

Caracterización de celdas que generan Tormentas Locales Severas en el archipiélago cubano mediante observaciones de radar



<https://cu-id.com/2377/v31n1e09>

Characterization of cells that generate Severe Local Storms in the Cuban archipelago through radar observations

 Alis Varela de la Rosa^{1*},  Rafael T. Valdés Alberto²,  Elier Pila Fariñas¹

¹Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.

²Centro de Radares INSMET, Cuba.

RESUMEN: Las condiciones de formación y desarrollo de las tormentas convectivas son muy complejas, y mucho más cuando estas generan eventos severos como granizos, aeroavalanchas, tornados o trombas marinas, haciendo difícil encontrar características radáricas comunes de fácil identificación en las mismas. Una de las mejores herramientas para esto es el radar meteorológico, pues permite proporcionar datos dentro de las tormentas de forma casi instantánea. Partiendo de esto, se realiza esta investigación, la cual tiene como objetivo caracterizar las celdas que generan Tormentas Locales Severas en el archipiélago cubano mediante observaciones de radar. Este estudio se realiza a partir del análisis de 630 tormentas asociadas a eventos severos que ocurrieron en Cuba entre el 2010 y 2021, mediante observación de radar obtenidas de la red que dispone el país. Se analiza las variables radáricas reflectividad máxima, tope máximo de las celdas convectivas, altura de la máxima reflectividad y la altura máxima de la reflectividad de 45 dBZ. Los resultados mostraron que el 98.6 % de los valores de reflectividad máxima en las tormentas superaban los 45 dBZ, así como que el 99.7 % de los casos analizados superaban los 8 km de altura de sus topes, lo que demuestra la intensidad que caracterizan a las Tormentas Locales Severas en Cuba bajo un ambiente tropical e insular.

Palabras clave: Observaciones de radar, Tormentas locales Severas.

ABSTRACT: The conditions for the formation and development of convective storms are very complex, and even more those producing severe events such as hail, downburst, tornadoes or waterspouts, making difficult to find common radar features that are usual on them. One of the best tools for this is meteorological radar, as it allows data to be provided within storms almost instantly. Based on this, this research is carried out, aiming to characterize the cells that generate Severe Local Storms in the Cuban archipelago through radar observations. Were analyzed 630 storms associated with severe events that occurred in Cuba between 2010 and 2021, through radar observations obtained from the Cuban network. The radar variables maximum reflectivity, maximum top of the convective cells, height of maximum reflectivity and the maximum height of reflectivity of 45 dBZ are analyzed. The results showed that 98.6% of the maximum reflectivity values in the storms exceeded 45 dBZ, and that 99.7% of the cases analyzed exceeded 8 km in height from their peaks, which demonstrates the intensity that characterizes Severe Local Storms in Cuba under a tropical and insular environment.

Keywords: Radar observations, Severe Local Storms.

*Autor para correspondencia: Alis Varela de la Rosa. E-mail: alis.varela@insmet.cu

Recibido: 30/10/2024

Aceptado: 01/01/2025

Conflicto de intereses. declaramos, no tener ningún conflicto de interés

Contribución de los autores: Concepción de la idea: Alis Varela de la Rosa y Rafael T. Valdés Alberto. **Manejo de los**

datos: Alis Varela de la Rosa y Rafael T. Valdés Alberto. **Análisis de los datos:** Alis Varela de la Rosa, Rafael T. Valdés

Alberto. **Investigación:** Alis Varela de la Rosa, Rafael T. Valdés Alberto y Elier Pila Fariñas. **Metodología:** Alis Varela de la

Rosa y Rafael T. Valdés Alberto. **Supervisión:** Alis Varela de la Rosa Rafael T. Valdés Alberto y Elier Pila Fariñas.

Validación de los resultados: Alis Varela de la Rosa y Elier Pila Fariñas

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/)

INTRODUCCIÓN

Las tormentas son perturbaciones atmosféricas de carácter local que dan lugar a intensas descargas eléctricas y que normalmente van acompañadas por precipitaciones y vientos intensos (OMM, 1966). Así mismo, se manifiestan por una masa nubosa central llamada celda que es una entidad dinámica caracterizada por una región donde se dan fuertes corrientes ascensionales cuyos radios oscilan habitualmente entre los 5 y 25 km (Browning, 1977). Por su parte, Byers & Braham (1948) plantean que en las nubes de tormentas hay unidades de convección claramente identificables denominadas “celdas de tormentas”. Cada una de estas celdas tiene su propio ciclo de vida y propiedades que actúan con otras celdas circundantes y el ambiente que le rodea.

La estructura de estas celdas convectivas puede ser bastante variable y por ello se han realizado varias clasificaciones que atienden a criterios muy generales, basada en las informaciones aportadas por los radares meteorológicos. En esta idea, específicamente a partir de los valores de reflectividad (Z), las celdas convectivas según Fraile et al. (2001) pueden dividirse en:

- a. Tormenta unicelular: cuando existe un contorno de reflectividad (Z) ≥ 45 dBZ, durante un tiempo de más de 5 minutos.
- b. Tormenta Multicelular: en este caso existen dos o más contornos de Z ≥ 45 dBZ con una duración superior a 5 minutos.
- c. Supercelular multicelular: cuando hay dos o más contornos de Z ≥ 45 dBZ y con una duración superior a 50 minutos.
- d. Supercelular (unicelular): existe un contorno de Z > 45 dBZ, con una duración superior a 50 minutos.

En 1965, Browning definió que las celdas convectivas, además de las etapas de crecimiento, desarrollo y disipación que cada una tiene en su ciclo de vida, pueden tener una cuarta etapa que denominó “madurez severa”. De forma general se puede decir entonces que, las tormentas eléctricas son nubes de convección profunda, que pueden presentar severidad o no, en dependencia de las características de las corrientes ascendentes y descendentes, pero también de cómo interactúen entre ellas y con su entorno (Aguilar et al, 2007). En Cuba, el Instituto de Meteorología (INSMET) considera una Tormenta Local Severa (TLS), según la definición propuesta por Alfonso (1994), a toda tormenta local, generalmente eléctrica, que presenta uno o varios fenómenos severos tales como tornado, granizo de cualquier tamaño, turbonada con rachas de vientos lineales de 25 m/s o más (90 km/h), y/o tromba marina.

El rápido desarrollo de las tormentas es una de sus características más notables, lo que, unido a su alta frecuencia y sus efectos negativos en el

orden socioeconómico cuando tienen asociado algún evento severo requieren detallados estudios. Pues las condiciones de formación y desarrollo de las tormentas son muy complejas, por lo que es difícil encontrar (de acuerdo con la sensibilidad, densidad y resolución de los sensores) características comunes de fácil identificación y con tiempo suficiente como para poder realizar un efectivo pronóstico con una alta probabilidad de éxito. En este sentido, el radar meteorológico es una de las mejores herramientas para ellos, pues puede proporcionar datos dentro de las tormentas de forma casi instantánea, pero también constituye sin lugar a dudas un apoyo indispensable para la vigilancia, seguimiento y estudio de las estructuras de precipitación (Hong y Gurley, 2014).

A partir de la información de los radares convencionales se han desarrollado una serie de técnicas para identificar la potencialidad de ocurrencia de TLS, específicamente granizadas y vientos fuertes. En este sentido, Briliov & Gashina (1984), aseguran que para las nubes cúmulos con peligro de tormenta, las mejores manifestaciones posibles a obtener se revelan por las siguientes variables radáricas:

- a. Hmax (Tope): Altura máxima de la frontera del radioeco.
- b. H (Z): Perfil vertical de reflectividad (en función de la altura)
- c. H (Zmax): Altura de la máxima reflectividad.
- d. Zmax: Máximo valor alcanzado por la reflectividad.
- e. Hz45: Altura de la reflectividad de 45 dBZ

El Instituto de Meteorología de Cuba dispone de una red de radares modernizados de banda S a lo largo de todo el archipiélago con el objetivo de monitorear y darle seguimiento a la evolución de las tormentas y precipitaciones. Partiendo de esta red, Gamboa et al. (1993), confeccionaron la metodología del Complejo Radárico para la Información de Lluvia Localizada (CRAILL) con vista a vincular éste al trabajo operativo en la cual, entre otras cosas, se exponían varios criterios empíricos para identificar la posibilidad de ocurrencia de Fenómenos Meteorológicos Potencialmente Peligrosos (FMPP). Entre los criterios se hacía énfasis en la magnitud de 8 km de altura del tope y/o 45 dBZ como máxima reflectividad absoluta, así como algunas configuraciones de ecos, tales como líneas de ecos convectivos con ondulaciones, región de ecos débiles y presencia de ganchos o dedos. Tales propuestas tuvieron como inspiración las experiencias personales y los criterios emitido por Donaldson (1965). Después de la salida del CRAILL, se establecieron tales magnitudes como parte de los indicadores radáricos de FMPP del servicio operativo radárico nacional; aunque dicha metodología no ha sido sistemática y rigurosamente aplicada, los resultados no dejan de ser alentadores.

El conocimiento de la estructura que tienen las diferentes celdas convectivas y sus características es importante, pues hay que tener en cuenta que, al ser de carácter local, cada celda presenta características bastantes diferentes de unos lugares a otros, y estas diferencias se incrementan cuando tienen asociadas eventos severos, donde los factores locales juegan un papel importante. Debido a los insuficientes conocimientos sobre las características de las tormentas generadoras de fenómenos severos bajo un ambiente tropical y insular en Cuba, se realiza este estudio que tiene como objetivo caracterizar las celdas que generan Tormentas Locales Severas en el archipiélago cubano mediante observaciones de radar.

MATERIALES Y MÉTODOS

En esta investigación los casos de estudio partieron de la tabla de reportes de Tormentas Locales Severas (TLS) confeccionada por el Centro de Pronóstico del Tiempo de Cuba. A partir de dichos reportes distribuidos a lo largo de todo el territorio nacional se procedió a la búsqueda de las observaciones de radar disponibles y almacenadas por el Centro de Radar de Camagüey, encontrándose 630 casos de reportes de eventos severos en el país en el periodo 2010 y 2021, que disponían de información radárica confiable.

De los 630 casos de estudio, 327 correspondieron a casos donde estuvieron presentes granizos, 125 casos a aeroavalanchas, 33 casos de tornados y 3 casos de trombas marinas. Además, correspondió en 122 casos a reportes donde estaba presente tanto granizo y aeroavalancha en la misma localidad. La muestra analizada se considera significativa desde el punto de

vista estadístico y, por otra parte, con características muy diferentes de unos elementos a otros, lo que les da validez a los resultados.

Para el estudio de casos se consideraron todas las celdas de tormentas que se registraron en el área y tiempo de estudio, a partir de las cuales se seleccionó la que estaba asociada a la actividad severa. Para cada una de estas tormentas se determinaron una serie de variables radáricas en el momento de máximo desarrollo, ya que según lo planteado por **Byers & Braham (1948)**, “la severidad en una nube convectiva se presenta al final de la etapa de madurez y momentos antes de iniciarse la etapa de disipación”. Las variables radáricas analizadas fueron: tope máximo, reflectividad máxima, la altura de la reflectividad máxima y la altura hasta donde se localizaba la reflectividad de 45 dBZ. En la **tabla 1** se expone una pequeña descripción de las diferentes variables radáricas analizadas en la investigación.

Acerca de la Red de Radares Meteorológico del INSMET

Cuba cuenta con 8 radares convencionales, todos automatizados, posicionados a lo largo del territorio nacional lo que permite la posibilidad de monitorear todo el archipiélago cubano (**figura 1**). Los radares utilizados en esta investigación fueron: Casablanca (La Habana), Pico San Juan (Cienfuegos), Punta del Este (Isla de la Juventud), Camagüey, Holguín, Pilon (Granma) y la Gran Piedra (Santiago de Cuba). Estos radares son del tipo MRL-5M de manufactura rusa, modernizados, que cuenta con los parámetros técnicos que se relacionan en la **tabla 2**.

Tabla 1. Breve descripción de las variables radáricas utilizadas en la investigación.

| Nombre | Simbología | Definición | Unidad de Medidas |
|--|------------------|---|-------------------|
| Reflectividad Máxima | Z _{máx} | Reflectividad máxima en la columna entre 1500 y 20000 m | dBZ |
| Altura del Núcleo de Máxima Reflectividad | H _{máx} | Altura a la que se alcanza Z _{máx} | Km |
| Altura del Núcleo de Máxima Reflectividad | TM | Altura a la que se alcanza Z _{máx} | Km |
| Altura máxima de las reflectividades de los 45 dBZ | H45 | | Km |

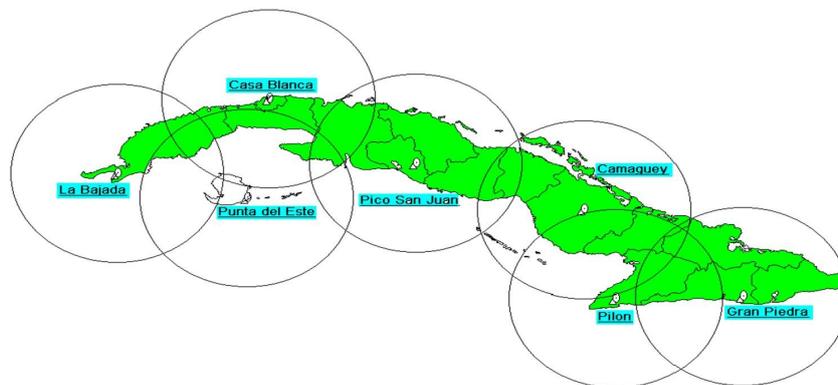


Figura 1. Ubicación geográfica de los radares en Cuba y sus radios de acción.

Tabla 2. Parámetros técnicos de todos los radares MRL-5M.

| PARÁMETRO | MAGNITUD |
|-----------------------|----------|
| Potencia transmitida | 500 kw |
| Potencia recibida | -136 dB |
| Longitud del pulso | 2.0 μs |
| Longitud de onda | 10 cm |
| Resolución Horizontal | 300 m |
| Resolución Temporal | 10 min |

Tabla 3. Clasificación de las tormentas de la muestra según su estructura.

| Tipos de tormentas | Números de casos | % |
|--------------------|------------------|------|
| Unicelular | 230 | 36.5 |
| Multicelular | 261 | 41.4 |
| Línea de tormentas | 139 | 21.6 |

Fueron utilizados estos radares siempre considerando que los casos seleccionados en la investigación se localizaran dentro de los radios óptimos de dichos radares, los cuales oscilan entre 110 y 150 km. También se tuvo en cuenta que la resolución temporal de las observaciones fuera de 10 min, tratando de ver la evolución de las tormentas y caracterizar mejor su máximo desarrollo. Para el procesamiento de estas observaciones se utilizó el software Vesta Proceso en su versión 5.3.19.4.

RESULTADOS

Hoy en día el radar meteorológico constituye una de las herramientas principales para el pronóstico a muy corto plazo. La búsqueda de patrones o configuraciones radáricas continúa siendo aún la vía fundamental para el establecimiento de metodologías de diagnóstico acertadas.

Al aplicar a las tormentas generadoras de eventos severos seleccionados en esta investigación los criterios de clasificación antes señalados, se encontró que de las 630 tormentas analizadas durante el periodo 2010 - 2021, la gran mayoría de ellas obedecía a estructuras que pueden ser consideradas, en primera consideración como sistemas cerrados. Los eventos

severos aparecen inmersos en sistemas convectivos preferentemente donde estaba presentes varias celdas, específicamente el 41.4 % se encontraban dentro de un patrón de multicelda, lo que pone de manifiesto el papel que juega la interacción dinámica de las diferentes celdas que la conforman con su entorno (Gamboa, 2004). Por otro lado, el 21.6 % las tormentas generadoras de eventos severos estaban inmersas en líneas de tormentas, mientras el 36.5 % constituían celdas aisladas.

En el caso de las líneas de tormentas, casi siempre se encontraron orientadas paralelas a las costas, hacia el interior del archipiélago, lo que estaba favorecida por la influencia del sistema de brisa de mar de ambas costas en horas de la tarde. La presencia del frente de brisa de mar, fue incluso observado en las propias observaciones de radar (dos ejemplos aparecen en la figura 2), favoreciendo posteriormente el origen de celdas convectivas de gran desarrollo en su borde delantero. Esto coincide con Carnesoltas (2002), quien planteó que los sistemas de brisas bien definidos, en especial la brisa de segunda especie, actúa como elemento disparador de la convección en un entorno condicionalmente inestable prácticamente todos los días del año y que, en presencia de cizalladura vertical, puede dar origen a actividad severa. Por otra parte, Houze (1993) expresó que los principales mecanismos de disparo de la convección es el forzamiento orográfico, ya que la orografía puede causar desviaciones del flujo del viento en superficie y niveles bajos, formando líneas de convergencia que facilitan el levantamiento de la parcela de aire (Watanabe & Ogura, 1987).

Otro de los elementos encontrados en el análisis a través de las observaciones de radar fue la presencia de frentes de rachas de tormentas en disipación que contribuyeron a la formación de nuevas tormentas (figura 3). Esto coincide con lo encontrado por Carnesoltas (2002) y Varela (2017), quienes exponen que el frente de brisa de mar junto a los frentes de rachas de tormentas ya desarrolladas en su interacción con otras estructuras coherentes en la mesoescala

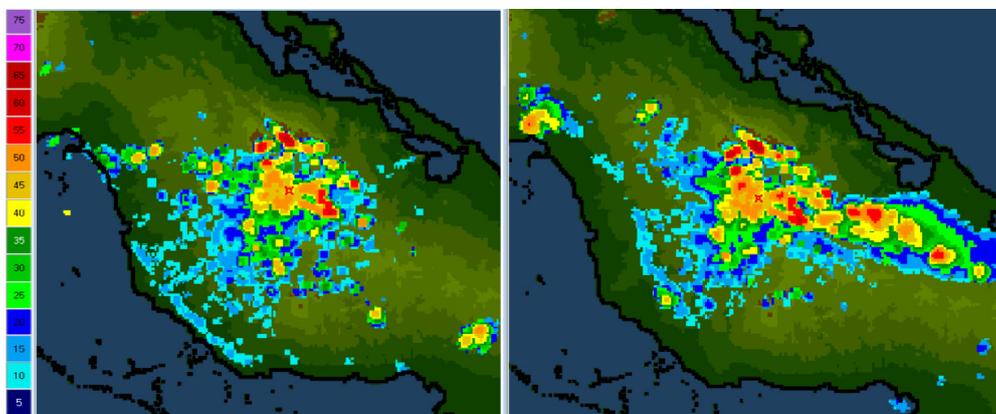


Figura 2. Observaciones del radar de Camagüey de los días 29 de junio de 2020 a las 3:20 horas (izquierda) y 27 de mayo de 2020 a las 16:00 horas (derecha).

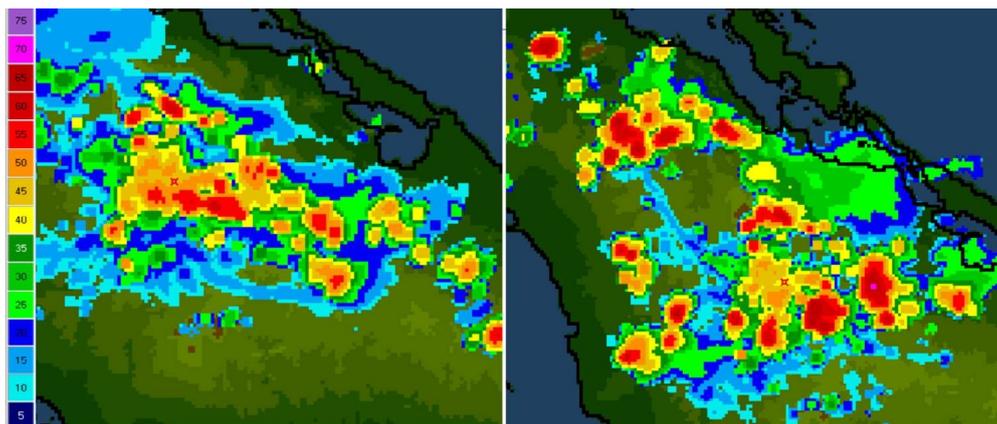


Figura 3. Observaciones del radar de Camagüey de los días 1ro de septiembre de 2021 a las 7:00 horas (izquierda) y 14 de julio de 2015 a las 15:30 horas (derecha).

conduce al desarrollo vertical de la nubosidad en el borde delantero de estas superficies de discontinuidad. Se verificó como las corrientes descendentes frías de las primeras tormentas pudieron moverse con sus frentes de racha (Fr) en superficie hacia el tercer o cuarto cuadrante, y con ello influir más tarde en el inicio de otras tormentas, las que, a su vez, pudieron interactuar con el Fbm. Esta situación permite que dos o más picos de actividad convectiva esten presentes en el horario vespertino

Comportamiento de las variables radáricas

La reflectividad máxima (la que constituye un indicador directo del tamaño y concentración de las partículas de precipitación dentro de la nube) observada en los casos analizados de tormentas que estuvieron asociadas con eventos de severidad mostró una gran dispersión en sus valores, aunque el 98.6 % de los casos los valores de reflectividad estuvieron por encima de 45 dBZ. Este criterio fue propuesto por Donaldson (1965) como un indicador de potencialidad de tormentas y establecida por Gamboa et al. (1993) en el CRAIL, como indicativo para el pronóstico de fenómenos meteorológicos potencialmente peligrosos, coincidiendo también con lo encontrado por Acosta & Martínez (2006).

Los datos obtenidos de reflectividad máxima en la muestra de estudio presentaron un rango entre 40 y 70 dBZ, con una mediana de 56 dBZ (tabla 4), la que es muy similar a la encontrada por Gamboa et al. (2008). Específicamente el 76.2 % de la muestra presentaba valores entre 52 y 60 dBZ (figura 4 izquierda). Esto pese a la dispersión

encontrada en la variable permite demostrar que las tormentas analizadas y vinculadas a eventos severos están asociadas con fuertes corrientes ascendentes, con una organización favorable para el desarrollo de partículas grandes y para la conversión de masa de vapor de agua en precipitación. Estos cambios de fase de agua pueden liberar gran proporción de calor latente sobre una región limitada, lo cual contribuye significativamente a la flotabilidad de la nube y a elevar su tope. La persistencia de estas características sugiere un patrón organizado de convección Gamboa et al., (2008).

Los valores de fuertes reflectividades, superiores a los 68 dBZ, coincidieron mayoritariamente con granizos y aeroavalanchas, observándose en la figura 5 dos ejemplos de estos casos. Esto evidencia las intensidades de las corrientes ascendentes en las nubes capaces de sostener grandes piedras de hielo durante un largo periodo hasta la formación del granizo.

Por su parte, los topes de las celdas analizadas reflejaron igualmente una gran dispersión, encontrándose tormentas que llegaban a alturas de solo 5 km, pero otras superaban la tropopausa alcanzando los 20 km (tabla 4). Sin embargo, el 99.7 % de las tormentas tenían topes superiores a los 8 km de altura, valor que constituye según Gamboa et al. (1993) umbral para eventos severos. En la figura 6 aparecen dos ejemplos de tormentas con topes que alcanzaron los 20 km.

Del total de tormentas generadoras de eventos severos se encontró que el 81.9 % de ellas tenían topes entre 12 y 18 km (figura 4 derecha), lo que sigue demostrando la gran intensidad de las tormentas

Tabla 4. Descripción estadística de las diferentes variables radáricas analizadas en la investigación.

| | Rango | mediana | moda | Desviación estándar |
|--------------------|---------|---------|------|---------------------|
| Zmax | 40 - 70 | 56 | 52 | 4.9 |
| H _z max | 1 - 12 | 5 | 5 | 1.6 |
| tope | 5 - 20 | 15 | 15 | 2.6 |
| H ₄₅ | 4 - 17 | 10 | 12 | 2.7 |

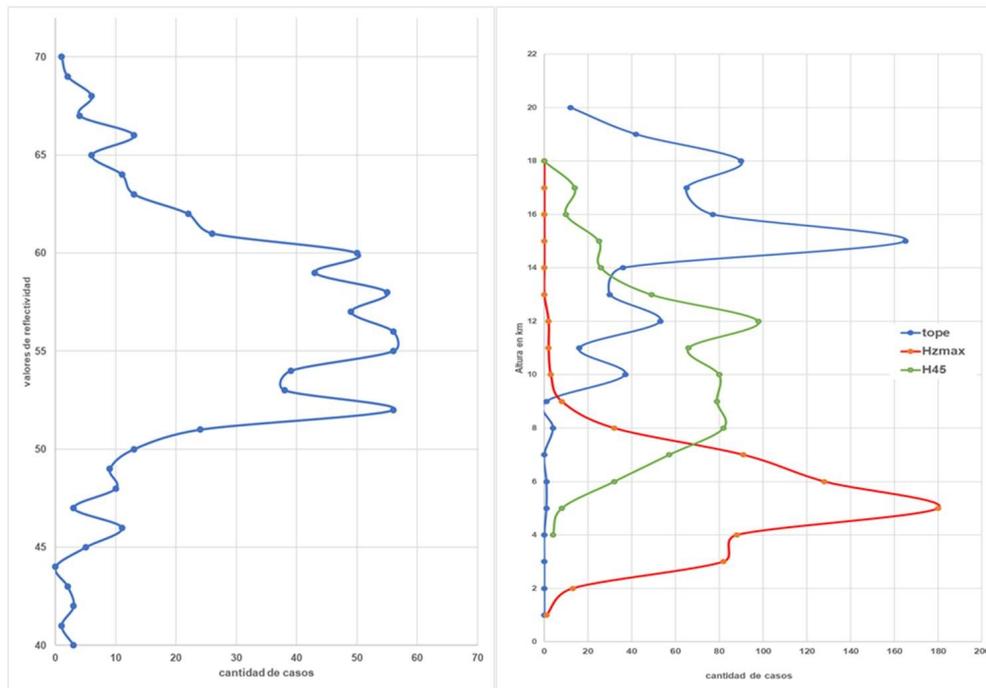


Figura 4. Distribución de la altura de los topes máximos (derecha), así como de la altura de la máxima reflectiva, de los 45dBZ y de los valores de reflectividad (izquierda) de las tormentas asociadas eventos severos.

estudiadas. Ya que esta variable, es un indicador del grado de desarrollo de la convección o medida indirecta de la intensidad de las corrientes ascendentes que pueden mantener, en mayor o menor medida, a grandes masas de partículas líquidas y/o sólidas en altura, pero en consecuencia de fuertes corrientes descendentes.

Según Alfonso & Córdoba (1987) y Córdoba & Alfonso (1992) las nubes de más de 15 km de altura de tope (valor que resultó la mediana de la muestra), aquellas que en teoría superan la tropopausa, se relacionan con aeroavalanchas y granizos, lo cual se pudo verificar en esta investigación, pues entre los casos analizados, 286 tormentas superaron el umbral antes mencionado, de los cuales 271 correspondían a casos de granizos, aeroavalanchas o la combinación de ambos eventos.

Otra de las variables investigadas en este estudio fue la altura de la máxima reflectividad (H_{máx}), lo que expresa la intensidad y persistencia de las corrientes verticales. En este caso se encontró que esta variable oscilo entre 1 y 12 km (tabla 4), encontrándose el 90.3 % de la muestra con la máxima reflectividad entre 3 y 8 km (dos ejemplos aparecen en la figura 5), siendo la mediada de la muestra de 5 km. Los casos donde esta variable mostró los valores más elevados de 12 km, correspondían a tormentas con topes muy elevados que superaban los 18 km de altura. Ecos tan fuertes en el aire sólo puede significar que una corriente ascendente extremadamente potente ha levantado y condensado una cantidad considerable de precipitación en el aire

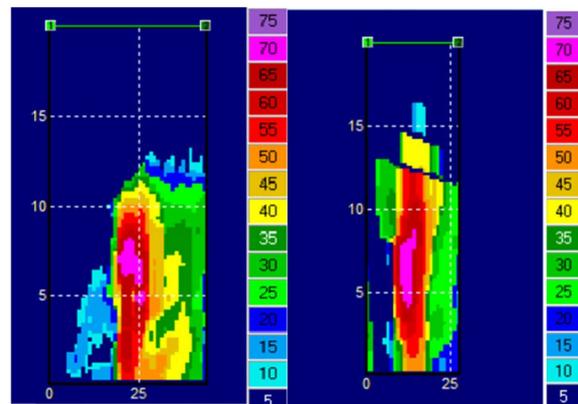


Figura 5. Corte vertical de observaciones de radar correspondiente a los días 15 de mayo de 2011 (izquierda) y 14 de julio de 2015 (derecha) asociadas a tormentas que generaron aeroavalanchas y granizos, respectivamente.

En ellas los costes se observa valores de máxima reflectividad de 70 dBZ a alturas entre 3 y 8 km de altura.

a temperaturas lo suficientemente frías como para que sea probable la formación de granizo, granizo que pronto caerá cuando el núcleo de reflectividad comience a descender. También es capaz de traer consigo una fuerte corriente descendente cuando desciende, posiblemente resultando en fuertes vientos localizados en la superficie (Fabry, 2015).

En el caso de la altura máxima donde se localizaba las reflectividades de los 45 dBZ (H₄₅) igualmente que en el resto de las variables presentadas en esta investigación también se evidenció una gran dispersión (figura 4 derecha). Esta variable se comportó en las tormentas analizadas entre 4 y 17 km.

Sin embargo, 462 tormentas, lo que representa el 73.3 % se encontraban entre 7 y 12 km. En este caso la mediana de la muestra fue de 10 km, con una desviación estándar de 2.7. Esta variable igualmente es otra señal tradicional de una tormenta con una corriente ascendente particularmente fuerte.

Análisis individual de los diferentes eventos severos

Se muestran en las tablas 5, 6, 7 y 8 los estadígrafos de las diferentes variables radáricas analizadas en esta investigación para cada uno de los fenómenos severos. En este caso, no se consideraron los eventos de trombas marinas debido a que eran muy pocos los casos de estos fenómenos a analizar (3 casos), lo que no iba dar resultados realmente concluyentes.

En el caso de los valores de reflectividad máxima encontrada para cada uno de los eventos severos se puede ver una gran dispersión en sus rangos, encontrándose desviaciones estándar bastante pequeñas, sobre todo para las variables de TM, Hmáx y H45 (tabla 5). Sin embargo, en los valores de la mediana, los tornados presentaron los valores más altos y las trombas en la altura las más bajas. En este caso, aunque hay que recordar que estos valores son en el momento de máximo desarrollo de cada

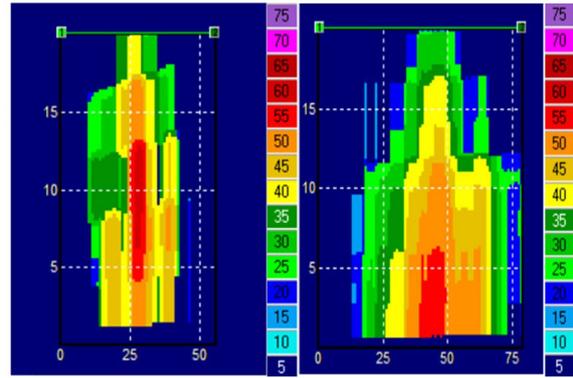


Figura 6. Corte vertical de observación de los días 11 de julio de 2010 y 9 de julio de 2013 donde se observa las nubes de tormentas con topes cercanos a los 20 km, además de valores de 45 dBZ que superan los 15 km.

una de las tormentas, hay que considerar que el vórtice que caracteriza a los tornados, contribuyó adicionalmente al desarrollo de la celda convectiva, lo que anteriormente ya planteaba Varela (2017). Por otro lado, se observa una similitud en los rangos de los casos de granizos y aeroavalanchas, incluso en los casos analizados donde estaban presentes conjuntamente ambos eventos.

Tabla 5. Descripción estadística de los valores de reflectividad de las tormentas asociadas a los diferentes eventos severos.

| | Zmáx | | | | |
|---------------------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | granizos | AA | tornado | TA | GR+AA |
| Rango | 40 - 70 | 40 - 68 | 45 - 66 | 42 - 64 | 43 - 69 |
| mediana | 56 | 56 | 58 | 54.5 | 56 |
| moda | 55 | 55 | 58 | 52 | 57 |
| Desviación estándar | 4.9 | 5.0 | 5.0 | 5.8 | 4.7 |

Tabla 6. Descripción estadística de la altura del tope de las tormentas asociadas a los diferentes eventos severos.

| | TM | | | | |
|---------------------|----------|--------|---------|--------|--------|
| | granizos | AA | tornado | TA | GR+AA |
| Rango | 9 - 20 | 6 - 20 | 8 - 19 | 5 - 20 | 8 - 20 |
| mediana | 15 | 15 | 14 | 15 | 15 |
| moda | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Desviación estándar | 2.3 | 2.8 | 2.6 | 3.8 | 2.8 |

Tabla 7. Descripción estadística de la altura de la máxima reflectividad de las tormentas asociadas a los diferentes eventos severos.

| | Hmáx | | | | |
|------------|----------|--------|---------|-------|--------|
| | granizos | AA | tornado | TA | GR+AA |
| Rango | 2 - 12 | 2 - 10 | 2 - 8 | 1 - 9 | 2 - 17 |
| mediana | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 |
| moda | 5 | 6 | 5 | 3 | 5 |
| desviación | 1.6 | 1.7 | 1.4 | 1.8 | 1.6 |

Tabla 8. Descripción estadística de la altura de los valores de 45 dBZ de las tormentas asociadas a los diferentes eventos severos.

| | H45 | | | | |
|---------------------|----------|--------|---------|--------|--------|
| | granizos | AA | tornado | TA | GR+AA |
| Rango | 5 - 17 | 4 - 17 | 6 - 15 | 4 - 17 | 4 - 17 |
| mediana | 10 | 10 | 10 | 8.5 | 10 |
| moda | 12 | 10 | 12 | 8 | 12 |
| Desviación estándar | 2.6 | 3.0 | 2.6 | 2.8 | 2.7 |

En el caso de los topes máximos se observa gran variación en sus rangos en las tormentas analizadas independiente del evento severo en cuestión. A pesar de esto, el valor medio para todos los eventos severos independientemente fue de 15 km de altura (tabla 6), lo que demuestra el desarrollo que logran alcanzar las tormentas en el trópico, bajo condiciones insulares que permiten la formación de eventos severos a lo largo de su desarrollo.

La altura de la máxima reflectividad, aunque igualmente se encontró mucha similitud en los resultados para cada uno de los eventos severos, la mediana de las trombas en la altura estuvo ligeramente por debajo del resto de los fenómenos severos. Lo que igualmente ocurrió para la variable de la reflectividad de los 45 dBZ (tabla 7 y 8).

CONCLUSIONES

Después del análisis de celdas convectivas asociadas a eventos severos mediante observaciones de radar en Cuba entre el 2010 y 2020 se encontró que:

1. La mayor concentración de eventos severos ocurrió dentro de patrones nubosos correspondientes a multiceldas, lo que demuestra la complejidad en la interacción de las diferentes celdas convectivas en su tiempo de vida.
2. Se evidenció en las observaciones de radar la presencia del frente de brisa de mar y de frentes de rachas de tormentas en disipación, los cuales contribuyeron al nuevo desarrollo vertical de la nubosidad en el borde delantero de estas superficies de discontinuidad.
3. Los valores de máxima reflectividad observada en el 98.6 % de los casos fueron superiores a los 45 dBZ, lo que es un indicador de severidad dentro de la actividad convectiva, específicamente el 76.2 % de la muestra presentó valores de reflectividad entre 52 y 60 dBZ. Esto demuestra que las tormentas analizadas y vinculadas a eventos severos tienen fuertes corrientes ascendentes, capaces de soportar grandes cantidades de partículas de agua, granizos y graupel en su interior.
4. Los topes máximos de las tormentas asociadas a eventos severos mostró gran dispersión, aunque el 99.7 % de la muestra superaban los 8 km de altura, llegando hasta topes de 20 km. El 81.9 % de las tormentas analizadas tenían topes entre 12 y 18 km, lo que sigue evidenciando la gran intensidad que caracterizan a las Tormentas Locales Severas bajo un ambiente tropical e insular.
5. La altura de la máxima reflectividad osciló entre 1 y 12 km, sin embargo, en el 90.3 % de los casos analizados estos valores se concentraron

entre 3 y 8 km. Por otra parte, la altura a la que se encontraba los valores de los 45 dBZ osciló entre 4 y 17 km, presentando en el 73.3 % estos valores de reflectividad entre 7 y 12 km.

RECOMENDACIONES

1. Ampliar el análisis de celdas convectivas asociadas a eventos de tromba en la altura.
2. Analizar el comportamiento de la altura de la máxima reflectividad y de la reflectividad de 45 dBZ con la altura de la isoterma de 0 °C.

REFERENCIAS

- Acosta, G. & Martínez, Y. 2006. "Los tornados en la región occidental de Cuba. Configuraciones sinópticas que favorecen su desarrollo y características por radar".
- Aguilar, G., Naranjo, L. & Carnesoltas, M. 2007. "Condiciones a escala sinóptica favorables para la aparición de Tormentas Locales severas en Cuba. Parte I: Período Poco Lluvioso". *Revista Cubana de Meteorología*, vol.15, no.2 del 2009. INSMET.
- Alfonso, A. P. & Córdoba, L. 1987: Los mesociclones del 16 de febrero en las provincias habaneras. *Reporte de investigación*. Insmet Cuba #16, 26 pp.
- Alfonso, A. P. 1994. "Climatología de las tormentas locales severas de Cuba". Cronología. La Habana, Cuba: *Editorial Academia*, 168 p., ISBN: 978-95-902-0060-1, [Consulted: 20 julio, 2023].
- Briliov, G. B. & Gachina. S. B. 1984." Diagnóstico del comportamiento vertical de las nubes en el fondo de una capa nubosa por parámetros de radiolocalización. Radiolocalización Meteorológica". Leningrado 174 -177 pp (en Ruso)
- Browning, K. A. 1965. "The evolution of tornadic storms". *J. Atmos. Sci.*, 22, 664-668.
- Browning, K.A. 1977. "The Structure and Mechanisms of Hailstorms. In: Foote, G.B., Knight, C.A. (eds) Hail: A Review of Hail Science and Hail Suppression". Meteorological Monographs, vol 16. *American Meteorological Society*, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-935704-30-0_1
- Byers, H. R. & Braham Jr., R. R. 1948. "Thunderstorm structure and circulation", *J. Meteorol.*, 5, 71-86.
- Carnesoltas Calvo, M. 2002. "La circulación local de brisa de mar y tierra. Conceptos fundamentales". *Revista Cubana de Meteorología*. Instituto de Meteorología. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Ciudad de La Habana. Cuba. Volumen 9. Número 1. 2002. 39-60 pp.
- Córdoba, L. & Alfonso, A. P. 1992. "Sistemas frontales en el occidente de Cuba". *Revista Cubana de Meteorología* 5 (1) 67 - 82 pp.

- Donaldson, R. J. 1965. "Methods for identifying Severe Thunderstorm by radar: A Guide and bibliography", *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 46, 174 - 193 pp.
- Fabry, F. 2015. "Meteorology and radar in Radar meteorology: principles and practice". *Cambridge Univ. Press*, Cambridge, U.K. vol. ch. 1, pp. 10-25.
- Frailé R., Castro, A., Sánchez, J. L., Marcos, J. L. & López, L. 2001. "Noteworthy C-band radar parameters of storms on hail days in northwestern Spain". *Atmos. Res.* 59-60, 41-61.
- Gamboa, F., Vázquez, W., Rodríguez, O., Pérez, C. & Aroche, R. 1993. "Complejo Radárico Automático para la información de Lluvia Localizada (CRAILL)". [Inédito] *Informe Científico al INSMET*.
- Gamboa, F., 2004. "Selección de indicadores radáricos como productores de severidad". Tesis en Opción al Título Académico de Máster en Ciencias Meteorológicas. Instituto Superior de Ciencias Aplicadas. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, 55 pp.
- Hong, Y. & Gurley, J. 2014. "Radar Hydrology: Principles, Models, and Applications". 1st edition. *CRC Press Taylor & Francis Group*. ISBN 9781466514614. DOI:10.1201/b17921
- Houze, R. A. 1993. "Cloud Dynamics". *International geophysics series*. 539 pp.
- Varela, A. 2017. "Formación de tornados no asociados a superceldas en la región occidental de Cuba". Tesis de Maestría en Ciencias Meteorológicas, La Habana, Cuba.
- Watanabe, H., & Ogura, Y. 1987. "Effects of orographically forced upstream lifting on mesoscale heavy precipitation: A case study". *J. Atmos. Sci.*, 44, 661-675.
- WMO Bulletin Vol. XV, No. 1 - January 1966 <https://library.wmo.int/idurl/4/41586>

Alis Varela de la Rosa. Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.

Rafael T. Valdés Alberto. Centro de Radares INSMET. E-mail: rafael@radares.cmw.insmet.cu

Elier Pila Fariñas. Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba. E-mail: elier.pila@insmet.cu