

Comportamiento de la actividad eléctrica en las tormentas que producen caída de granizos

Behavior of lightnings in storms that produce hail fall



<https://cu-id.com/2377/v29n1e01>

✉ Luis Enrique Cáceres Díaz*, ✉ Carlos Manuel González Ramírez

Centro de Pronóstico del Tiempo, Instituto de Meteorología, Loma de Casablanca, Regla. Apartado 17032, La Habana, Cuba,

RESUMEN: En este trabajo se analizaron un total de 11 tormentas en las que se reportó caída de granizos y 8 tormentas en las que no se reportó, ocurridas en la región de Artemisa, La Habana y Mayabeque, durante el año 2020. Con el objetivo de estudiar la relación entre la actividad eléctrica y la caída de granizos en tormentas que la produjeron. Para su desarrollo fueron utilizados los reportes de granizo extraídos en los resúmenes mensuales elaborados por el Centro de Pronósticos del Instituto de Meteorología de Cuba, además de los datos de descargas eléctricas medidos por la estación receptora *Earth Networks* ubicada en Casablanca, así como las observaciones del radar meteorológico de Key West. Se obtuvo la correlación lineal de Pearson para los casos analizados. Como resultados se obtuvo que, en las tormentas productoras de granizos la actividad eléctrica y la reflectividad mostraron una correlación lineal de 0,86, valor muy similar a las tormentas que no produjeron granizos que fue de 0.85. Sin embargo, la mayor diferencia fue observada en la cantidad de descargas por reflectividad observada, que en el caso de las tormentas productoras de granizos los valores de reflectividad comprendidos entre 60 y 69 dBZ fueron las de mayores descargas promedio por minuto, con un valor de 10, mientras en las que no se produjo la caída de granizos el intervalo entre 50 y 59 dBZ presentó un valor de 8 descargas promedio por minuto.

Palabras clave: Tormenta eléctrica, granizo, descarga eléctrica, reflectividad.

ABSTRACT: In this work, a total of 11 storms in which hail fall was reported and 8 storms in which it was not reported, which occurred in the region of Artemisa, Havana and Mayabeque, during the year 2020, were analyzed. the relationship between lightnings and the fall of hail in storms that produces it. For its development, the hail reports extracted from the monthly summaries prepared by the Forecast Center of the Cuban Institute of Meteorology were used, in addition to the data of lightnings measured by the Earth Networks receiving station located in Casablanca, as well as the observations of the Key West weather radar. The Pearson linear consequence was obtained for the analyzed cases. As a result, it was obtained that, in the hail-producing storms, the lightnings and reflectivity showed a linear impact of 0.86, a value very similar to that of the storms that did not produce hail, which was 0.85. However, the greatest difference was observed in the number of discharges per observed reflectivity, which in the case of hail-producing storms, the reflectivity values between 60 and 69 dBZ were the ones with the highest average discharges per minute, with a value of 10, while in those where hail did not fall, the interval between 50 and 59 dBZ presented a value of 8 average discharges per minute.

Keywords: thunderstorms, hail, lightnings, reflectivity.

1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento de la actividad eléctrica está estrechamente relacionado con la ocurrencia de caída de granizo en tormentas. Estudios desarrollados en latitudes medias, han demostrado que aproximadamente entre 5 y 15 minutos antes de la ocurrencia de granizo, se produce un gran incremento en la actividad eléctrica (Yao *et al.*, 2012). Estos resultados sugieren la posibilidad que este comportamiento pueda ser un procedimiento más para el pronóstico de este fenómeno.

Este comportamiento está sustentado por estudios de observación y simulación de tormentas han apoyado la hipótesis de que el graupel y los cristales de

hielo son las especies que desempeñan el papel más importante en la electrificación de las tormentas y la aparición de rayos (Dye *et al.*, 1988; Ziegler *et al.*, 1991; Brangi *et al.*, 1997; Black *et al.*, 1999; Bruning *et al.*, 2007). El proceso microfísico responsable de este intercambio de carga es todavía algo incierto, pero los estudios de laboratorio indican que la masa se transfiere durante las colisiones de partículas de hielo, y la partícula cuya superficie está creciendo más rápido por la difusión de vapor en el instante de la colisión se carga positivamente en la separación de partículas (el relativo mecanismo de tasa de crecimiento por difusión) (Baker *et al.*, 1987; Dash *et al.*, 2001; Mitzeva *et al.*, 2005; Emersic *et al.*, 2010).

*Autor para correspondencia: Luis Enrique Cáceres Díaz. E-mail: luisenriquecaceresdiaz@gmail.com

Recibido: 30/06/2022

Aceptado: 20/12/2022

Los estudios de las últimas dos décadas muestran resultados similares sobre el comportamiento de la actividad eléctrica y el granizo. Guili *et al.*, 2006 estudiaron tres casos de tormenta con caída de granizos en la provincia de Shandong en China, mostrando que diferentes tormentas eléctricas presentan diferentes características de rayos incluso si están bajo la misma situación sinóptica. Mientras que el porcentaje de rayos CG positivos es muy alto durante el período de caída de granizo. Los destellos ocurrieron principalmente en la región que presentó una temperatura de brillo en la parte superior de la nube de -50°C . En el caso de los destellos CG negativos generalmente se agrupaban en la región de temperatura más baja y tendían a ocurrir en la región con gradiente máximo de temperatura, mientras que los positivos generalmente se extendían discretamente. Los destellos CG negativos generalmente ocurrieron en regiones de eco intenso con reflectividad superior a 50 dBZ, mientras que los destellos CG positivos a menudo ocurrieron en regiones de eco débiles y estables (10 - 30 dBZ) o yunques de nubes, aunque a veces se pueden observar en fuertes regiones convectivas. Casi toda la caída de granizo tuvo lugar en el escenario con destellos positivos activos, y la tasa máxima de destellos positivos es un poco antes de los eventos de granizo. La tormenta eléctrica podría provocar un tiempo desastroso cuando se produzcan actividades de rayos CG positivos en racimo.

Más adelante, Yao *et al.*, 2012; evaluaron las características de las actividades de los rayos en tormentas de granizo en la región de Beijing, Tianjin y la provincia de Hebei, encontrando que el pico de frecuencia de los rayos a menudo se observaba antes de que ocurriera tiempo severo en el suelo. Se demostró que cuando aparecía la alta proporción de destellos CG positivos, el diámetro del granizo era mayor y la duración del granizo era mayor, mientras que el CG negativo dominaba, el diámetro del granizo era relativamente menor.

Un tiempo después, Xu *et al.*, 2016; investigaron dos tormentas de granizo que ocurrieron en Beijing y Tianjin, respectivamente. Ambas tormentas exhibieron dos picos de frecuencia de rayos: el primero fue antes del granizo y el segundo fue después del granizo, con el segundo pico mayor que el primero. La polaridad dominante del rayo CG fue positiva en la etapa alrededor del primer pico de frecuencia, pero cambió a negativa en la etapa alrededor del segundo pico de frecuencia. A través de la exploración de la evolución de los ecos del radar y la distribución de alturas de las fuentes de radiación de los rayos, se detectó que ambas tormentas de granizo tenían una convección más fuerte, y la carga positiva principal se produjo en niveles medios durante la etapa alrededor del primer pico de frecuencia. Sin embargo, mientras que la tormenta de Beijing experimentó la mejora de la convección con la carga positiva principal en los niveles superiores alrededor del segundo pico de frecuencia,

la tormenta de Tianjin generó su segundo pico de frecuencia durante el período en el que la convección siguió debilitándose y la carga positiva principal cayó en los niveles medios - bajos. A través de la evaluación de los parámetros del radar, se investigaron los mecanismos responsables de la segunda etapa de la descarga activa del rayo. La actividad de los rayos mostró una estrecha relación con los parámetros del eco del radar y el granizo. Las señales de salto de relámpago se encontraron antes de la caída del granizo y se asociaron con la relación de cambio del volumen de eco de 40 dBZ por encima del nivel de -15°C , demostrando el valor de la aplicación de los datos de rayos en la advertencia de tiempo severo.

Los estudios en Cuba sobre las tormentas eléctricas son muchos, los cuáles van desde distribución espacial y temporal (Alfonso, 1986; Aguilar *et al.*, 2005; Álvarez *et al.*, 2006, 2012, 2018) hasta los análisis de su estructura interna (Martínez *et al.*, 2004, Hernández *et al.*, 2017 y Chaviano *et al.*, 2017). Sin embargo, con los datos de actividad eléctrica obtenidos con la red de detección de rayos, se ha podido relacionar dicha actividad con los distintos tipos de severidad que ocurren en el archipiélago cubano. De ahí que el objetivo de este artículo es estudiar la relación entre la actividad eléctrica y la caída de granizos en tormentas eléctricas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Características del granizo en la región de estudio

En las provincias de Artemisa, La Habana y Mayabeque según estudios realizados es una zona que en el periodo lluvioso es afectada por la caída de granizos. El interior y sur de La Habana es una de las regiones de mayor preferencia para la ocurrencia de este fenómeno, donde existe energía suficiente para el desarrollo de fuertes corrientes ascendentes (Bermúdez *et al.*, 2014) y el periodo de mayor ocurrencia según los reportes de casos utilizados en la investigación, es el comprendido entre las 19:00 y las 21:00 UTC.

Para la investigación se utilizó el área de trabajo definida entre las coordenadas $22,47^{\circ}\text{N}$ - $23,63^{\circ}\text{N}$ y $81,50^{\circ}\text{W}$ - $82,95^{\circ}\text{W}$ que a su vez comprende a las provincias de Artemisa, La Habana y Mayabeque, pertenecientes a la región occidental de Cuba. La región limita al norte con el estrecho de la Florida, al sur con el golfo de Batabanó, al este con la provincia de Matanzas y al oeste con la provincia de Pinar del Río (figura 1).

2.2 Datos utilizados

Para el estudio se analizaron 11 casos de reporte de caída de granizos de las provincias de Artemisa, La Habana y Mayabeque que se muestran en la tabla 1, de ellos 3 pertenecientes al periodo poco lluvioso (PPLL) y 8 al periodo lluvioso (PLL) del año 2020.

Los casos fueron extraídos de los resúmenes mensuales realizados por el Instituto de Meteorología (INSMET). Destacar que en los meses de septiembre y octubre del PLL no se reportó caída de granizos en el área de estudio y en los casos del 26 de abril y del 9 de mayo no se precisó la hora del reporte por lo que fue necesario acudir a las observaciones del radar de Key West y a las imágenes de satélite a través del sitio <https://weather.us> para definir aproximadamente el periodo de ocurrencia.

También fueron analizados 8 casos de tormentas que no reportaron caída de granizos (tabla 2), del PLL del 2020, a partir de la clasificación del código de tiempo presente pertenecientes a las estaciones meteorológicas de Bauta, Güira de Melena, Santiago de las Vegas y Batabanó, con el objetivo de que el margen de error del reporte fuera menor que los casos de reporte de granizo. Estas tormentas registraron acumulados de precipitación que estuvieron entre los 20.0 y 23.9 mm.

Para extraer las observaciones pertenecientes al radar meteorológico de Key West, fue necesario visitar el sitio web <https://www.ncdc.noaa.gov/nexradiv/chooseday.jsp?id=kbyx> del Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC) de los EE.UU.

Para el análisis de la actividad eléctrica se utilizaron los datos provenientes de la *Red Earth Networks Total Lightning Network* (ENTLN), la cual es una red de detección de rayos de nube a nube y de nube a tierra desplegada a nivel mundial capaz de detectar rayos en la nube de largo alcance con altas eficiencias críticas

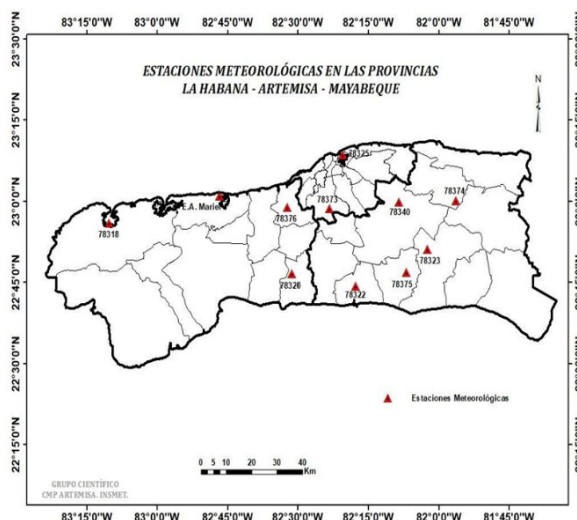


Figura 1. Área de estudio utilizada en la investigación.

para la predicción avanzada de fenómenos meteorológicos severos. Esta red utiliza una metodología de detección de tiempo de llegada con tecnología GPS y algoritmos sofisticados para localizar y clasificar con precisión los tipos de rayos, IC o CG. El instrumento que se encarga de detectar y procesar las descargas eléctricas cuenta con una antena, un receptor GPS, un circuito de temporización basado en GPS, un procesador de señal digital (DSP) y un equipo de almacenamiento y comunicación por Internet a bordo, como se muestra en la figura 2.

Tabla 1. Casos de estudio con reporte de granizo

Fecha	Periodo de caída de granizos (UTC)	Lugar
26 de abril	19:25 - 19:30	Centro Habana
29 de abril	20:20 - 21:30	Centro Habana
30 de abril	18:30 - 19:00	Guanajay
9 de mayo	19:10 - 20:30	Bainoa
9 de mayo	19:10 - 20:30	Boyeros
15 de mayo	20:30 - 21:02	San José de las Lajas
14 de junio	16:55	Tapaste
7 de julio	17:45 - 17:50	La Lisa
16 de agosto	20:00 - 20:45	Las Cañas
30 de agosto	19:10 - 19:20	Las Cañas
30 de agosto	20:40	Batabanó

Tabla 2. Casos de estudio sin reporte de granizo

Fecha	Periodo analizado (UTC)	Estación Meteorológica
10 de mayo	08:07 - 09:03	Batabanó
29 de mayo	20:02 - 21:08	Bauta
29 de mayo	20:02 - 21:08	Santiago de las Vegas
15 de junio	20:04 - 21:14	Santiago de las Vegas
4 de julio	20:03 - 21:09	Bauta
18 de julio	20:06 - 21:12	Bauta
21 de julio	17:03 - 18:09	Güira de Melena
1 de octubre	23:06 - 00:14	Batabanó

2.3 Procesamiento de las observaciones de radar. Software “Weather and Climate Toolkit” (WCT)

Con el empleo de este software (figura 3a) se procesaron las observaciones del radar y se determinaron las áreas de máxima reflectividad a través de una herramienta la cual almacena en un documento (txt) como se muestra en la figura 3b la latitud y longitud del área seleccionada con un “clic”, así como también la reflectividad, la hora y la fecha, a partir del procesamiento de las observaciones extraídas del radar de Key West. También se crearon animaciones con el conjunto de imágenes provenientes de las observaciones del radar para cada caso con el objetivo de poder detectar qué tormenta fue la que produjo el granizo en el lugar del reporte.

Para extraer la información de las descargas eléctricas en cada uno de los lugares donde se registró la caída de granizo, se utilizó un algoritmo programado en C++, como se puede observar en la figura 4.

2.4 Correlación lineal de Pearson

Para determinar cómo es la relación entre la actividad eléctrica y la caída de granizos se utilizó la correlación de Pearson a partir de la expresión 1.

$$r = \frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad 2.1$$

Donde x corresponde a los valores de reflectividad, así como, y representa a los valores de descargas eléctricas y n , es el tamaño de la muestra de datos.

El coeficiente correlación de Pearson es el índice que se utiliza para establecer el grado de relación que existe entre dos variables cuantitativas, gráficamente es el grado en el cual una nube de puntos representada a través de un diagrama de dispersión se aproxima a una recta. Dicho coeficiente puede tomar valores comprendidos entre +1 y -1, donde un valor de 0 indica que no hay asociación entre las dos variables y un valor mayor que 0 indica una asociación positiva y viceversa.

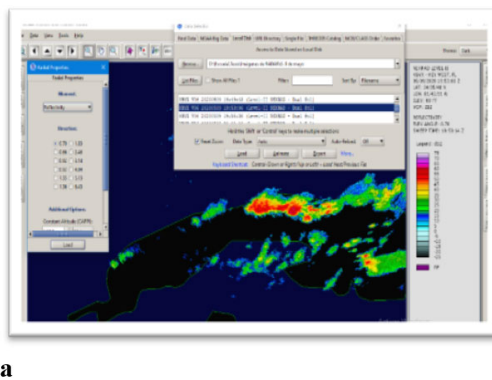


Figura 3. Captura de pantalla que muestra el procesamiento de las observaciones del radar de Key West (a) y los valores de reflectividad (dBZ) de los casos de estudio (b)

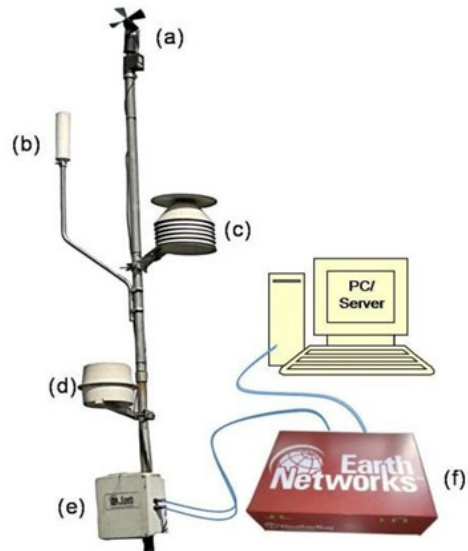


Figura 2. Earth Networks detector total de rayos e instrumentos meteorológicos: (a) Sensor de velocidad y dirección del viento, (b) Sensor integrado de detección de rayos en la nube y de nube a tierra, (c) Refugio del sensor, (d) Lluvia Gauge, (e) Caja de control remoto de descargas, (f) Dispositivo de red, Mida, 2018

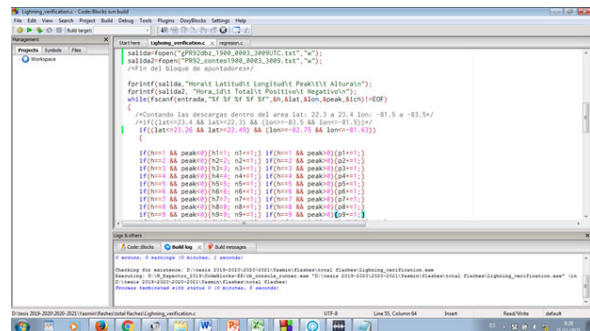
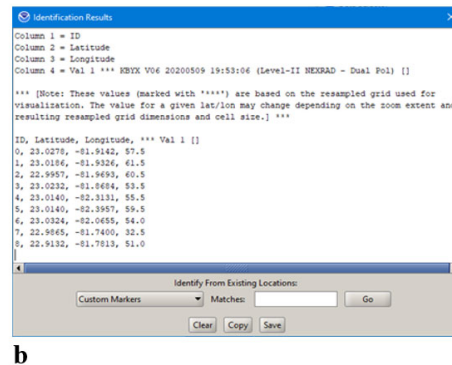


Figura 4. Muestra del código para extraer las descargas eléctricas

Este análisis se llevó a cabo en cada uno de los casos de estudio, calculándose los coeficientes de correlación para los distintos tipos de descargas (positivas, negativas y total).



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Comportamiento de las tormentas productoras de granizo

Las tormentas mostraron altos valores de reflectividad en general por encima de los 55 dBZ. Es visible la diferencia entre las intensidades de reflectividad siendo superior hacia el PLL donde los valores se ubicaron por encima de los 61 dBZ. Los horarios donde se registraron los valores más altos de reflectividad fueron entre las 19:00 y 21:00 UTC. El máximo valor de reflectividad se detectó entre las 19:00 y las 20:00 UTC en Boyeros con 69 dBZ (figura 5). Estos resultados guardan estrecha relación con los obtenidos por Hernández *et al.*, 2017, quienes obtuvieron para los casos de granizo en el PPLL un valor medio de 59,4 dBZ y para el PLL una media de 58,4 dBZ, un valor máximo de 68 dBZ y que los horarios de mayor desarrollo de tormentas se presentaron desde las 18:30 y 21:30 UTC. La distribución espacial de estas tormentas mostró cierta preferencia hacia el interior de la región de estudio, debido a que la mayoría de los casos así lo demostraron y a su vez coincide con los resultados de Bermúdez *et al.*, 2014.

3.2 Características de la actividad eléctrica en las tormentas productoras de granizo

Las tormentas estudiadas mostraron abundante actividad eléctrica en general, similar a lo obtenido por Yao *et al.*, 2012 y Xu *et al.*, 2016, dicha actividad se dividió en descargas positivas (nube a tierra) y descargas negativas (nube a nube). A continuación, se realizará un análisis del comportamiento de la actividad eléctrica en las tormentas que produjeron granizos.

Las tormentas productoras de granizo mostraron altos valores de descargas eléctricas en general, siendo mayor el número de descargas negativas en más de la mitad de los casos. Se obtuvo además que más de la mitad de los casos mostraron más de dos picos de actividad eléctrica figura 6, lo que es similar a los resultados obtenidos por Xu *et al.*, 2016, con un promedio de 15 minutos aproximadamente entre el primer pico y el segundo pico.

3.3 Correlación lineal entre la actividad eléctrica y la reflectividad máxima en tormentas productoras de granizo

Como se aprecia en la figura 7, existen casos en ambos periodos climáticos en los que la correlación lineal es baja, con valores por debajo del 0.5. Una de las causas por la que estos valores de correlación lineal sean bajos, puede estar relacionado con tormentas que además de producir granizos, fueron eficientes a la precipitación, lo que conlleva a registrarse altos valores de reflectividad con baja densidad de actividad eléctrica. Esto será estudiado en próximos trabajos ya que no es objetivos de la presente investigación.

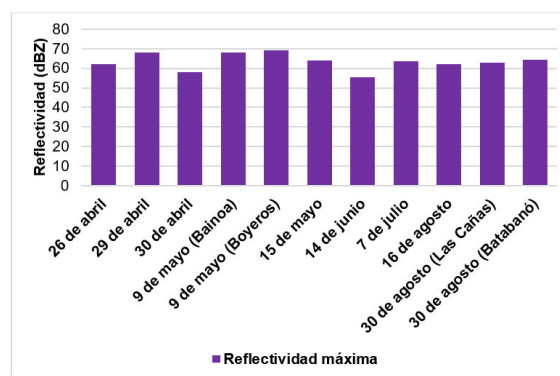


Figura 5. Reflectividad máxima de las tormentas que produjeron granizos.

En el caso de las altas correlaciones fueron observadas solo en el PLL con valores por encima de los 0.6 concentradas en las tormentas ocurridas en el mes de mayo y agosto. Los mayores valores de correlación los tuvo el caso del 30 de agosto en Batabanó con 0,7, 0,8 y 0,8 para las descargas positivas, las negativas y el total de descargas respectivamente (figura 7). El comportamiento antes descrito permite determinar un valor promedio de correlación de 0,86.

Estos resultados de correlación permiten asociar rangos de reflectividad por promedio de descargas tal y como se muestran en la tabla 3, donde se presentan esos valores promedio de descargas por minuto, siendo proporcionales con los rangos de reflectividad, por lo que se puede llegar a concluir que el promedio de descargas totales por minuto suele aumentar a medida que aumenta la reflectividad con un máximo de 10 descargas por minutos para reflectividades entre 60-69 dBZ.

3.4 Comportamiento de las tormentas no productoras de granizo

Los valores de la reflectividad en las tormentas que no se reportó caída de granizos, fue inferior al observado en las tormentas que produjeron granizos. De los 8 casos, 6 presentaron reflectividad máxima por encima de 40 dBZ, siendo los casos del 29 de mayo los que archivaron los mayores valores de reflectividad máxima, con 57 y 52 dBZ respectivamente, el menor valor dentro de los máximos se registró en el caso del 4 de julio, con 25 dBZ (figura 8). Destacar que el periodo de tiempo más frecuente fue el comprendido entre las 20:00 y las 21:30 UTC.

3.5 Características de la actividad eléctrica en las tormentas no productoras de granizo

De las tormentas estudiadas, en cuatro la actividad eléctrica fue significativa, tres no registraron descargas eléctricas y una registró solamente 1 descarga. A continuación, se muestra el comportamiento de la actividad eléctrica en cada caso (figura 9).

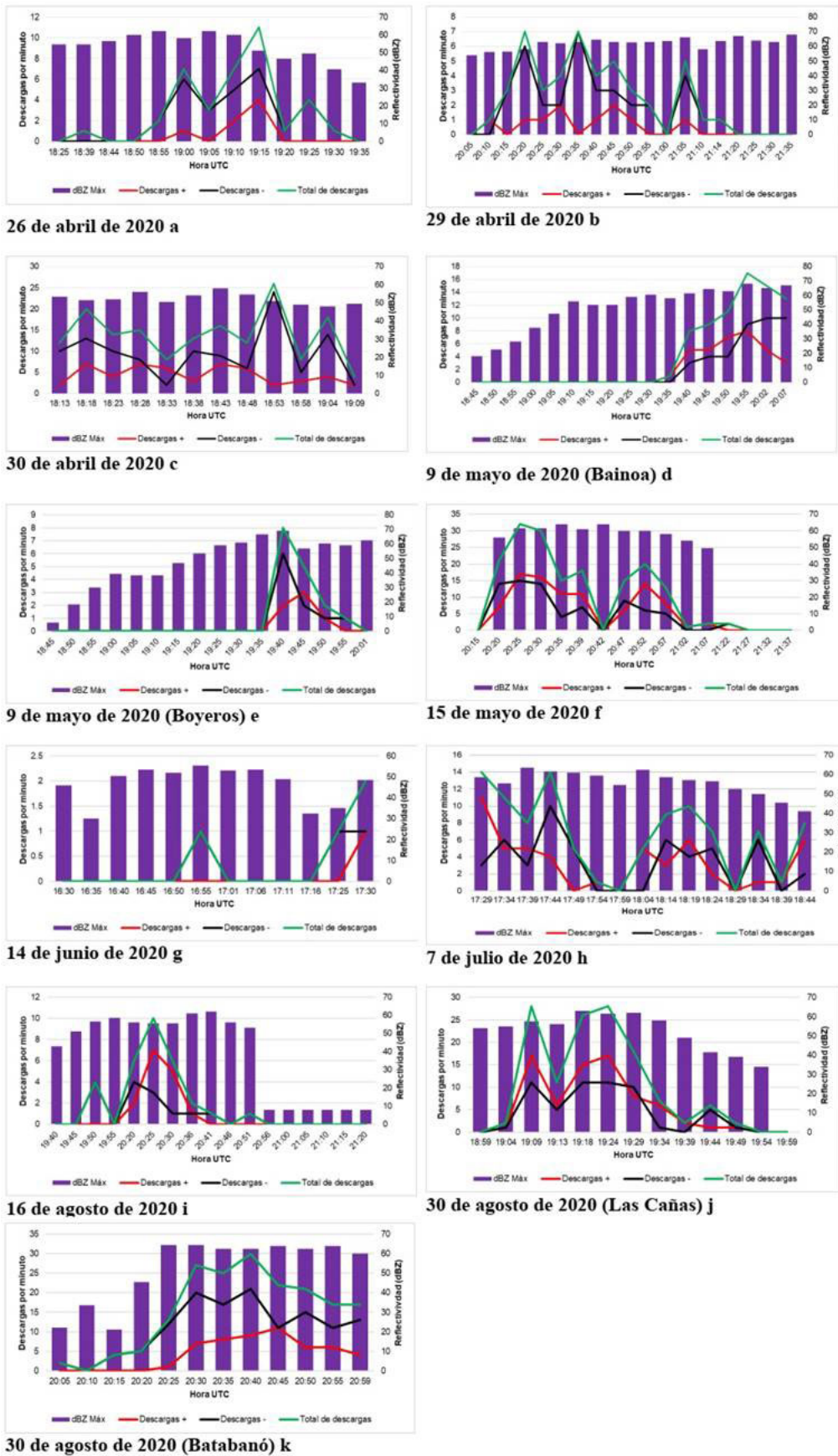


Figura 6. Relación entre máxima reflectividad, descargas positivas, descargas negativas y descargas totales pertenecientes a las tormentas productoras de granizo

En este tipo de tormentas el comportamiento de las descargas fue similar al observado en las tormentas que produjeron granizo con un predominio de descargas negativas y tres de los casos estudiados mostraron tres picos de actividad eléctrica, que también se corresponde con la actividad eléctrica observada en las tormentas con granizos.

3.6 Correlación lineal entre la actividad eléctrica y la reflectividad máxima en tormentas no productoras de granizo

En la [tabla 4](#) se muestra el comportamiento de los distintos rangos de reflectividad con los promedios de descargas por minuto correspondientes y se puede concluir que a partir de los 30 dBZ los valores promedio de descargas por minuto comienzan a aumentar, siendo el rango de 50 a 59 dBZ el que mayor promedio de descargas por minuto presenta con un promedio de 8 inferior al observado en las tormentas productoras de granizo.

3.7 Tiempo óptimo antes de que una tormenta produzca caída de granizos

Determinar el tiempo en el que pueda comenzar a precipitar granizo es muy difícil, ya que este hidrometeoro depende de muchos factores y procesos microfísicos dentro de la nube antes de su llegada al suelo, es por esto que el valor de tiempo obtenido en esta investigación es aproximado ya que ninguna tormenta es idéntica a otra.

Este valor de tiempo presenta una gran limitante, que resulta ser la hora de reporte del granizo, ya que pueden surgir varios inconvenientes, como un reporte después de haber comenzado el granizo y que el reporte no se realiza por el personal calificado, lo que provoca una incertidumbre en el resultado que se desea obtener para determinar el tiempo en el que cae el hidrometeoro. El tiempo se determinó partiendo primeramente de que hay constancia de que hubo granizo, como es lógico, en el lugar del reporte se contó con 8 periodos de reporte de los 11 casos de estudio, y para tener una idea del periodo de ocurrencia del granizo en los 3 casos restantes hubo que apoyarse en las observaciones del radar y las imágenes del satélite

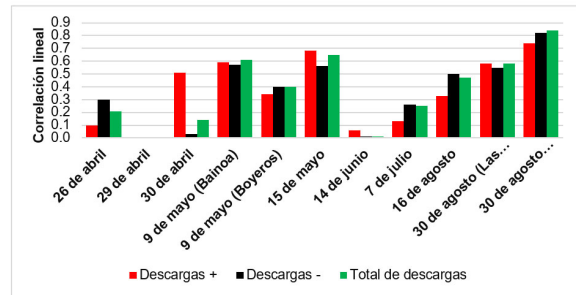


Figura 7. Correlaciones entre los valores de reflectividad con las descargas positivas, descargas negativas y el total de descargas

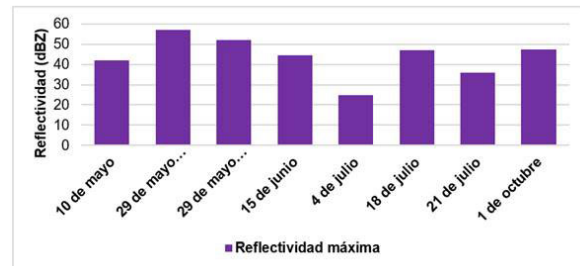


Figura 8. Reflectividad máxima de las tormentas que no produjeron granizos

como ya se había mencionado, donde la realización de los gráficos fue de gran ayuda para determinar el momento en el que pudo haber comenzado la caída de granizos, a partir de los conocimientos adquiridos de la bibliografía consultada y los antecedentes internacionales.

Teniendo en cuenta todo lo anterior y con el análisis de los gráficos, los períodos de reporte en algunos casos coincidían (0), se adelantaban (-) o se retrasaban (+) con respecto al primer pico de descargas eléctricas ([figura 10](#)), estos minutos de antelación o retraso se promediaron y se obtuvo un valor de +0,87 minutos, lo que indica que aproximadamente el tiempo para que ocurra la caída de granizos es de 1 minuto después del primer pico de actividad eléctrica, resultado que no se corresponde con el de [Yao et al., 2012](#), los que obtuvieron un valor promedio de tiempo de aproximadamente 5 a 15 minutos después del primer pico de descargas eléctricas para que ocurra la caída de granizos. Estas diferencias de tiempos antes de que el granizo llegue al suelo entre ambas investigaciones es

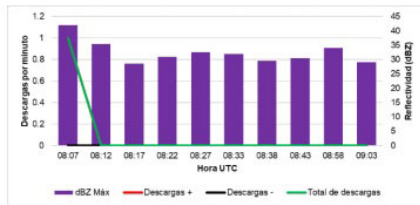
Tabla 3. Relación entre rangos de reflectividad y los valores promedio de descargas por minuto en las tormentas que produjeron granizos

Rangos de valores de reflectividad en dBZ	Promedio de descargas positivas/minuto	Promedio de descargas negativas/minuto	Promedio de descargas totales/minuto
0 - 9	0	0	0
10 - 19	0	0	0
20 - 29	0	2	2
30 - 39	0,1	0,2	0,3
40 - 49	1	2	3
50 - 59	2	3	6
60 - 69	4	6	10

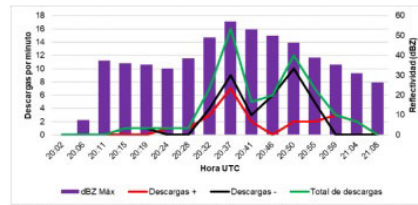
probable que se deba a la intensidad de las corrientes ascendentes en ambas regiones de estudio, como la región de Yao y colaboradores se encuentra a mayor latitud que la que presenta este trabajo, esto provoca que los hidrometeoros de hielo permanezcan mayor tiempo dentro de la nube.

La correlación entre la reflectividad máxima y los diferentes promedios de descargas por minuto fue alta, obteniendo valores de 0,80 para el promedio de descargas positivas por minuto, 0,90 para el promedio

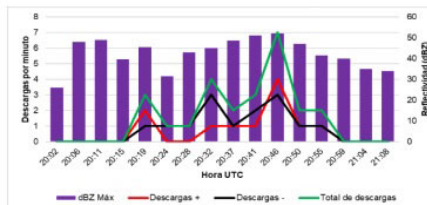
de descargas negativas por minuto y 0,85 para el promedio de descargas totales por minuto (figura 11). De manera que se puede concluir planteando que las correlaciones en sentido general de las tormentas productoras de granizos y las que no produjeron granizos son semejantes, con valores de 0,86 y 0,85 respectivamente, lo que corrobora los trabajos desarrollados por Martínez *et al.*, 2004, Williams, 1989 y Price and Rind, 1992.



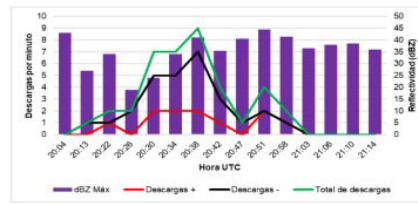
10 de mayo de 2020 a



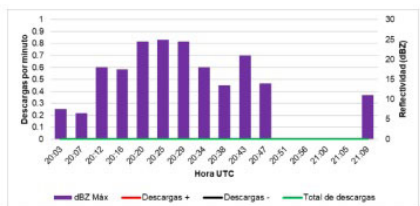
29 de mayo de 2020 (Bauta) b



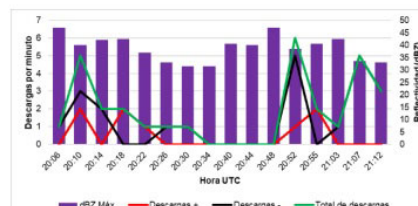
29 de mayo de 2020 (Santiago de las Vegas) c



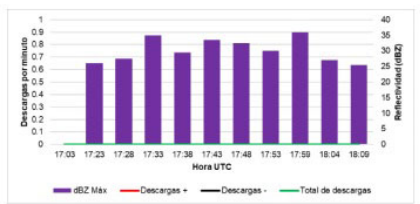
15 de junio de 2020 d



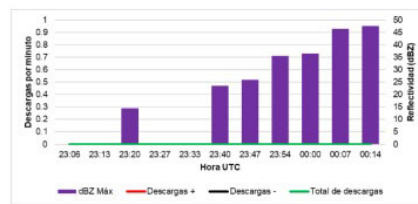
4 de julio de 2020 e



18 de julio de 2020 f



21 de julio de 2020 g



1ro de octubre de 2020 h

Figura 9. Relación entre máxima reflectividad, descargas positivas, descargas negativas y descargas totales pertenecientes a las tormentas que no produjeron granizo

Tabla 4. Relación entre rangos de reflectividad y los valores promedio de descargas por minuto en las tormentas que no produjeron granizos

Rangos de valores de reflectividad en dBZ	Promedio de descargas positivas/minuto	Promedio de descargas negativas/minuto	Promedio de descargas totales/minuto
0 - 9	0	0	0
10 - 19	0	0	0
20 - 29	0	0	0
30 - 39	0,2	0,8	1
40 - 49	1	1	2
50 - 59	4	4	8

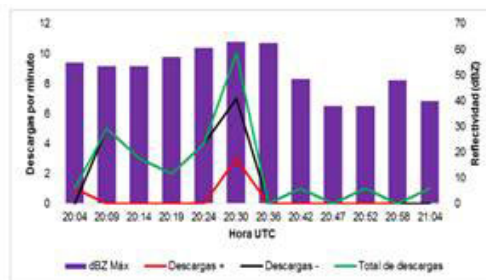
3.8 Estudio de casos

Para comprobar la veracidad de los resultados obtenidos, se escogieron dos casos de tormentas locales severas, fuera de la muestra y dentro del área de estudio, La primera ocurrida el día 20 de julio de 2019 en los municipios de San Cristóbal en la provincia de Artemisa y en Madruga perteneciente a Mayabeque, casualmente ambas tormentas se desarrollaron en el mismo horario.

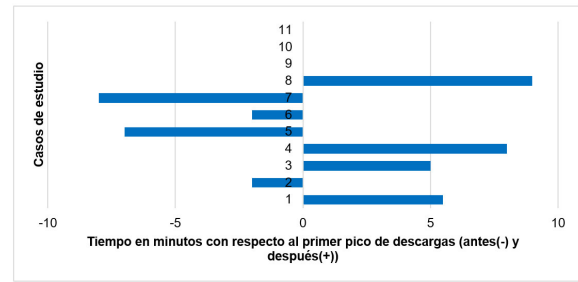
En la tormenta reportada en San Cristóbal se registró un total de 28 descargas eléctricas, descargas positivas fueron 5 solamente y negativas 23, por lo que la actividad eléctrica dentro de la nube fue superior. El primer pico de descargas fue a las 20:09 UTC con 5, todas ellas negativas, coincidiendo con un valor de reflectividad de 53,5 dBZ. Luego de 10 minutos, las descargas eléctricas y la reflectividad comenzaron a decrecer y en los 10 minutos siguientes aumentaron hasta alcanzar ambas sus máximos valores a las 20:30, la reflectividad fue de 63 dBZ y se detectaron 7 descargas negativas y 3 positivas, a partir de las 20:36 UTC, las descargas eléctricas disminuyeron drásticamente, así también como la reflectividad (figura 12).

En la tormenta de Madruga, se registró un total de 79 descargas, de ellas 62 fueron negativas y 17 positivas, lo que muestra el potencial destructivo que provocó este fenómeno. A las 20:19 UTC se registró el primer pico, con 9 descargas negativas y 2 positivas, pasados 11 minutos, se detectó el segundo pico y máximo, con 9 descargas negativas y 5 positivas para un valor de reflectividad de 64,5 dBZ. Luego disminuyó la actividad eléctrica hasta un tercer pico, lógicamente menor que los anteriores, de 6 descargas negativas y 1 positiva, a las 20:47 UTC y la reflectividad experimentó un decrecimiento paulatino (figura 12).

Las correlaciones entre los valores de reflectividad y la actividad eléctrica del caso de San Cristóbal presentaron valores de 0,3 para las descargas positivas, 0,5 para las negativas y 0,5 para el total de descargas y el caso de la tormenta de Madruga mostró valores más altos, las descargas positivas tuvo una correlación de 0,7, las negativas 0,5 y el total de descargas un valor de 0,6.



a



b

Figura 12. Relación entre máxima reflectividad, descargas positivas, descargas negativas y descargas totales pertenecientes a la tormenta del 20 de julio de 2019 en San Cristóbal a y Madruga b

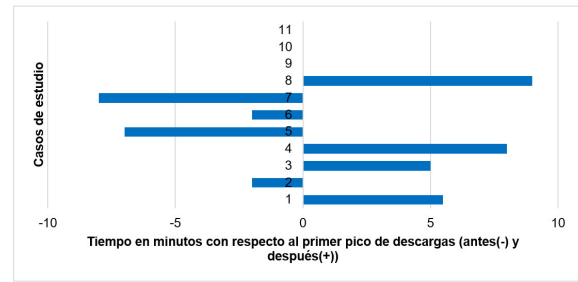


Figura 10. Comportamiento del tiempo de reporte del granizo con respecto al primer pico de descargas eléctricas

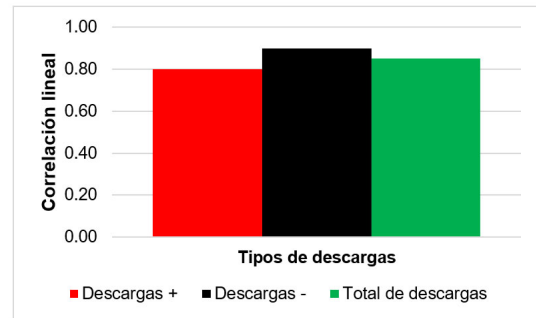


Figura 11. Correlaciones entre la reflectividad y los promedios de descargas positivas, negativas y totales por minuto

Después de analizar estos dos casos se puede llegar a la conclusión de que, en comparación con los 11 casos de estudio, muestran un comportamiento similar, presentando incluso correlaciones más altas que varios casos de estudio, por lo que los resultados obtenidos para los casos de estudio como los de los casos fuera de la muestra, se corresponden entre sí.

CONCLUSIONES

- La relación entre la actividad eléctrica y la caída de granizos en las tormentas eléctricas estudiadas fue alta de 0,86.
- La actividad eléctrica en las tormentas productoras de granizo fue muy alta, con valores de 8 descargas positivas como promedio por minuto, 13 negativas y 21 totales, detectándose más de dos picos de actividad eléctrica en más del 50% de los casos,

mientras que en las tormentas que no produjeron granizos, fue alta también, obteniendo valores promedio de 5 descargas positivas por minuto, 7 negativas y 11 totales, predominando en ambos tipos de tormentas las descargas negativas.

- Los valores de reflectividad en las tormentas que produjeron granizos, estuvo entre 60 y 69 dBZ, con 10 descargas como promedio por minutos, mientras que en las tormentas que no produjeron granizos los valores de reflectividad se observaron entre 50 y 59 dBZ, con 8 descargas como promedios por minutos.
- El valor de tiempo obtenido antes de que se produzca la caída de granizos fue de 1 minuto aproximadamente después del primer pico de descargas eléctricas, por lo que no resulta práctico pronosticarlo usando la estación receptora, sin embargo, si es posible usarlo en el modelo WRF.

RECOMENDACIONES

- Ampliar la muestra de estudio para futuras investigaciones.
- Verificar los resultados obtenidos con el producto de reflectividad y descargas eléctricas calculado con el modelo WRF.
- Utilizar otros productos como es el caso del GLM obtenido con el satélite meteorológico GOES-16.

REFERENCIAS

- Aguilar-Oro, G., Carnesoltas-Calvo, M., Fernández-Balseiro, C., & Naranjo-Díaz, L. (2005). Climatología de las Tormentas Locales Severas en Cuba en el período 1987 - 2002. Resultados de la modelación de un caso de estudio. *Revista Cubana de Meteorología*, 12(1), 3-10.
- Alfonso, A. P. (1986). Aspectos climatológicos de las turbonadas en la Ciudad de la Habana. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 12, 85-100.
- Álvarez-Escudero, L., Borrajero-Montejo, I., Álvarez-Morales, R., Aenlle-Ferro, L., Bárcenas-Castro, M. (2012). Actualización de la distribución espacial de las tormentas eléctricas en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 18(1), 83-99.
- Álvarez-Escudero, L., & Borrajero-Montejo, I. (2018). Distribución espacial de fenómenos meteorológicos en Cuba clasificados a partir del código de tiempo presente. *Revista Cubana de Meteorología*, 24(1), 111-127.
- Baker, B., Baker, M. B., Jayaratne, E. R., Latham, J., & Saunders, C. P. R. (1987). The influence of diffusional growth rates on the charge transfer accompanying rebounding collisions between ice crystals and soft hailstones. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 113 (478), 1193-1215.
- Bermúdez-Souza, Y., Aguilar-Oro, G., & Wallo-Vázquez, A. (2014). Distribución espacial de las tormentas locales severas en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 20(1), 59-72.
- Black, R. A., & Hallet, J. (1999). Electrification of the hurricane. *Journal of the atmospheric sciences* 56(12), 2004-2028.
- Bringi, V. N., Knupp, K., Detwiler, A., Liu, L., Caylor, I. J., & Black, R. A. (1997). Evolution of a Florida thunderstorm during the Convection and Precipitation/Electrification Experiment: The case of 9 August 1991. *Monthly weather review* 125(9), 2131-2160.
- Bruning, E. C., Rust, W. D., Schuur, T. J., MacGorman, D. R., Krehbiel, P. R., & Rison, W. (2007). Electrical and polarimetric radar observations of a multicell storm in TELEX. *Monthly weather review*, 135(7), 2525-2544.
- Carey, I. D., & Rutledge, S. A. (1998). Electrical and multiparameter radar observations of a severe hailstorm. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D12), 13979-14000.
- Chaviano, J. F. (2017). Estructura interna de las tormentas que generan tiempo severo a partir del modelo WRF-ARW. Tesis en opción al grado de Licenciado en Meteorología. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, 85p.
- Dash, J. G., Mason, B. L., & Wettlaufer, J. S. (2001). Theory of Charge and mass transfer in ice-ice collisions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D17), 20395-20402.
- Dye, J. E., Jones, J. J., Weinheimer, A. J., & Winn, W. P. (1988). Observations within two regions of charge during initial thunderstorm electrification. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 114(483), 1271-1290.
- Emersic, C., & Saunders, C. P. R. (2010). Further laboratory investigations into the relative diffusional growth rate theory of thunderstorm electrification. *Atmospheric Research*, 98(2-4), 327-340.
- Guili, F. E. N. G., Xiushu, Q. I. E., Tie, Y. U. A. N., & Yunjun, Z. H. O. U. (2006). A case study of cloud-to-ground lightning activities in hailstorms under cold eddy synoptic situation. *Journal of Meteorological Research*, 20(4), 489-499.
- Heinselman, P. L., Emersic, C., MacGorman, D. R., & Bruning, E. C. (2011). Lightning activity in a hail-producing storm observed with phased-array radar. *Monthly Weather Review*, 139(6), 1809-1825.
- Hernández-Capote, J. F., & González-Ramírez, C. M. (2017). Estudio preliminar de la estructura en tormentas que provocaron tiempo severo, mediante las observaciones del radar de Casablanca. *Revista Cubana de Meteorología*, 23(2), 191-208.
- MacGorman, D. R., & Taylor, W. L. (1989). Positive cloud-to-ground lightning detection by a direction-finder network. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 94(D11), 13313-13318.

- Martínez, D., D. Pozo, I. Rivero, F. Gamboa, S. Novo, I. Borrajero, A. Bezanilla, C. Pérez, R. Báez Y E. Echavarría (2004): Aplicación de la simulación numérica tridimensional de nubes y el análisis de mesoescala al esclarecimiento de los mecanismos físicos de formación y desarrollo de las nubes y la lluvia en Cuba. Informe final del Proyecto Ramal de Ciencia y Técnica # 49212215. Instituto de Meteorología, CITMA, 112 pp.
- Mitzeva, R. P., Saunders, C. P. R., & Tsenova, B. (2005). A modelling study of the effect of cloud saturation and particle growth rates on charge transfer in thunderstorm electrification. *Atmospheric research*, 76(1-4), 206-221.
- Rust, W. D., MacGorman, D. R., & Arnold, R. T. (1981). Positive cloud-to-ground lightning flashes in severe storms. *Geophysical Research Letters*, 8(7), 791-794.
- Saunders, C. P. R., Bax-Norman, H., Avila, E. E., & Castellano, N. E. (2004). A laboratory study of the influence of ice crystal growth conditions on subsequent charge transfer in thunderstorm electrification. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 130(599), 1395-1406.
- Saunders, C. P. R., Bax-Norman, Emersic, C., Avila, E. E., & Castellano, N. E. (2006). Laboratory studies of the effect of cloud conditions on graupel/crystal charge transfer in thunderstorm electrification. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, 132(621), 2653-2673.
- Schultz, C. J., Petersen, W. A., & Carey, L. D. (2009). Preliminary development and evaluation of lightning jump algorithms for the real-time detection of severe weather. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(12), 2543-2563.
- Xu, S., Zheng, D., Wang, Y., & Hu, P. (2016). Characteristics of the two active stages of lightning activity in two hailstorms. *Journal of Meteorological Research*, 30(2), 265-281.
- Yao, W., Ma, Y., & Meng, Q. (2012, April). Characteristics of lightning activities in the hailstorm using the data from two types of lightning detection network. In *Proceedings of the 4th International Lightning Meteorology Conference (ILMC 2012)*.
- Yao, W., Zhang, Y., Meng, Q., Wang, F., & Lu, W. (2013). A comparison of the characteristics of total and cloud-to-ground lightning activities in hailstorms. *Acta Meteorologica Sinica*, 27(2), 282-293.
- Ziegler, C. L., McGorman, D. R., Dye, J. E., & Ray, P. S. (1991). A model evaluation of noninductive graupel-ice charging in the early electrification of a mountain thunderstorm. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 96(D7), 12833-12855.

Conflicto de interés. Declaramos, no tener ningún conflicto de interés

Contribución de autoría: Concepción de la idea: Luis Enrique Cáceres Díaz, Carlos Manuel González Ramírez. **Manejo de los datos:** Luis Enrique Cáceres Díaz. **Análisis de los datos:** Luis Enrique Cáceres Díaz, Carlos Manuel González Ramírez. **Investigación:** Luis Enrique Cáceres Díaz. **Metodología:** Luis Enrique Cáceres Díaz, Carlos Manuel González Ramírez. **Supervisión:** Carlos Manuel González Ramírez. **Validación de los resultados:** Carlos Manuel González Ramírez.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)