

Análisis del comportamiento de la actividad de rayos y sus variables meteorológicas en ciudades de montañas. Caso Manizales, Colombia

Analysis of the behavior of lightning activity and its meteorological variables in mountain cities. Case of Manizales, Colombia

Diego Del Río-Trujillo ^{1a}, Camilo Younes-Velosa ^{1b}, Jeannette Zambrano-Nájera ²

¹ Environmental Energy and Education Policy – E3P, Departamento de Eléctrica, Electrónica y Computación, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Correos electrónicos: ^a dfdelriot@unal.edu.co, ^b cyounesv@unal.edu.co. Orcid: ^a 0000-0001-5091-4650, ^b 0000-0002-9685-8196

² Grupo de trabajo académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Profesora asociada, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Correo electrónico: jdzambanona@unal.edu.co. Orcid: 0000-0002-9674-7621

Recibido: 20 septiembre, 2020. Aceptado: 17 mayo, 2021. Versión final: 23 septiembre, 2021.

Resumen

El presente artículo muestra el comportamiento diurno y estacional de la actividad de rayos y su relación con las variables meteorológicas que intervienen en la formación de las tormentas, en una ciudad de montaña. Los resultados muestran que Manizales tiene en promedio 69 días tormentosos, es decir, son los días donde al menos un rayo es detectado. Dentro de los resultados, también se puede apreciar que los meses con mayor actividad son marzo y noviembre. El análisis se realizó para los dos periodos lluvioso y seco que se presentan en la zona andina de Colombia. Los resultados muestran que durante los periodos de lluvia la actividad de rayos es más intensa y que obedece principalmente a vientos locales y al desplazamiento de la Zona de Confluencia Intertropical. Dentro del análisis de las variables meteorológicas fue utilizado el ciclo diurno promedio para observar el comportamiento de estas durante los días con actividad de rayos y los que no tuvieron actividad, las variables analizadas fueron presión de superficie, temperatura superficial del aire, temperatura de punto de rocío, razón de mezcla, vientos zonal y meridional.

Palabras clave: rayos; presión de superficie; temperatura superficial del aire, temperatura de punto de rocío, razón de mezcla, viento; día tormentoso.

Abstract

This article shows the temporal behavior of lightning activity and its relationship with the meteorological variables involved in the formation of storms, in a mountain city. The results show that the lightning activity in Manizales has 69 thunderdays and that the months with most activity are March and November. The analysis was performed for both wet and dry periods. The results show that during the wet periods the activity of lightning is more intense and that it is mainly due to local winds and the displacement of the Intertropical Confluence Zone. The average diurnal cycle of meteorological variables is also presented, such as surface pressure, surface air temperature, dew point temperature, mixing ratio, zonal and southern winds.

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 - 8456, **CC BY-ND 4.0** 

Como citar: D. Del Río-Trujillo, C. Younes-Velosa, J. Zambrano-Nájera, “Análisis del comportamiento de la actividad de rayos y sus variables meteorológicas en ciudades de montañas. Caso Manizales, Colombia,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 21, no. 1, pp. 29-42, 2022, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n1-2022003>.

Keywords: lightning, surface pressure, air temperature, dew point, mixing ratio, wind, thunderday.

1. Introducción

Estudios recientes han mostrado que los lugares con mayor actividad eléctrica atmosférica del planeta, conocidos como “*Hot spots*”, se encuentran en la zona tropical [1], [2], [3], [4]. En [4] se hace una clasificación de los lugares con mayor frecuencia de rayos por regiones, mostrando que el lugar con mayor actividad del mundo es el Lago de Maracaibo, ubicado al norte de Suramérica; también muestra que en Colombia se encuentran siete de los diez lugares más activos de la región.

Colombia es uno de los países con alta tasa de muertes por rayos en el mundo; se estima que mueren alrededor de 2 personas por millón de habitantes [5], lo que implica la necesidad de conocer mejor el fenómeno del rayo en el país. En Colombia son varios los estudios que se han desarrollado en torno al fenómeno con el fin de caracterizarlo y parametrizarlo [1], [3], [6], [7], [8], [9].

En el año 2002 con la información suministrada por la Red Colombiana de Medición y Localización de Descargas Atmosféricas - RECMA, que constaba de seis sensores LPATS *Lightning Position and Tracking System*, Younes [10] realiza uno de los trabajos más relevantes en el área de caracterización y parametrización de la descarga en Colombia, obteniendo parámetros utilizados para el diseño en ingeniería como la Densidad de Descargas a Tierra – DDT, polaridad, multiplicidad y valores pico de corriente. Además, la NASA con ayuda del LIS - *Lightning Imaging Sensor* y OTD - (*The Optical Transient Detector*) suministró información que permitió verificar el funcionamiento de la RECMA, (esta red dejó de operar en 2002) y además corroborar que los parámetros del rayo varían espacial y temporalmente [1].

También en Colombia se han obtenido avances en la correlación entre la actividad eléctrica atmosférica y las variables de tipo geográfico, dando lugar a un nuevo concepto para el cálculo de la densidad de descargas atmosféricas conocido como densidad difusa, combinando la teoría de subconjuntos difusos y la densidad de rayos [11], [12] con el fin de dar respuesta a los factores de los cuales adolece la metodología tradicional.

De igual manera, se han registrado avances en la caracterización del campo eléctrico ambiental para las ciudades de Bogotá y Medellín [9], [13], [14].

Con estos registros se han desarrollado herramientas que permiten realizar un pronóstico de hasta 30 minutos de anticipación como se registra en [15], [16].

Recientemente en [17] se observó para Colombia, cómo era la relación entre la contaminación de tipo atmosférica y los parámetros del rayo para aplicaciones en ingeniería. Los resultados muestran que parámetros como la DDT, pueden verse afectados por la cantidad de aerosoles presentes en la atmósfera. Sin embargo, este estudio anima a realizar mayores esfuerzos en el conocimiento de la meteorología local de las diferentes ciudades del país, con el fin de observar las relaciones entre las variables meteorológicas y la actividad de rayos.

Los principales estudios sobre la caracterización y parametrización del fenómeno del rayo en Colombia se han desarrollado para la ciudad de Bogotá y Medellín [7], [8], [9], [13], [17], [18], [19], si n embargo, para ciudades intermedias el conocimiento del fenómeno se limita en algunas partes a la obtención de los valores de DDT con propósitos de diseño.

El presente estudio se desarrolla en la ciudad de Manizales, Colombia. Ésta, es una ciudad intermedia que se encuentra ubicada en la vertiente central de la cordillera de los Andes. Manizales está a una altitud media de 2150 m.s.n.m, cuenta con una población aproximada de 434.000 habitantes. Esta investigación tiene como objetivo mostrar el comportamiento de las variables meteorológicas que intervienen en la formación de las tormentas eléctricas en la ciudad de Manizales, tales como presión de superficie, temperatura del aire, punto de rocío, razón de mezcla y viento. Además, se observa el comportamiento temporal de la actividad de rayos en la ciudad. La sección dos del presente artículo hace alusión al conjunto de datos que se emplearon para la realización del estudio y la metodología desarrollada. En la tercera parte del estudio se presentan los resultados obtenidos y la última sección presenta las conclusiones.

2. Datos y metodología

Los datos utilizados en la investigación son de dos tipos: el primer conjunto de datos proviene de una estación meteorológica de la ciudad de Manizales y el segundo conjunto de datos procede de la red de localización de rayos LINET (*Lightning Network*).

2.1. Información meteorológica

La información meteorológica proviene de una estación meteorológica ubicada en el aeropuerto La Nubia de la ciudad, ésta comenzó a funcionar desde 1967 y es operada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, cuyas coordenadas son latitud 5.0296 y longitud -75.4547. Estos registros vienen codificados en formato METAR (*Meteorologique Aviation Reguliére en Francés o en inglés METeological Aerodrome Report*). METAR es un informe meteorológico aeronáutico de rutina enviado por los diferentes aeropuertos con información que relaciona variables tales como temperatura, presión atmosférica, magnitud y dirección del viento, nubes, fenómenos y visibilidad. Esta información es enviada con una frecuencia de aproximadamente cada hora por cada aeropuerto y es utilizada por los pilotos para conocer las condiciones meteorológicas del lugar de destino, además es utilizada por los meteorólogos como insumo para realizar pronósticos del tiempo.

La información utilizada fueron los datos registrados entre los años 2012 a 2015. De los 1460 días analizados, la estación meteorológica operó correctamente durante 1095 días, es decir el 75% de los datos son válidos.

2.2. Información meteorológica

La información de descargas atmosféricas fue suministrada por la red de localización de rayos LINET. Esta red opera en los rangos de frecuencia LF y VLF, y utiliza el algoritmo de localización TOA (*Time of Arrival*). TOA es una técnica utilizada para localizar el punto de impacto de un rayo, calculando la diferencia entre los tiempo de llegada de las formas de onda de campo eléctrico o magnético [1], [20].

LINET es una red que opera básicamente por cuatro módulos. El módulo uno está compuesto por dos antenas de lazo para la detección del campo magnético. El módulo dos está compuesto por un GPS (*Global Positioning System*) cuya precisión es del orden de los 100 ns. El tercer módulo está formado por una etapa de amplificación, filtrado y procesamiento de la señal y por último una unidad de procesamiento [21].

En Colombia este sistema de localización de rayos es propiedad de Keraunos S.A.S. y cuenta con más de 20 sensores, localizados a lo largo del territorio colombiano. La figura 1 muestra las curvas de eficiencia de detección - DE de la red. Estas curvas fueron elaboradas por el propietario con base en la metodología descrita en [22] y luego fueron suministradas para la realización del presente estudio.

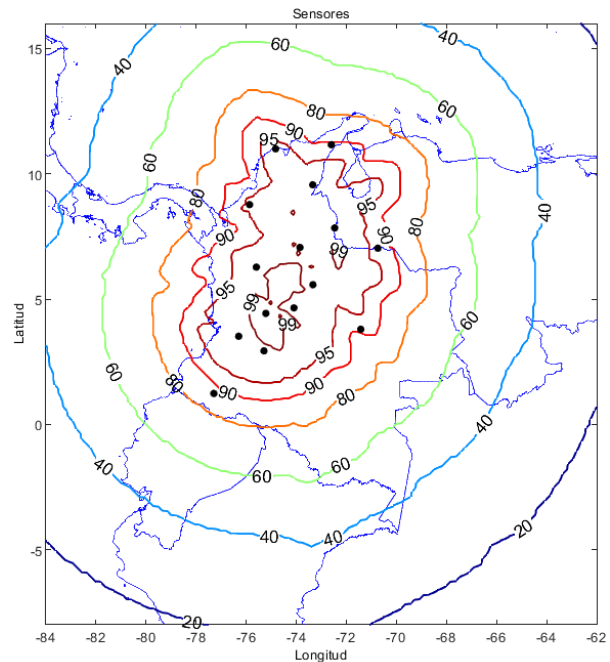


Figura 1. Mapa de eficiencia de la red de localización de rayos - LINET en Colombia.

Los puntos negros indican la ubicación de cada sensor y las isocurvas indican el porcentaje de DE. Punto Rojo ubicación de Manizales. Usada con permiso de Keraunos S.A.S.

Como se observa en la figura 1, Manizales se encuentra ubicada en la zona de mayor DE de la red, criterio que se tuvo en cuenta con el objeto de que los datos suministrados por la red tengan un buen nivel de confianza. Esta red está en la capacidad de entregar para cada rayo, el tiempo de ocurrencia, latitud, longitud, amplitud de la corriente de retorno, polaridad, tipo de rayo (Intra nube o nube tierra), altura de emisión y la forma de onda.

Para el presente estudio el conjunto de datos utilizado fue el de la ventana de tiempo de 2012 a 2015.

2.3. Metodología

La metodología implementada para el análisis de las variables meteorológicas consistió en revisar la consistencia y homogeneidad de la serie, para posteriormente determinar los días tormentosos (TD) y los días no tormentosos (NTD) [23] sobre la ciudad de Manizales; estos se determinaron con la ayuda de LINET, considerando que un día tormentoso es aquel en el que al menos un rayo es detectado [10]. Los datos de

rayos utilizados son aquella nube tierra (CG) que impactaron sobre el municipio de Manizales y que presentaron corrientes mayores o igual a los 10 kA, con el objetivo de evitar contaminación por rayos intranube (IC) tal y como se describe en [24].

Luego, se determinó el ciclo diurno promedio de las variables meteorológicas, para TD y NTD durante los periodos de menos precipitación (diciembre a febrero – DJF y junio a agosto JJA) y los de mayor precipitación (marzo a mayo – MAM y septiembre a noviembre – SON), tal y como lo define el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, IDEAM [25].

Las variables analizadas fueron:

- Promedio mensual de días tormentosos (TD) por mes, los días en que al menos se presentó un rayo en la ciudad de Manizales.
- Distribución mensual del porcentaje promedio diario de rayos nube-tierra.
- Distribución horaria del porcentaje promedio de rayos nube-tierra.
- Presión de superficie reducida a nivel del mar (P, hPa).
- Temperatura del aire (T, °C).
- Temperatura de punto de rocío (Td, °C).
- Razón de mezcla, se utiliza para indicar la cantidad de vapor de agua que hay en una parcela de aire seco (r, g/kg).
- Magnitud del viento (V, m/s).
- Viento zonal y meridional estos dos se obtuvieron utilizando la velocidad del viento, y su dirección (u, v, m/s). El viento zonal es positivo cuando proviene del Oeste y negativo cuando proviene del Este. El viento meridional es positivo cuando proviene del Sur y negativo cuando proviene del Norte.

Los datos atípicos que fueron registrados por la estación meteorológica fueron extraídos utilizando la ecuación (1). Las variables Q_1 y Q_3 representan el primer y tercer cuartil de los datos de cada variable y los valores que sean menores que límite inferior - LimInf o mayores que el límite superior - LimSup se consideran datos atípicos [26].

$$\begin{aligned} \text{LimInf} &= Q_1 - 1,5(Q_3 - Q_1) \\ \text{LimSup} &= Q_3 - 1,5(Q_3 - Q_1) \end{aligned} \quad (1)$$

Para evaluar si los valores medios obtenidos para TD y NTD muestran diferencias se utilizó la prueba de t-Student a un nivel de confianza del 95 % [26], para cada variable, excepto para la razón de mezcla pues esta se determinó utilizando los valores promedio para cada hora de temperatura del aire y presión de superficie. Estas diferencias significativas se representan en las figuras con el símbolo de asterisco (*), y se ubican paralelos con el eje x, el cual representa el tiempo.

3. Resultados

A continuación, se presentan los resultados con la metodología descrita en la sección 2, comenzando con la distribución de rayos en la ciudad y luego con el comportamiento del ciclo diurno en la ciudad de Manizales.

3.1. Distribución de rayos nube tierra

Como se mencionó anteriormente LINET, discrimina entre rayos que se presentan dentro de la nube (IC) y rayos que se presentan de la nube a tierra (CG). La distribución de rayos se hizo únicamente teniendo en cuenta los rayos CG debido a que estos son los que ocasionan mayor daño y para aplicaciones en ingeniería son los mayormente estudiados.

La figura 2 muestra la distribución promedio mensual multianual de los días TD; se observa que el comportamiento mensual de TD es de tipo bimodal y que los meses con mayor número de días tormentosos son los meses de abril y octubre, cada mes con aproximadamente 10 días. El promedio anual de TD sobre la ciudad es de 69 días. También es posible ver que meses como marzo y septiembre presentan una cantidad de TD importante, lo cual coincide con los dos periodos de mayor precipitación [27] y que los meses con menor cantidad de TD son enero y julio, coincidiendo a su vez con meses de bajas precipitaciones. Dicho comportamiento bimodal en las precipitaciones ha sido previamente documentado para toda la zona andina, y específicamente para Manizales [28].

La figura 3 muestra el porcentaje mensual de rayos CG que impactan sobre Manizales. Se puede observar que también presenta un comportamiento bimodal. El mes que mayor cantidad de rayos tiene es marzo, seguido de abril y luego noviembre. Es importante notar que los meses con mayor TD no son los meses con mayor actividad de rayos en la ciudad, como se puede ver en las figuras 2 y 3, aunque los periodos de mayor TD siguen coincidiendo con los periodos de mayor precipitación.

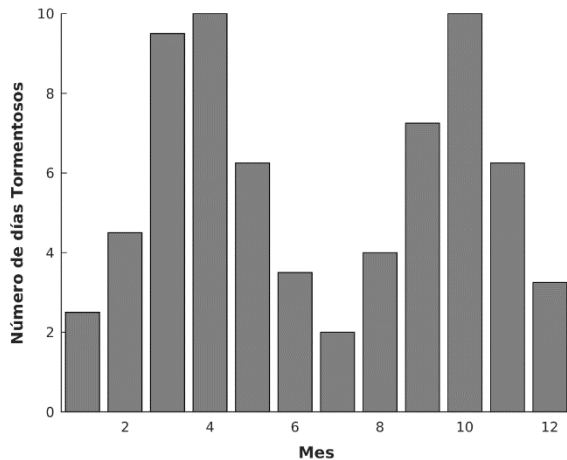


Figura 2. Distribución mensual promedio de días tormentosos en la ciudad de Manizales en los años 2012 a 2015. Fuente: elaboración propia.

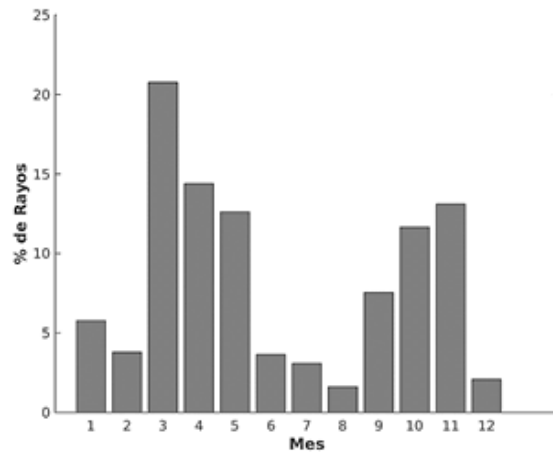


Figura 3. Distribución mensual del porcentaje promedio de rayos CG (Rayos Nube - Tierra) que impactan la ciudad de Manizales en los años 2012 a 2015. Fuente: elaboración propia.

El comportamiento diurno de la actividad de rayos se muestra en la figura 4. Se observa el comportamiento durante los cuatro periodos que se definieron en la metodología. Para los periodos de bajas precipitaciones DJF y JJA, se puede observar que la mayor actividad se presenta después de las 12:00 HL siendo las horas más activas las 17:00 HL en DJF y las 15:00 HL para JJA. Para ambos periodos más del 60% de los rayos se presentan en las horas de la tarde iniciando a partir de las 13:00 HL. Durante los periodos de alta precipitación MAM y SON se observa que la mayor actividad se presenta en las horas de la tarde entre las 13:00 HL y 16:00 HL, el pico máximo para MAM se presente a las 14:00 HL y para SON a las 15:00 HL. Es importante notar que durante las horas de la madrugada tanto para DJF y MAM el 20% de la actividad eléctrica atmosférica sucede entre las 0:00 HL y 2:00 HL.

3.2. Ciclo diurno

El análisis del ciclo diurno de las diferentes variables meteorológicas, se efectuó para detectar las variaciones que pueden presentarse dentro de un periodo de tiempo de 24 horas. El ciclo diurno se utilizó para observar las diferencias entre los TD y NTD, durante el periodo de estudio. De los 1460 días analizados la estación meteorológica operó correctamente el 75% de los días, es decir, 1095 días, y el ciclo diurno se elaboró con los datos durante las 6:00 HL y 18:00 HL, debido a que este es el periodo de operación del aeropuerto.

3.2.1. Presión de superficie y temperatura del aire

La figura 5 muestra el ciclo diurno de la presión atmosférica de superficie teniendo en cuenta los datos de la estación meteorológica del aeropuerto la Nubia de la ciudad de Manizales. Se observa que las diferencias no son muy significativas entre los días TD y NTD. Sin embargo, se observa que para todos los periodos cuando se presenta la disminución de la presión atmosférica después de las 12 horas coincide con el inicio de la actividad de rayos (ver figura 4).

El ciclo diurno de la temperatura del aire (T , °C) se presenta en la figura 6. Durante todos los periodos se puede observar que T comienza a ascender a partir de las 6:00 HL y en el caso de NTD alcanza su pico máximo después de las 12:00 HL.

Es de notar que la temperatura en los TD crece de manera más rápida que en los NTD, alcanzando su pico máximo entre una hora a tres horas, antes que para los días sin tormenta. Puede notarse también que entre las 13:00 HL y 14:00 HL se presenta el pico máximo de temperatura para TD salvo para el periodo SON y que este se presenta una hora a dos antes del pico máximo de la actividad de rayos, ver figura 4.

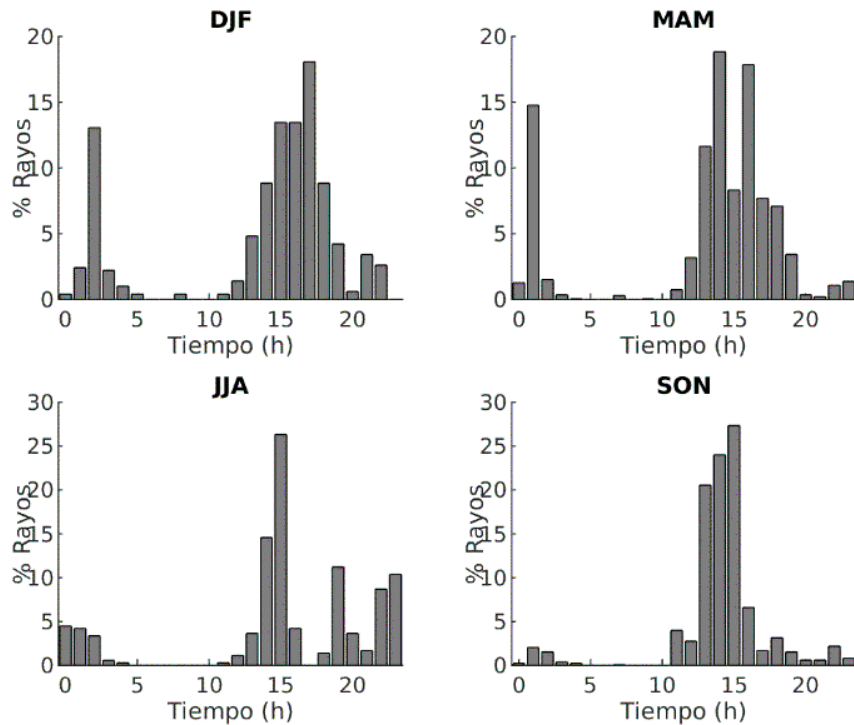


Figura 4. Distribución horaria de la actividad de rayos, para los periodos DJF, MAM, JJA, SON para Manizales. Fuente: elaboración propia.

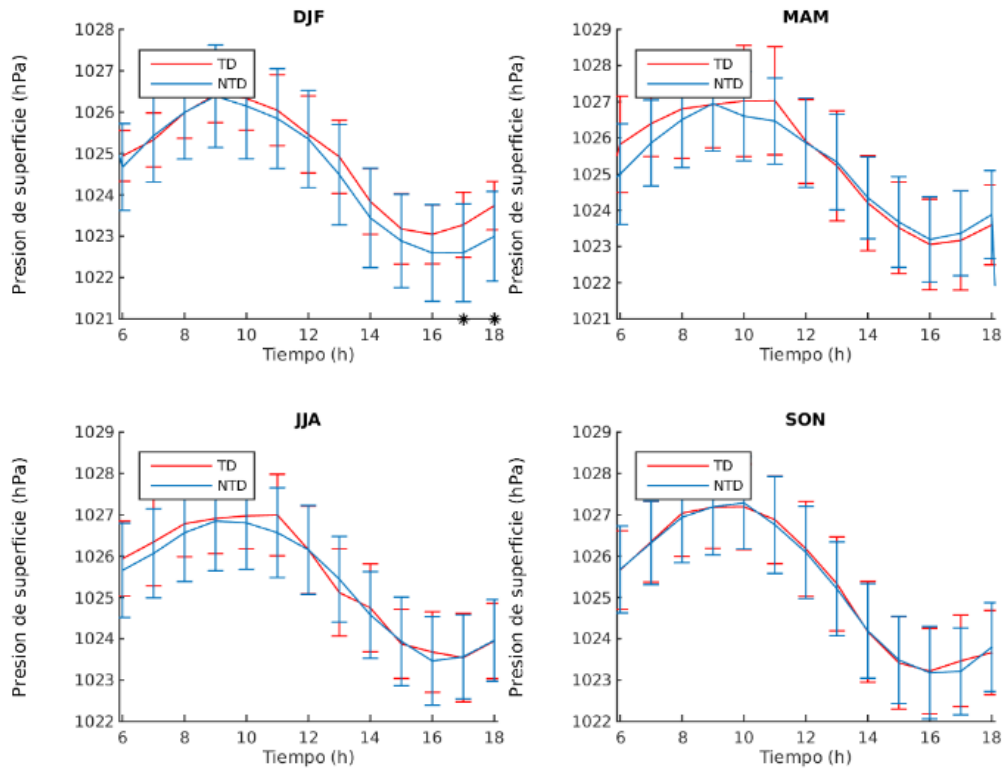


Figura 5. Ciclo diario de la presión atmosférica, durante los periodos de bajas precipitaciones (DJF y JJA) y de altas precipitaciones (MAM y SON). Los * representan las diferencias significativas a un nivel de confianza a un nivel de confianza del 95%. Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, se encuentra que se presentan diferencias significativas en los valores de temperatura media entre los TD y NTD entre las 14:00 HL y 18:00 HL, momento en el cual las tormentas son más activas en la ciudad de Manizales, como lo muestra la **figura 4**, donde se puede apreciar que la mayor actividad de rayos sucede en las horas de la tarde en Manizales, esto puede deberse a la cobertura de nube que hay durante los días tormentosos. Es de notar que la temperatura máxima registrada sucede más rápido en los días TD que en NTD.

3.2.2. Temperatura de punto de rocío y razón de mezcla

Las **figuras 7 y 8** presentan el ciclo diurno promedio de la temperatura de punto de rocío y la razón de mezcla.

Al analizar el comportamiento de la temperatura de punto de rocío durante los cuatro periodos se observa que en los TD esta fue mayor en gran parte del tiempo con respecto a los NTD; sin embargo, no hubo muchas diferencias significativas, según la prueba de t-Student.

La **figura 8** muestra el ciclo diurno de la razón de mezcla, la cual es una variable que indica la cantidad de agua disponible por cada kilogramo de aire que esté presente, como se indicó anteriormente. Se puede ver que durante los TD había mucha más cantidad de agua disponible en el aire que durante los NTD, sobre todo para el periodo MAM.

3.2.3. Viento

Las **figuras 9, 10 y 11** muestran el viento zonal, meridional y la intensidad de viento, respectivamente. En el caso del viento zonal (**figura 9**) se observa que para DJF, MAM, JJA y SON durante las 6:00 HL y 8:00 HL el viento proviene del Este de Manizales, luego a partir de las 9:00 HL comienza a cambiar de dirección, es decir, proviene del Oeste, hasta que alcanza su valor máximo entre las 11:00 HL y 13:00 HL, luego disminuye levemente, sin cambiar de dirección, hasta el momento en el que opera la estación meteorológica, es decir, las 18 horas.

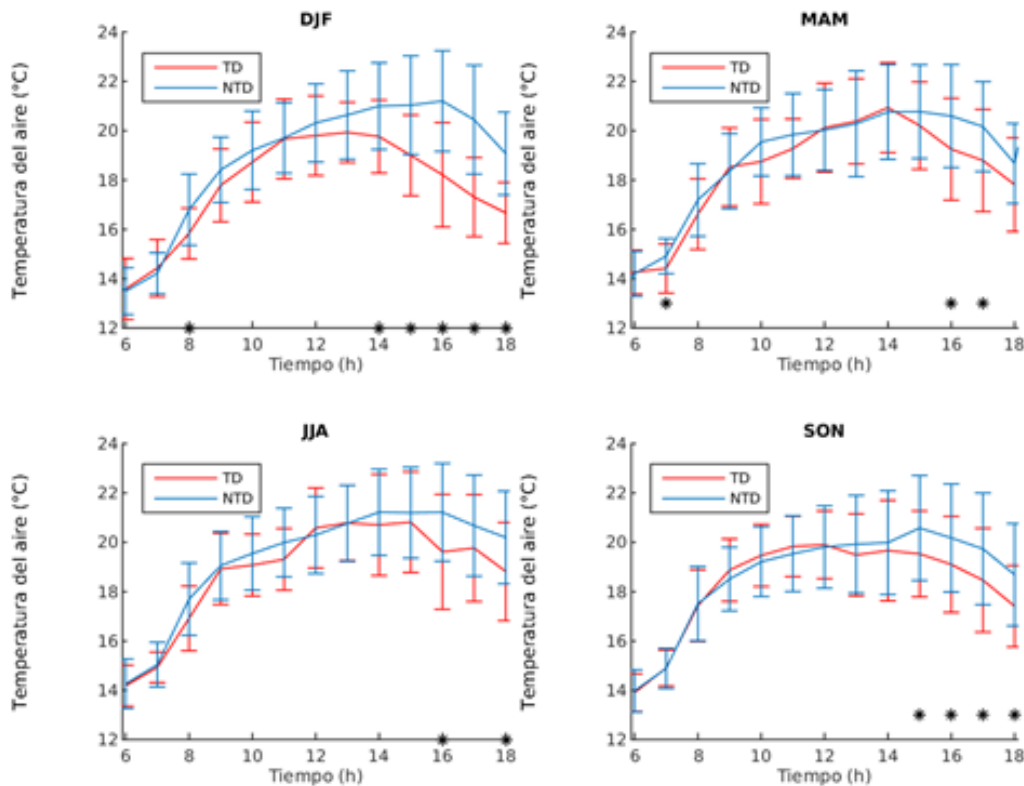


Figura 6. Ciclo diurno de temperatura del aire, para los periodos de bajas precipitaciones (DJF y JJA) y de altas precipitaciones (MAM y SON). Fuente: elaboración propia.

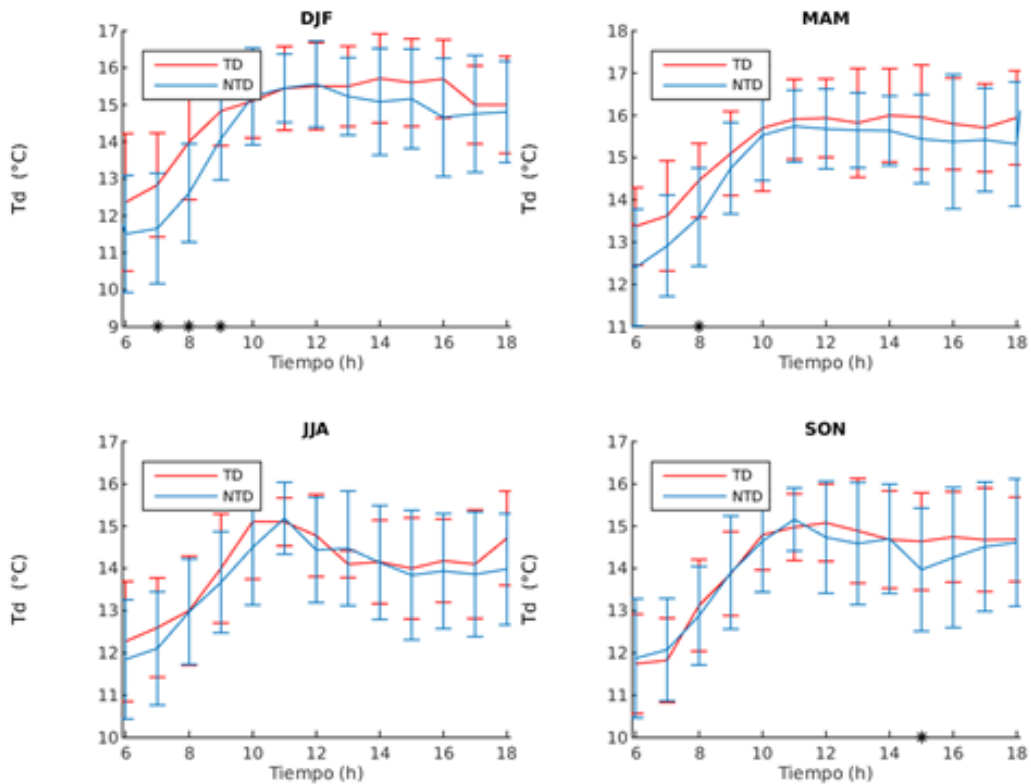


Figura 7. Ciclo diurno temperatura de punto de rocío (Td), para los periodos bajas precipitaciones (DJF y JJA) y de altas precipitaciones (MAM y SON). Fuente: elaboración propia.

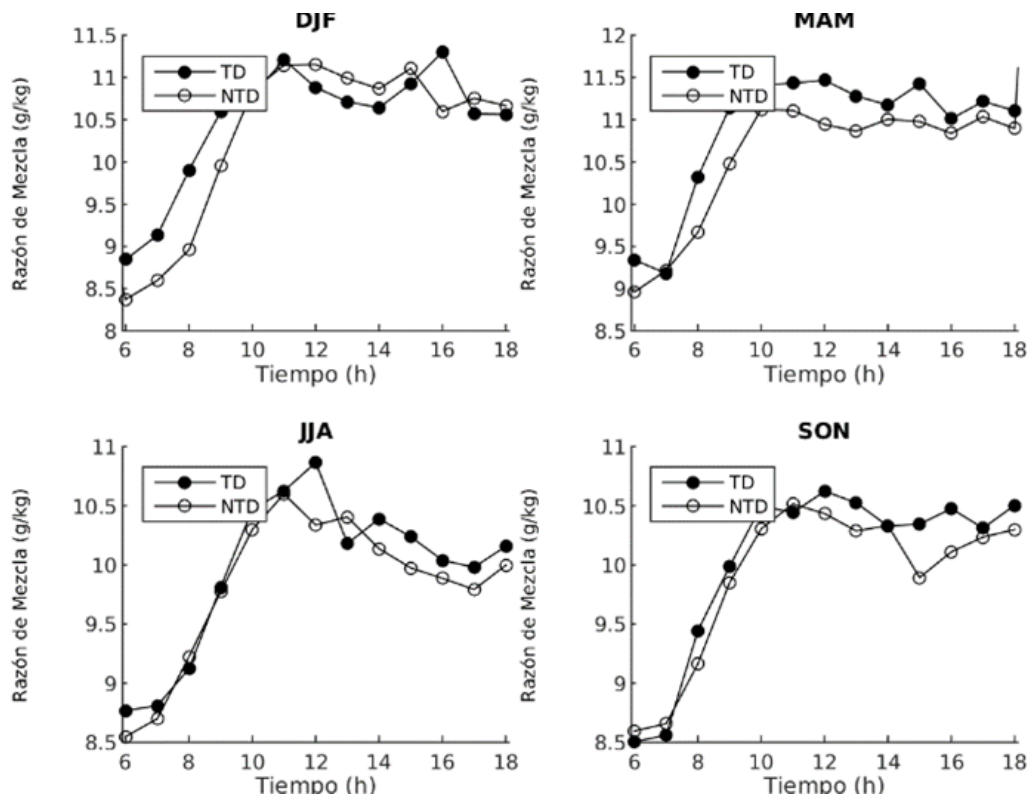


Figura 8. Ciclo diurno promedio de la razón de mezcla. Fuente: elaboración propia.

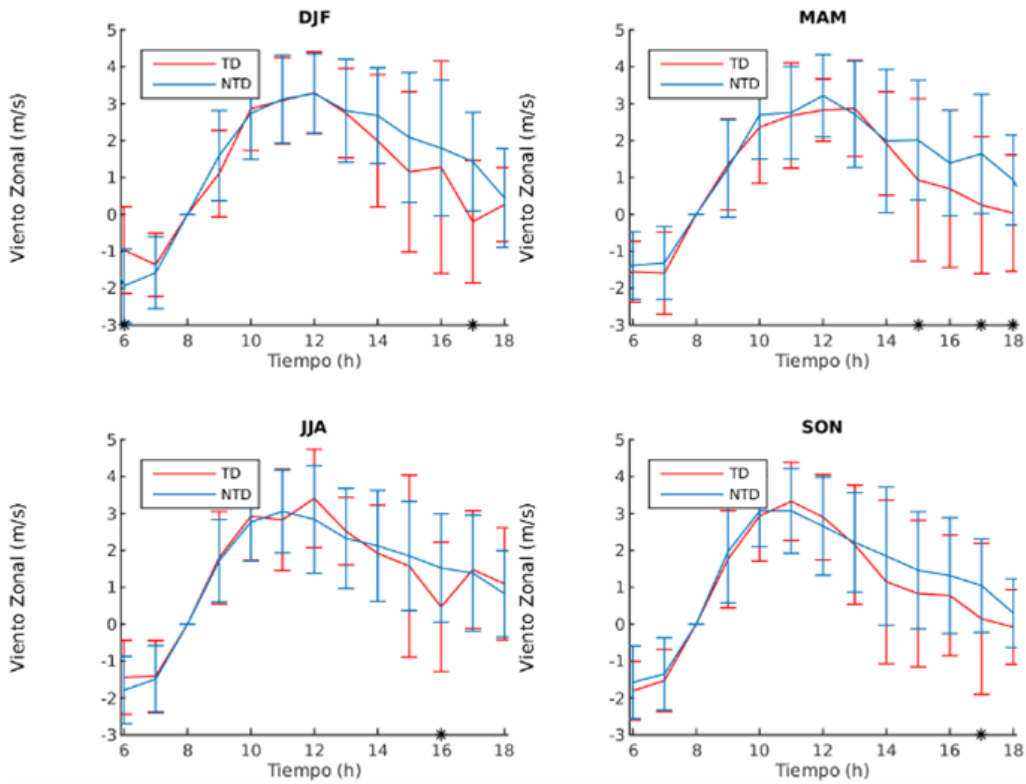


Figura 9. Ciclo diario promedio del viento zonal para los TD y NTD. Los * representan las diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%.

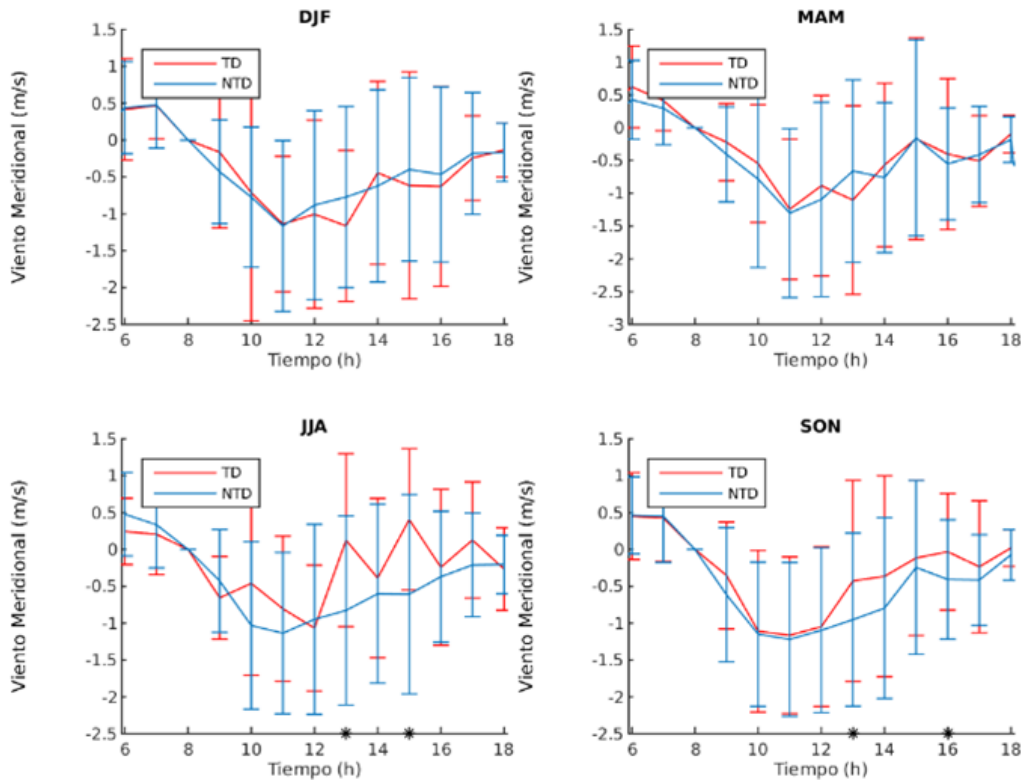


Figura 10. Ciclo diario promedio de viento meridional para los TD y los NTD. Los * representan las diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%.

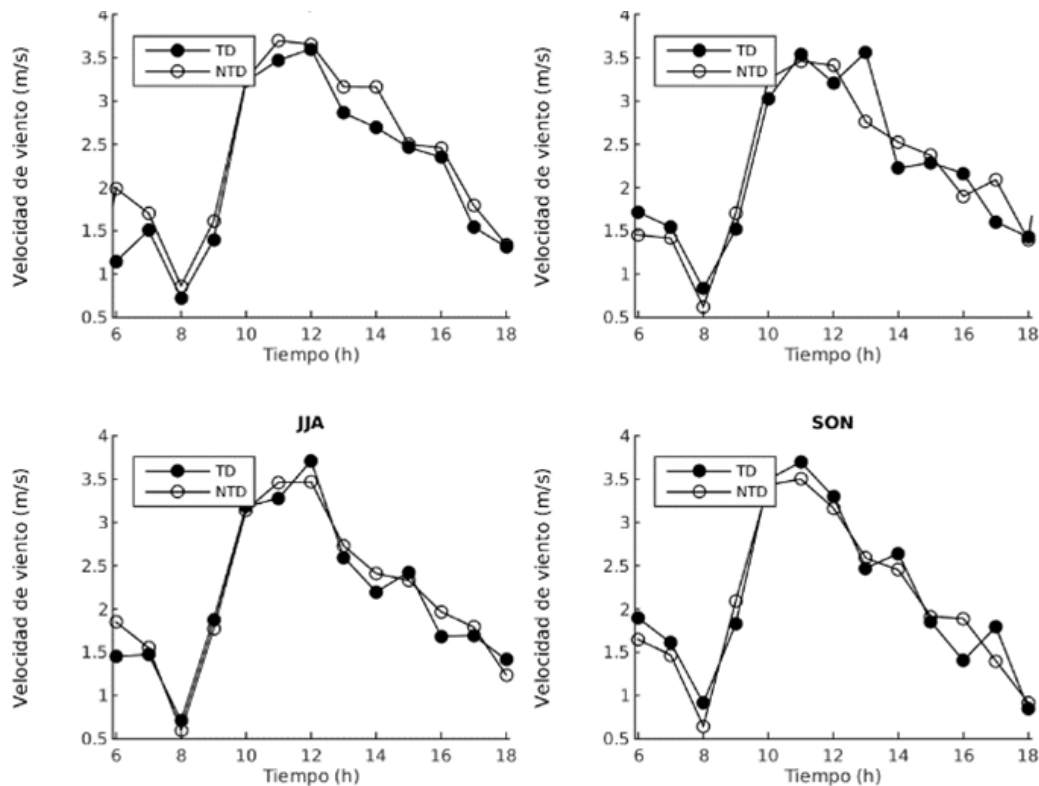


Figura 11. Ciclo diario de la intensidad de viento para los TD y los NTD. Fuente: elaboración propia.

Se observa que las diferencias significativas no son muchas durante el día; se puede inferir que durante las 13:00 HL y 18:00 HL los valores de viento zonal para los TD son menores que para los NTD.

En cuanto el viento meridional, de la figura 10 se observa que entre las 6:00 HL y las 8:00 HL proviene del Sur. Desde las 9:00 HL el viento es del Norte y alcanza su valor máximo entre las 11:00 HL y 12:00 HL, luego comienza a descender, hasta que la estación deja de operar. No se observan diferencias significativas relevantes entre los TD y NTD en lo relativo al viento.

La figura 11 muestra la magnitud del viento y se observa un comportamiento similar tanto en los NTD como en TD, mostrando que en las horas de la mañana el viento es menor y se va incrementando, teniendo su pico máximo entre 11:00 HL y 12:00 HL, y luego comienza a descender.

4. Discusión

Al analizar el comportamiento de la actividad de rayos en la ciudad de Manizales se puede observar que esta presenta una distribución bimodal, tanto para la climatología de días tormentosos, como la distribución

mensual de la actividad de rayos sobre la ciudad. Tanto la distribución de los días tormentosos como la actividad de rayos coinciden totalmente con los periodos de altas precipitaciones (MAM y SON) y de bajas precipitaciones (DJF y JJA). El primer pico de actividad de rayos sucede en el mes de marzo y el segundo en noviembre, siendo el primero más activo. Estos resultados están acordes con lo presentado por Albretch en [4] y Torres en [1].

En la zona andina el comportamiento bimodal de la actividad de rayos al parecer está influenciado por el desplazamiento de la Zona de Confluencia Intertropical – ZCIT y a las ondas tropicales del este y a la corriente de chorro del Chocó. Estas corrientes se presentan debido a la proximidad de los océanos y a los gradientes de temperatura que se forman entre estos, ocasionando que haya una circulación de aire desde los lugares de mayor presión a los de baja presión, propiciando así la formación de sistemas convectivos que llegan a influir sobre Manizales [29], [30], [31], [32].

Al analizar los vientos en la ciudad de Manizales, se observa que estos son más locales, del tipo valle-montaña-valle y pueden estar relacionados con la topografía de la ciudad y sus alrededores [33]. Durante el día se puede ver que los vientos provienen del Noroeste

y en la noche del Sureste. Los vientos del Noreste provienen del río Cauca; las temperatura calida de la zona, hace que se caliente el aire, este comience a ascender hacia la zona montañosa de la cordillera, presetando así un comportamiento de valle-montaña durante las horas del día y en la noche el viento tiene un comportamiento de montaña – valle [29], [30], [31], [32], [33], [34], generando así una inestabilidad atmosférica que puede desembocar en la producción de tormentas eléctricas.

Algunos investigadores han mostrado que la actividad de rayos está estrechamente ligada con el comportamiento de la temperatura [35], [36], [37]. Este análisis muestra que horas después de que se presenta el pico máximo de temperatura, la actividad de rayos se intensifica. Como se mencionó, esto obedece a que cuando se va incrementando la radiación solar la temperatura aumenta y hace que se caliente el aire, volviéndose menos denso y junto con la topografía de la región, el aire asciende más fácilmente, influyendo en la formación de tormentas. Los resultados muestran que durante los TD, la temperatura fue menor que en los NTD, esto puede ser debido a la cobertura de nubes que se presenta por la influencia de la ZCIT.

El vapor de agua disponible en la atmósfera es otra de las variables que juegan un papel fundamental en la formación de tormentas eléctricas [35], [37], [38], [39]. Para analizar la cantidad de vapor de agua, en la ciudad de Manizales, se utilizó la temperatura de punto de rocío y la razón de mezcla. En los TD ambas fueron mayores que para los NTD, lo que significa que hay mayor cantidad de vapor de agua en la atmósfera lo que favorece la formación de las nubes y particularmente la formación de nubes tipo Cumulonimbus, las cuales son la mayor fuente de producción de rayos.

5. Conclusiones

En el presente artículo se muestra el comportamiento diurno y estacional de la actividad de rayos en una ciudad montaña. Se observó que el comportamiento de la actividad de rayos en Manizales, presenta un comportamiento bimodal, tiene en promedio 69 días tormentosos al año y los meses con mayor actividad atmosférica son marzo y noviembre y que el comportamiento bimodal mensual obedece principalmente al movimiento de la ZCIT, al igual que en el caso de las precipitaciones.

Los resultados muestran que la actividad de rayos sobre la ciudad se desarrolla a partir de las primeras horas de la tarde y más del 50% de los rayos se presentan entre las 13:00 HL y 16:00 HL horas del día.

Este estudio es el primero que se desarrolla en la ciudad de Manizales que relaciona la actividad de rayos y las variables meteorológicas que intervienen en la formación de tormentas eléctricas. Se pudo ver que los vientos de valle-montaña-valle predominan en la ciudad y que estos pueden influir en la formación de las nubes de tormenta, pues ocasionan inestabilidad atmosférica.

El estudio de la actividad de rayos sobre las ciudades de montaña y su relación con las variables meteorológicas es relevante debido a que muchas de estas están creciendo y por ende su metabolismo energético también está sufriendo cambios, que pueden modificar los microclimas que favorezcan la formación de tormentas electricas, por eso análisis de las varibales meteorológicas, como se hizo en el presente estudio, pueden arrojar herramientas para la predicción y prevención de la actividad de rayos en las ciudades.

Agradecimientos

Esta investigación fue posible gracias a la Universidad Nacional de Colombia, a la información de rayos suministrada por Keraunos S.A.S y a la financiación de Colciencias para estancias posdoctorales.

Referencias

- [1] H. Torres-Sánchez, *El rayo: mitos, leyendas, ciencia y tecnología*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, 2002.
- [2] H. J. Christian et al., “Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 108, no. D1, pp. ACL 4-1--ACL 4-15, 2003, doi: <https://doi.org/10.1029/2002JD002347>.
- [3] C. Younes, H. Torres-Sánchez, *Caracterización de los parámetros del rayo en Colombia*. Universidad Nacional De Colombia, Sede Manizales, 2010.
- [4] R. I. Albrecht, S. J. Goodman, D. E. Buechler, R. J. Blakeslee, H. J. Christian, “Where are the lightning hotspots on Earth?”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 97, no. 11, pp. 2051-2068, 2016, doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00193.1>.
- [5] A. S. Cruz-Bernal, H. Torres-Sánchez, H. Aranguren-Fino, J. C. Inampué-Borda, “Lightning mortality rate in Colombia for the period 1997 –2014”, *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 2, pp. 65-74, 2018, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018006>.

- [6] H. Torres-Sánchez, L. Barreto, “Estimate of Ground Flash Density and Lightning Peak Current with One Station Direction Finder”, en *International Lightning Detection Conference*, 1995.
- [7] W. Briceno, D. Rondon, “Modelo de la Corriente de Retorno del Rayo a Partir del Campo Eléctrico Vertical”, trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia, 1996.
- [8] H. D. Aranguren, “Estudio del Fenómeno Eléctrico Atmosférico a través del Campo Eléctrico Ambiental”, trabajo de maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2006.
- [9] H. D. Aranguren, “Desempeno de Sensores de Campo Electrostatico en Sistemas de Alerta de Tormentas”, tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [10] C. Younes, “Evaluación de Parámetros del Rayo con Mediciones Terrestres y Satelitales Para Colombia”, trabajo de maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- [11] C. Younes, “Metodologías Para la Correlación de Parámetros del Rayo con Características Geográficas y Meteorológicas. Caso Colombiano”, tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia, 2006.
- [12] C. Younes, O. Duarte, J. Pulgarin, “A Novel Fuzzy Parameter For Ground Flash Density”, *DYNA*, vol. 80, no. 182, pp. 41-49, 2013.
- [13] J. A. López-Trujillo, “Metodología para Predicción de Tormentas Eléctricas a Partir de Mediciones de Campo Electrostatico”, trabajo de maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [14] H. Aranguren, J. López-Trujillo, H. Torres-Sánchez, I. J., H. D. Betz, M. Moehrlin, “Electrostatic Field and Lightning Detection applied to Thunderstorms Nowcasting in Colombia.”, en *International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA)*, Belo Horizonte, Brazil, 2013.
- [15] H. Torres-Sánchez, “Qué Rayos Sabemos?,” *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, vol. 34, no. 131, pp. 193-208, 2010.
- [16] H. Torres-Sánchez, *El rayo en el trópico: certezas temporales de investigación sobre el fenómeno del rayo*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Rectoría, 2015.
- [17] D. F. Del Río Trujillo, “Evaluación del efecto urbano sobre los parámetros del rayo. Caso Colombiano”, tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales, 2018.
- [18] D. Perez-Perez, “Eficiencia de los Sistemas de Localizacion del Rayo en Zonas Montañosas”, trabajo de maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [19] H. Torres, E. Perez, C. Younes, D. Aranguren, J. Montaña, J. Herrera, “Contribution to Lightning Parameters Study Based on Some American Tropical Regions Observations”, *IEEE J. Sel. Top. Appl. EARTH Obs. Remote Sens.*, vol. 8, no. 8, págs. 4086-4093, 2015, doi:<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2428217>.
- [20] V. A. Rakov, M. A. Uman, *Lightning. Physics and Effects*. USA: Cambridge University Press, 2003.
- [21] H. D. Betz, U. Schumann, P. Laroche, Eds., *Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research*. Springer, 2008.
- [22] G. Diendorfer et al., “Review of CIGRE Report ‘Cloud-to-Ground Lightning Parameters Derived from Lightning Location Systems – The Effects of System Performance’”, en *Cigre Colloq. Harmonizing Environment, Power Qual. Power Syst.*, no. 376, 2009.
- [23] C. A. Morales Rodriguez, R. P. da Rocha, R. Bombardi, “On the development of summer thunderstorms in the city of São Paulo: Mean meteorological characteristics and pollution effect”, *Atmos. Res.*, vol. 96, no. 2-3, pp. 477-488, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.02.007>.
- [24] K. L. Cummins, M. J. Murphy, E. A. Bardo, W. L. Hiscox, R. B. Pyle, A. E. Pifer, “A combined TOA/MDF technology upgrade of the US National Lightning Detection Network”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 103, no. D8, pp. 9035-9044, 1998, doi: <https://doi.org/10.1029/98JD00153>.
- [25] IDEAM, *Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010*. Bogotá, DC: Publicación aprobada por el Comité de Comunicaciones y Publicaciones del IDEAM, 2012.
- [26] D. S. Wilks, *Statistical methods in the atmospheric sciences*, vol. 100. Oxford: Academic press, 2011.

- [27] Instituto de Hidrología, *Atlas climatológico de Colombia*. Colombia: Ideam (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), 2005.
- [28] J. A. Pachón-Gómez, F. Mejía-Fernández, J. Zambrano-Nájera, “Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas – SIMAC”, Repositorio Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2018.
- [29] G. Poveda, O. Mesa, “La corriente de chorro superficial del Oeste (‘ Del Chocó’) y otras dos corrientes de chorro en Colombia: Climatología y variabilidad durante las fases del ENSO”, *Rev. Académica Colomb. Cienc.*, vol. 23, no. 89, pp. 517-528, 1999.
- [30] L. Jaramillo, G. Poveda, J. F. Mejía, “Mesoscale convective systems and other precipitation features over the tropical Americas and surrounding seas as seen by TRMM”, *Int. J. Climatol.*, vol. 37, pp. 380-397, 2017, doi: <https://doi.org/10.1002/joc.5009>.
- [31] J. Yepes, G. Poveda, J. F. Mejía, L. Moreno, C. Rueda, “CHOCO-JEX: A Research Experiment Focused on the Chocó Low-Level Jet over the Far Eastern Pacific and Western Colombia”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 100, no. 5, pp. 779-796, 2019, doi: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0045.1>.
- [32] C. Dominguez, J. M. Done, C. L. Bruyère, “Easterly wave contributions to seasonal rainfall over the tropical Americas in observations and a regional climate model”, *Clim. Dyn.*, vol. 54, no. 1, pp. 191-209, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04996-7>.
- [33] A. Jaramillo, *Clima andino y café en Colombia*. Bogotá, Colombia: CENICAFE, 2005.
- [34] C. M. González Duque, “Dinámica e impacto de emisiones antrópicas y naturales en una ciudad andina empleando un modelo euleriano de transporte químico on-line. Caso de estudio: Manizales, Colombia”, tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales, 2017.
- [35] E. R. Williams, “Lightning and climate: A review”, *Atmos. Res.*, vol. 76, no. 1-4, pp. 272-287, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.11.014>.
- [36] E. Williams, “Contrasting convective regimes over the Amazon: Implications for cloud electrification”, *J. Geophys. Res.*, vol. 107, no. D20, pp. 1-19, 2002, doi: <https://doi.org/10.1029/2001JD000380>.
- [37] C. Price, “Thunderstorms, lightning and climate change”, en *Lightning: Principles, Instruments and Applications*, Springer, 2009, pp. 521-535, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9079-0_24.
- [38] C. D. Ahrens, *Essentials of meteorology: an invitation to the atmosphere*. USA: Cengage Learning, 2014.
- [39] E. Brisson, B. Ahrens, U. Blahak, “Lightning climate prediction: Added value of convection permitting simulations”, en *Geophysical Research Abstracts*, 2019, vol. 21, pp. 1.