos – 2a Edición*. ICONTEC, Universidad Nacional de Colombia.
- Torres, H.** (2021). Technological innovation due to Lightning effects on the reliability of Power Distribution Systems in Colombia. *International Journal of Innovation Engineering and Science Research*, 5, (4), 32-48.
- Unidad de Planeación Minero-Energética-UPME.** (2020). *Plan Energético Nacional, 2020-2050*. Unidad de Planeación Minero-Energética.
- Whipple, F.J.W.** (1929). On the association of the diurnal variation of electric potential in the weather with the distribution of thunderstorms over the globe. *Monthly Journal of the Royal Meteorology*, 55, 1-17.
- Wilson, C. T. R.** (1921). Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorm. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 221, 73-117.