



Condiciones físico-meteorológicas que favorecieron tres tipos de severidad local el día 29 de abril de 2015

Physical-meteorological conditions that favored three types of local severity on April 29, 2015



CU-ID: 2377/v27n4e01

 Samantha López Hernández^{1*},  Mario Carnesoltas Calvo²

¹Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Cuba.

²Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba.

RESUMEN: Las Tormentas Locales Severas se encuentran dentro de los fenómenos meteorológicos más complejos y de gran impacto debido a su carácter severo y rápida evolución. Seguir indagando en las condiciones que las originan, continúa siendo una necesidad de primer orden. El día 29 de abril de 2015 se produjeron tres tipos de manifestaciones de severidad local en dos sistemas de tormentas en corto período de tiempo en La Habana, región occidental de Cuba, convirtiendo tal situación meteorológica en un caso poco frecuente. El objetivo de esta investigación fue conocer las condiciones físico-meteorológicas que dieron lugar a este evento. Para ello se realizó un análisis a escala sinóptica, mesoescalar y termodinámico de diferentes variables, se tuvieron en cuenta las salidas del Sistema de Modelación de Pronóstico Numérico del Tiempo Rapid Refresh, así como la información de las imágenes desde el satélite meteorológico y el seguimiento por radar. Los resultados mostraron que el lento movimiento de una línea de tormenta eléctrica prefrontal propició la interacción de dos estructuras convectivas (Frente de Brisa de Mar y Rollos Convectivos Horizontales), dando lugar a una línea de tormenta a mesoescala en la costa norte occidental. Como consecuencia de una capa seca en los niveles medios, se produjeron fuertes corrientes descendentes y la caída de granizos. Más tarde, los altos valores de humedad relativa en superficie y su profundización en la columna troposférica, dieron lugar a la lluvia intensa de corta duración en la línea prefrontal.

Palabras claves: aeroavalancha, granizos, lluvia intensa.

ABSTRACT: Severe Local Storms are among the most complex and high impact meteorological phenomena due to their severe nature and rapid evolution. Continuing to investigate the conditions that originate them continues to be a necessity of the first order. On April 29, 2015, there were three types of manifestation local severity in different storms almost simultaneously in La Habana, western region of Cuba, turning the meteorological situation into a rare case. The objective of this research was to know the physical-meteorological conditions that gave rise to this event. For this, was made a synoptic, mesoscale and thermodynamic analysis of different variables, were taken into account the outputs of the Rapid Refresh Weather Numerical Forecast Modeling System as well as the interpretation of the images from the meteorological satellite and radar tracking. The results showed that the slow movement of the prefrontal electrical storm line propitiated the interaction of two structures convective (Sea-Breeze Front and Horizontal Convective Rolls) resulting in a mesoscale line on the north western coast. As consequently, there were strong downdraft favored by a dry layer in the middle levels which caused the hail to fall to the ground. High values of relative humidity in surface and its deepening in the column tropospheric resulted in intense short-term rain in the prefrontal line.

Keywords: downburst, hail, heavy rain.

INTRODUCCIÓN

Cada fenómeno meteorológico que ocurre en la atmósfera presenta características propias y efectos diferentes. Los considerados eventos locales severos asociados a la convección profunda, cuyo desarrollo

depende de algunos factores del entorno en el que se desarrollen, constituyen hoy en día una prioridad para el Instituto de Meteorología. En este caso, se hace alusión a las Tormentas Locales Severas (TLS), fenómeno que pertenece a la mesoescala.

*Autor para correspondencia: *Samantha López Hernández*. E-mail: slopezhernandez1996@gmail.com

Recibido: 19/02/2020

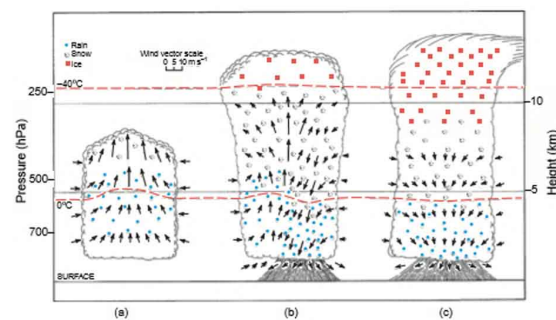
Aceptado: 03/09/2021

Byers & Braham (1948), expresaron que “las tormentas eléctricas (TE) están conformadas por celdas y su duración es de aproximadamente 1 hora”. En la figura 1 se muestran los tres estados fundamentales del ciclo de vida de una TE según estos autores, los cuales son: (a) estado de cúmulo o desarrollo (las celdas contienen únicamente corrientes ascendentes desde la base hasta el tope de la nube); (b) estado de madurez (el rozamiento con el aire de las gotas que caen crean una corriente descendente que coexiste con la ascendente); y (c) estado de disipación (la lluvia se hace más uniforme y su intensidad disminuye en las capas más bajas de la nube, mientras en la altura las corrientes ascendentes son insignificantes), (Byers & Braham, 1948). A dicha clasificación, Browning et al. (1965), agregó la existencia de una celda que dura más que el resto, la cual trae consigo abundante lluvia, a esta celda la denominó “supercelda”. Además, mencionó que se debía adicionar la severidad como parte de la madurez. Posteriormente, Alfonso (1994), para el caso de Cuba, se refirió también al tiempo de duración de las TE en el que “el ciclo de vida de las tormentas simples u ordinarias es corto”.

“Las TLS en Cuba ocurren en cualquier época del año, pero puede identificarse una temporada en que son particularmente frecuentes y que abarca los meses desde marzo hasta septiembre, correspondiendo el máximo absoluto al mes de mayo”. “La inmensa mayoría de TLS se forman en horas de la tarde, una o dos horas después de registrarse la temperatura máxima del día” (Lecha et al., 1994). Se producen exclusivamente por nubes Cumulonimbus (Cb), caracterizadas por descargas eléctricas y en ocasiones chubascos de carácter intenso frecuentemente, no obstante, las TLS no solo se originan por el fuerte calentamiento del día en el período lluvioso, sino se relacionan a sistemas frontales.

De acuerdo a las condiciones del entorno se puede tener una idea del comportamiento de las tormentas locales. Sin embargo, en la atmósfera los procesos físicos nunca se presentan de igual forma, observando siempre alguna diferencia. Según las condiciones del ambiente donde se desarrollen las tormentas, serán las manifestaciones de tiempo severo propias de la convección profunda. Respecto a esto, Carnesoltas (2019) se refirió “al conjunto de los procesos físicos que permiten la ocurrencia de cada uno de los eventos severos, los cuales deben contener en sus términos todas las variables independientes con sus correspondientes interacciones, que son en definitiva, las que tienen lugar realmente en la atmósfera”.

Aguilar et al. (2009), mencionaron que “la ocurrencia de TLS en Cuba está vinculada, por un lado, a sistemas meteorológicos de escala sinóptica, por ejemplo, las ondas tropicales y los huracanes, así como al paso de los Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), una muestra de ello son las Líneas de Tormenta Eléctrica Prefrontales (LTEP). En muchas ocasiones



Byers & Braham (1948)

Figura 1. Ciclo de vida de una tormenta convectiva.

estas líneas van acompañadas de fenómenos de tiempo severo”. Sin embargo, “cada región responde diferente bajo un mismo patrón de escala sinóptica debido a la configuración del flujo y el campo de temperatura en la Capa Fronteriza Atmosférica (CFA), características que determinan las celdas de convección” (Rojas & Carnesoltas, 2017).

Además, se pueden apreciar otros mecanismos físicos que conducen a la formación de una TLS como la interacción de la circulación de brisa de mar en condiciones no continentales y la nubosidad convectiva sobre tierra durante el día, proceso en el que no puede considerarse uno a causa del otro, sino como dos sistemas con un origen común: el calentamiento superficial (Carnesoltas, 2002).

El estudio de caso del 29 de abril de 2015 comprende a uno de los fenómenos del período poco lluvioso en Cuba (noviembre-abril). Se trata del avance de una LTEP la cual, según Alfonso (1985), “al menos una de estas líneas afecta al occidente de Cuba cada año”. Este caso resulta de especial interés debido a que dos sistemas diferentes presentaron la ocurrencia de varias TLS casi simultáneamente en una misma región, la provincia de La Habana, situada en el litoral norte del occidente de Cuba.

La situación meteorológica de ese día estuvo dada por la interacción perpendicular del Frente de Brisa de Mar (FBM) con los Rollos Convectivos Horizontales (HCRs por sus siglas en inglés) orientados meridionalmente, lo cual propició un ascenso forzado, por lo que en primera instancia, se puede asumir la ocurrencia de la segunda condición para la convección profunda, es decir, un mecanismo de levantamiento. La primera condición estuvo asociada al flujo húmedo del sur en el que se desarrollaron los HCRs. De esta manera, en alguna medida, estuvo presente la tercera condición necesaria para la formación de Cúmulo (Cu) intenso, Carnesoltas et al. (2013). “La tercera condición trata del conjunto de procesos que ocurren en los niveles medios capaces de generar fuertes corrientes descendentes llegando a constituir aeroavalanchas, y/o permitir que los granizos lleguen a la superficie antes de derretirse”, (Carnesoltas, 2019). Dichos factores condujeron a la ocurrencia de una brusca liberación de energía que potenció la ocurrencia del tiempo severo

observado en una línea de tormentas convectivas paralela a la costa norte precedente a la LTEP. En esta se produjo la caída de granizos en los municipios de Habana del Este, Regla y Guanabacoa, además de fuertes vientos lineales conocidos como aeroavalanchas con una racha de 27,2 m/s registrada en la estación automática de Casa Blanca, cerca de las 1945 UTC; mientras la LTEP, produjo lluvia localmente intensa de corta duración con 187,6 mm (entre las 2000 y 2300 UTC aproximadamente).

Fuentes de la Dirección de la Defensa Civil Provincial de La Habana informaron a la prensa que a causa de las intensas lluvias se reportaron 3 fallecidos y 27 derrumbes de viviendas entre parciales y totales.

Diversos han sido los trabajos sobre las TLS que han centrado sus aportes significativamente al desarrollo de fenómenos convectivos y de los principales factores que intervienen en su estructura y evolución. Sin embargo, por su gran complejidad, aún son insuficientes los conocimientos referentes a las causas internas de las diversas manifestaciones de tiempo severo en Cuba. Esto constituye la mayor limitación a la hora de elaborar los pronósticos del tiempo relacionados a TLS. Por lo tanto, en la presente investigación se planteó como objetivo: determinar las principales condiciones físico-meteorológicas que favorecieron la ocurrencia de tres eventos de tiempo severo, casi simultáneos, el 29 de abril de 2015.

MATERIALES Y MÉTODOS

Herramientas y variables empleadas

Para la descripción de la situación meteorológica se tomaron del sitio web <http://www.cdc.noaa.gov> los mapas de superficie, 850, 700, 500, 250 y 200 hPa a las 0000, 1200 y 1800 UTC del 29 de abril de 2015 para un área comprendida entre los 10° y 40° N y 60° y 100° W.

Para el análisis de cada variable como la temperatura del aire, la humedad relativa, así como, la dirección y velocidad del viento, se consultaron los reanálisis del NCEP (National Center of Environment Prediction) y del NCAR (National Center for Atmospheric Research). A cada una de ellas se le realizaron cortes verticales sobre la latitud de la estación de Casa Blanca (23,13° N) para determinar la distribución vertical de las mismas. A partir de las variables obtenidas se determinó la altura de la isoterma 0 °C del bulbo húmedo (wbz) por su relación con la formación y caída del granizo, como ha sido demostrado por [Martínez \(2011\)](#). El método llevado a cabo fue el de la interpolación lineal presentada por [Carnesoltas \(2016\)](#), que utilizando leyes y relaciones termodinámicas conocidas llegó a la expresión (1). En este caso, la interpolación se realizó entre 700 y 600 hPa, según los niveles donde se encontró la isoterma 0°C de la temperatura del bulbo húmedo.

$$wbz = h_1 + (h_2 - h_1) \left[\frac{tw_1}{tw_1 - tw_2} \right] \quad (1)$$

Donde h_1 la altura geopotencial del nivel inferior, h_2 la altura geopotencial de nivel superior, tw_1 la temperatura del bulbo húmedo del nivel inferior y tw_2 la temperatura del bulbo húmedo del nivel superior.

Para encontrar el patrón que más se asemejó al día de estudio, se realizó una revisión de los mapas de los 16 patrones sinópticos para el período poco lluvioso, concentrados en tres grupos principales por [Aguilar et al. \(2009\)](#). En la comparación se tuvo en cuenta las características del patrón y las observadas el día 29 a las 0000 UTC alrededor de Cuba.

Se emplearon las imágenes desde el satélite geostacionario GOES-13, en el canal visible con una resolución espacial de 1 km, con el objetivo de identificar el inicio de la convección, la evolución de la misma, así como el desarrollo de los HCRs y el FBM. Dichas imágenes, con una resolución temporal de 15 minutos, se obtuvieron del sitio web www.class.ncdc.noaa.gov. Además, se consultaron las observaciones de los radares de Casa Blanca (La Habana) y Pico San Juan (Cienfuegos) y para su procesamiento se trabajó con el programa Vesta-Proceso, software en su versión 5.3.19.4, desarrollado por especialistas del Grupo de Radares de Camagüey.

Se contaron con las salidas de diagnóstico del modelo numérico del tiempo RAP (Rapid Refresh) operativo en NCEP disponible en <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/rapid-refresh-rap> y se obtuvieron los cortes verticales de humedad relativa tanto longitudinal como latitudinalmente. Además, se elaboraron las cartas pseudoadiabáticas puntualmente para los ecos que presentaron un indicativo de severidad, según el procesamiento de las observaciones de radar. De esta manera se analizó el comportamiento termodinámico de la atmósfera sobre la estación meteorológica de Casa Blanca con el principal objetivo de determinar las posibles causas locales que produjeron los tres tipos de severidad.

Se llevó a cabo el cálculo del número de bulk-Richardson (BRN) y la energía del sistema (ES). El BRN establece la relación entre la inestabilidad no local y el cambio del viento desde la superficie hasta la mitad de la tropósfera según [Stull \(2015\)](#), mientras la energía del sistema caracteriza los tipos de sistemas convectivos y sus relaciones con la cizalladura vertical (ΔM) y la Energía Potencial Disponible para la Convección (CAPE) de acuerdo a [Carbone, et al., 1980](#). Recientemente, ([Carnesoltas & Gutierrez, 2019](#)) rediseñaron el diagrama de energías y la representación del BRN como se muestra en la [figura 2](#).

En resumen, el **método de la investigación** llevado a cabo con el fin de encontrar las posibles causas de cada evento severo asociado al estudio de caso en La Habana, consistió en el análisis integral en base a lo que aportó cada una de las fuentes.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Análisis a escala sinóptica

En los mapas de reanálisis de la NOAA se observó una baja extratropical a las 1200 UTC del 29 de abril de 2015 localizada sobre el centro de la península de la Florida, con valor de 1006,5 hPa de presión central (figura 3a). Dicha baja tuvo un desplazamiento hacia el este, provocando sobre Cuba un flujo del suroeste con aire húmedo y caliente desde el mar Caribe en los niveles inferiores de la tropósfera por delante del frente frío asociado.

A las 1800 UTC el frente frío había presentado poco movimiento sobre el sureste del golfo de México, desarrollándose por delante de él una activa línea convectiva (figura 3b). A esta hora, la línea prefrontal se encontraba muy cercana y al norte de la región occidental. Según los reportes de las manifestaciones de severidad, estos no coincidieron con la influencia de la línea prefrontal, por lo que, se puede inferir que la ocurrencia del tiempo severo en La Habana estuvo dada por factores locales, antes de la llegada de la propia LTEP.

Producto a la baroclinicidad del frente frío en la estructura vertical de la atmósfera, se generó gran inestabilidad en toda la región de estudio, lo que se corroboró con la convección observada en las imágenes desde el satélite en el canal visible. Además, debido a la gran inclinación de la onda con la altura, el frente frío y a la línea prefrontal, tuvieron un lento movimiento sobre el sureste del golfo de México.

Comparación con los patrones sinópticos

Luego del análisis detallado de los patrones sinópticos asociados a eventos severos correspondientes al período poco lluvioso se seleccionó el más semejante al ocurrido. Dicho patrón correspondió al No. 11, perteneciente al Grupo 3, de un total de tres grandes grupos de configuraciones a partir del "ROSET" elaborado por Aguilar et al. (2009). El elemento más significativo de la comparación fue el retraso de la onda

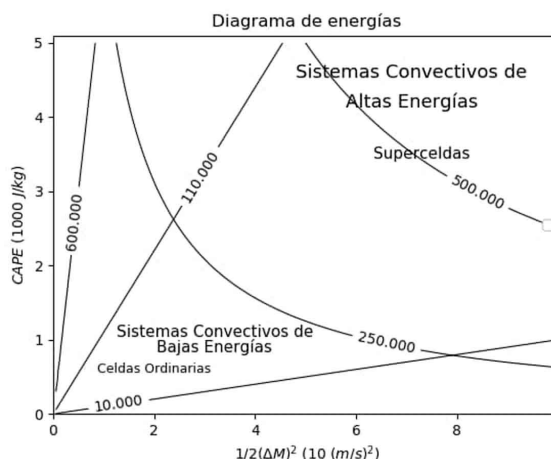


Figura 2. Diagrama de energía según el número de bulk-Richardson (BRN) y la energía del sistema (ES).

en 250 hPa respecto al patrón tomado de referencia (figura 4).

A partir del análisis anterior se pudo plantear que, aunque el patrón encontrado previamente sugiriese la posibilidad de severidad sobre algún territorio del occidente de Cuba, el retraso de la onda polar en el nivel de 250 hPa en el caso que se analiza, provocó el lento movimiento de la LTEP en superficie, retrasando a su vez la influencia sobre Cuba y propiciando que los eventos severos tuviesen lugar, no por las características propias que indica el patrón en un principio, sino por la interacción de factores locales en la región de estudio, en este caso, La Habana.

Interpretación de las imágenes desde el satélite y procesamiento de las observaciones de radar

El día 29 de abril a las 1730 UTC se observaron sobre todo el occidente de Cuba los HCRs orientados meridionalmente resultado del flujo medio predominante del suroeste en los niveles bajos. Mientras, la activa banda prefrontal se localizaba al suroeste del golfo de México, con lento movimiento hacia el este, próxima a La Habana (figura 5a). A las 1845 UTC comenzó a observarse el crecimiento de la nubosidad

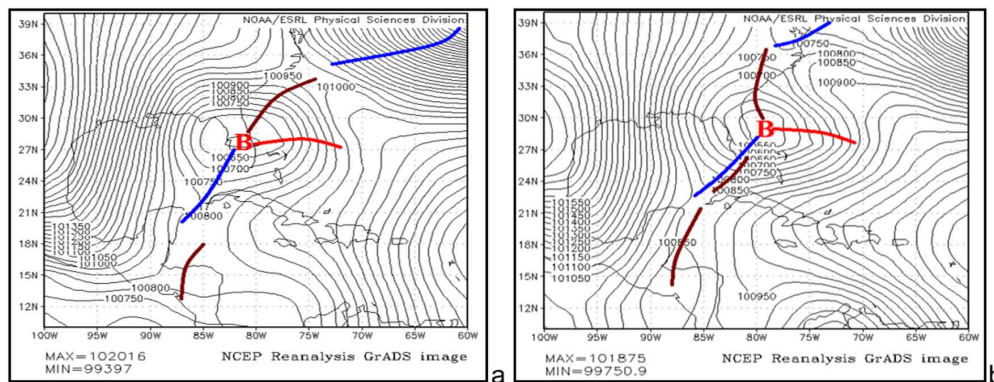


Figura 3. Mapa de superficie del 29 de abril de 2015 a las 1200 UTC (a) y 1800 UTC (b).

convectiva casi paralela a la costa norte de dicha provincia relacionada con la interacción de los HCRs con el FBM que en horas de la tarde favoreció la convección profunda (figura 5b). No obstante, ninguna de estas circulaciones y estructuras coherentes son capaces por sí solas de generar o lograr la convección profunda. Dicha interacción, unido, a las condiciones de inestabilidad generadas por la presencia de la LTEP próxima a la región de estudio, contribuyó al desarrollo convectivo de forma acelerada.

Producto a esta interacción tuvo lugar dos de las manifestaciones de tiempo severo (aeroavalancha y granizos) antes de la influencia de la línea prefrontal, la cual produjo consigo otra manifestación de severidad sobre La Habana (lluvia localmente intensa de corta duración), un pequeño tiempo después.

Se emplearon las observaciones de los radares de Casa Blanca (La Habana) y Pico San Juan (Cienfuegos) y para su procesamiento se trabajó con el programa Vesta-Proceso, software en su versión 5.3.19.4, desarrollado por especialistas del Departamento de Radares de Camagüey.

A partir de las 1900 UTC, a través de las observaciones de radar, se pudo observar núcleos convectivos bien organizados (con reflectividades entre 40 y 55 dBz). Estos se desplazaron desde el noroeste hacia el sureste, formando una estructura convectiva lineal que se extendió a lo largo de la costa norte occidental

(figura 6a). A las 1945 UTC se distinguió un eco de valor de reflectividad de 57 dBz en los 23,4° N y 82,13° W sobre La Habana (figura 6b). En la celda correspondiente a dicho eco, posiblemente se llevó a cabo la severidad (aeroavalancha y granizos).

En el corte vertical realizado a la celda (figura 7) se pudo distinguir que el núcleo de máxima reflectividad se encontraba aislado y elevado, cercano a 9 km, mientras el tope de la celda alcanzó los 18 km.

Posteriormente, el movimiento de varias celdas, una a continuación de la otra, se prolongó hasta las 2300 UTC del 29 de abril de 2015, lo cual se asoció al proceso de lluvia intensa sobre La Habana.

Comportamiento de las variables meteorológicas a partir de los datos de reanálisis

Humedad relativa

Tomando en cuenta la distribución de la humedad relativa en toda la columna troposférica se comprobó que el mayor aporte de esta variable (90 %) correspondió a los niveles más bajos en comparación con el resto de los niveles (figura 8a). Lo anterior fue causa del intercambio turbulento de calor y masa durante el día, lo que provocó el aumento más rápido del espesor de toda la Capa Fronteriza Atmosférica (CFA). La distribución de humedad relativa adoptada,

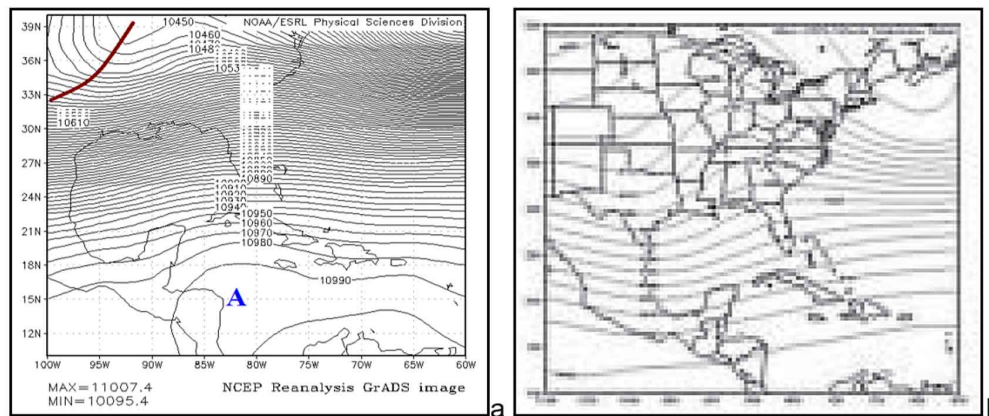


Figura 4. Comparación del mapa de altura geopotencial para el nivel de 250 hPa del día 29 de abril de 2015 a las 0000 UTC (a), con el del patrón No.11 del Grupo 3 para el período poco lluvioso (b).

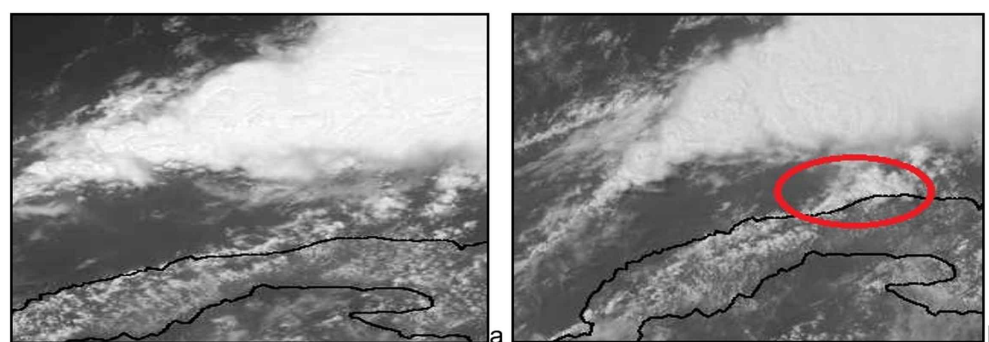


Figura 5. Imágenes desde el canal visible del satélite GOES-13 en la banda visible del 29 de abril de 2015 a la 1730 UTC (a) y a la 1845 UTC (b).

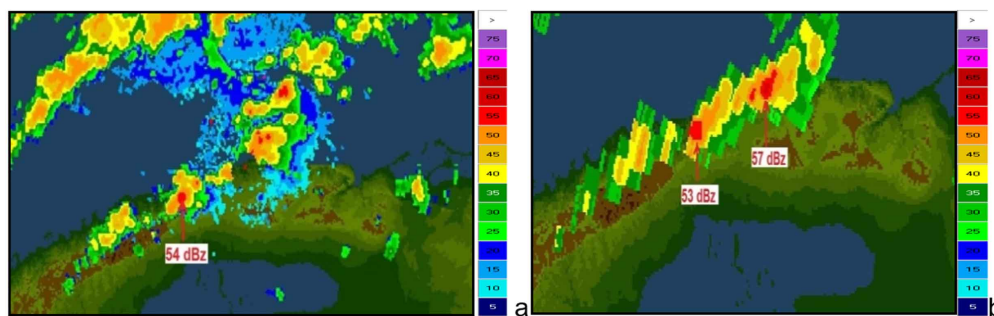


Figura 6. Estructura convectiva lineal paralela a la costa norte a las 1925 UTC observada por el radar de Casa Blanca (a) y celda convectiva de reflectividad máxima (57 dBz) a las 1945 UTC sobre La Habana observada por el radar de Pico San Juan (b).

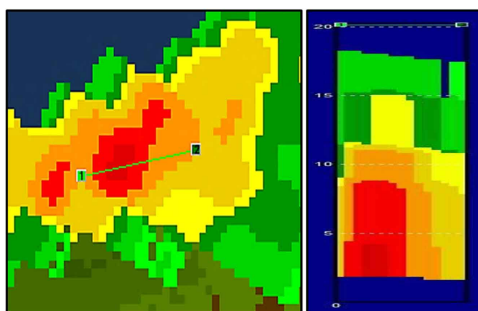


Figura 7. Corte vertical de la ceda que originó la aeroavalancha y la caída de granizos sobre La Habana a las 1945 UTC.

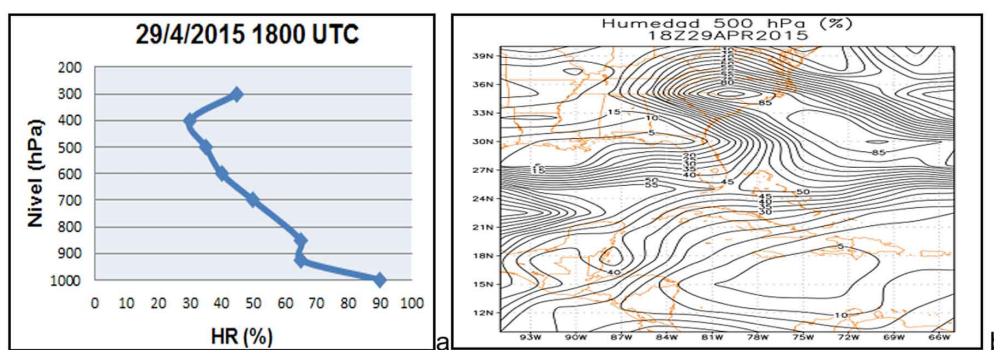


Figura 8. Distribución vertical de humedad relativa (HR) (a) y campo de HR en el nivel de 500 (b) sobre La Habana el 29 de abril de 2015 a las 1800 UTC.

con altos valores en niveles bajos y la disminución de esta en los niveles medios (35-40 %) (figura 8b), se encuentra dentro de las condiciones necesarias para la ocurrencia de actividad severa dentro de las nubes convectivas, según Carnesoltas (2019). La presencia de estas condiciones pudo favorecer la ocurrencia de las aeroavalanchas debido a la sequedad presente en los niveles medios troposféricos lo que coincidió con lo planteado por Aguilar (2006).

Dirección y velocidad del viento

Sobre la región occidental de Cuba, el incremento de la velocidad del viento y su giro desde el suroeste al noroeste con la altura: 850 hPa (5 m/s), 500 hPa (15 m/s) y 200 hPa (25 m/s) indicaron cierta cizalladura vertical del viento en velocidad, la que en cierta medida participó en la organización de las tormentas (figura 9).

Temperatura del aire

Como se puede observar en la tabla 1, el valor de la temperatura en los niveles medios, sobre todo en 500 hPa, se encontró distante respecto a los valores más frecuentes para la formación del granizo los cuales oscilan entre $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Stull, 2015).

En la figura 10 se aprecia un aumento de wbz en todos los horarios, factor que no beneficia el tiempo medio de vida de los granizos durante su descenso. El aumento de wbz durante todo el 29 de abril se debió, fundamentalmente, al humedecimiento de la masa de aire en la tropósfera y a la poca variación de la temperatura en la vertical. En los horarios de afectación de la línea prefrontal (2100, 2200 y 2300 UTC), al estar presente una capa más húmeda, wbz tuvo su máximo valor. Por lo que, la posible explicación para la caída del granizo radicó en el papel que pudo ejercer las fuertes corrientes descendentes de la tormenta sobre las grandes cantidades de granizos dentro de las tormentas presentes.

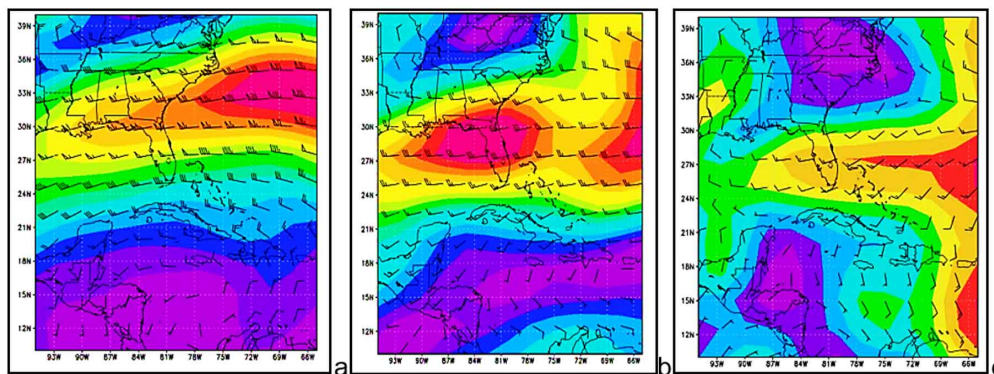


Figura 9. Isotacas (m/s) en 200 (a), 500 (b) y 850 (c) del 29 de abril de 2015 a las 1800 UTC.

Tabla 1. Valores de temperatura del aire (°C) en los niveles medios de la atmósfera el día 29 de abril de 2015 sobre La Habana.

Hora (UTC)/Temperatura (°C)	700 hPa	600 hPa	500 hPa
0600	10,0	3,0	-6,0
1200	9,0	2,0	-6,0
1800	9,0	1,0	-6,0
0000	10,0	2,0	-6,0

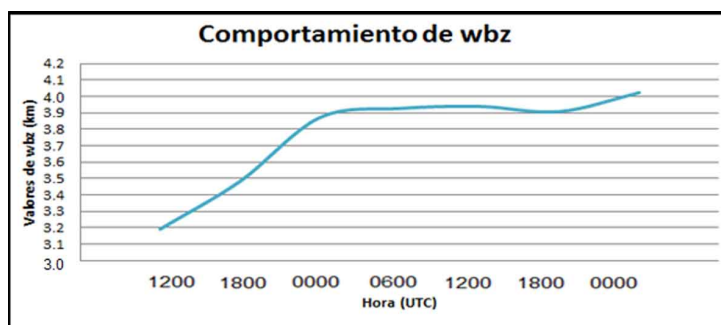
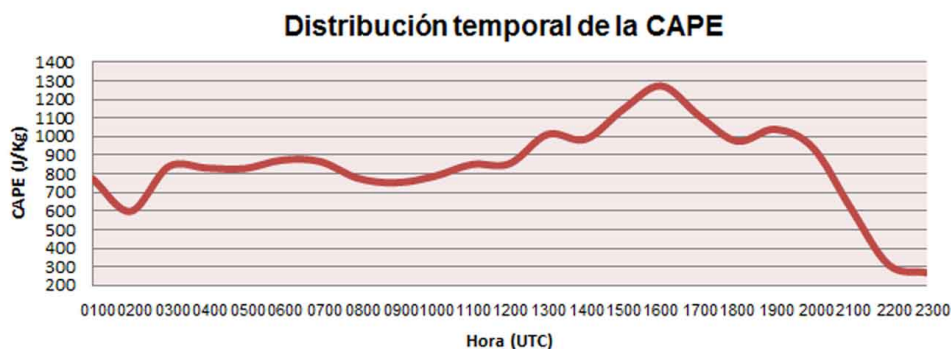


Figura 10. Distribución temporal de la altura de la isoterma de 0 °C del bulbo húmedo (wbz) desde las 1200 UTC del 28 de abril hasta las 0000 UTC del 30 de abril de 2015.



Fuente: RAP

Figura 11. Distribución temporal de la CAPE (J/Kg) en la estación meteorológica de Casa Blanca el 29 de abril de 2015.

Análisis de la Energía Potencial Disponible para la Convección

La evolución de la variable diagnóstico CAPE como se puede observar en la figura 11 mostró que, horas antes a la formación de la línea de tormenta eléctrica paralela a la costa norte (a las 1945 UTC), existían las condiciones necesarias para la convección

profunda, tanto forzada como libre, favorecida por una alta humedad relativa en superficie (90 %). Sin embargo, los HCRs sobre la región de estudio no lograron por sí solos formar este tipo de convección sino, se requirió su interacción con el FBM, unido a otros factores locales. Esta interacción propició el inicio de la convección profunda, forzando a la nube a ascender y superar el Nivel de Convección Libre (NCL).

Número de bulk-Richardson y diagrama de energía

En el diagrama de energías se ubicó el horario más cercano a la severidad local en color amarillo (2000 UTC), el cual mostró que la tormenta se desarrolló en el dominio de bajas energías, propio de la zona tropical. Es decir, a pesar de haber ocurrido tres tipos diferentes de eventos severos, catalogando a la tormenta como intensa, la energía del entorno en el que se desarrolló el sistema no fue elevada. El BRN a esta hora tuvo un valor de 70 y la tormenta presentó bajos valores de cizalladura del viento (figura 12).

Cartas pseudoadiabáticas y cortes verticales

En el ascenso de una partícula de aire por la adiabática saturada, si se encuentra con una capa seca, intercambiará energía con el entorno para poder evaporarse. Una vez cedida la energía del ambiente a la partícula, esta se enfría y por lo tanto su peso específico es mayor, lo que provoca su descenso. Este proceso es conocido como enfriamiento evaporativo, el cual produjo un valor máximo de la corriente descendente de 29,07 m/s (figura 13) y una racha de 27,0 m/s reportada en la estación automática de Casa Blanca (figura 14), a las 1945 UTC. Dichos valores se asociaron a la aeroavalancha y al frente de racha, respectivamente.

En los cortes verticales longitudinales de humedad relativa, la capa seca (entre 30 y 35 %) estuvo próxima a los 500 hPa. Paulatinamente, se movió al sur debido al avance de la prefrontal, que a su vez trasladó la humedad desde los niveles bajos de la atmósfera hacia los niveles medios, favoreciendo de esta manera al proceso de la lluvia intensa sobre varios puntos de La Habana (figura 15). Mientras, en el corte vertical meridional de humedad relativa (figura 16), se observó el brusco transporte húmedo desde niveles bajos hacia los medios de la tropósfera, con valores superiores a los 90 % hasta aproximadamente el nivel de 600 hPa. Dicha condición, junto al lento movimiento de la LTEP, son las que parecen haber propiciado la lluvia intensa de corta duración sobre La Habana.

De forma general, en esta investigación se encontraron las principales condiciones que favorecieron la ocurrencia de tres eventos de severidad local el 29 de abril de 2015. La comparación con el patrón de referencia del “ROSET” no indicó severidad propiamente dicho a escala sinóptica, sino más bien, por factores locales como la interacción del FBM con los HCRs que favoreció la convección profunda, unido a las condiciones en los niveles medios. Posteriormente, el alto contenido de humedad de la propia LTEP, con lento movimiento, favoreció la ocurrencia de la lluvia intensa la cual se presentó en las últimas horas de la tarde del 29 de abril de 2015.

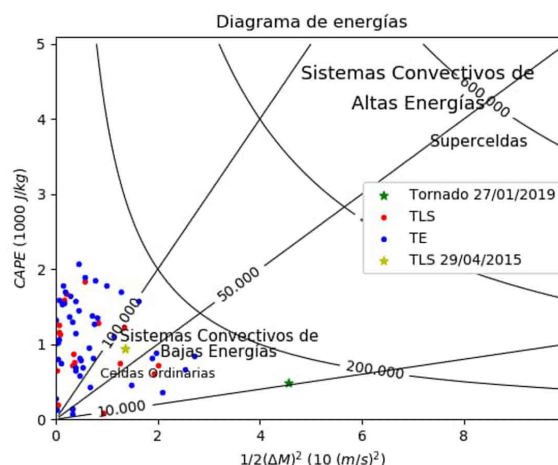
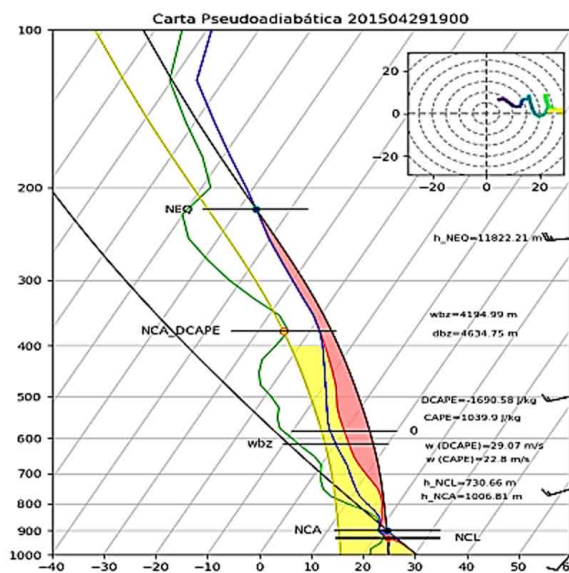


Figura 12. Diagrama de energías. Comparación con una muestra de TE (en color azul) y TLS (en color rojo) en el 2017 y el tornado del 27 de enero de 2019 (en color verde) en La Habana.



Fuente: RAP

Figura 13. Carta pseudoadiabática a las 1900 UTC con CAPE=1039,9 J/kg equivalente a una velocidad vertical de w (CAPE)=22,8 m/s en la coordenada de Casa Blanca.

CONCLUSIONES

Las principales condiciones físico-meteorológicas que favorecieron la severidad local el 29 de abril de 2015 sobre La Habana, se relacionaron con:

Condiciones para la aeroavalancha y la caída del granizo:

- La advección de humedad por el flujo del suroeste en niveles bajos contribuyó a la convección profunda en una línea de tormenta paralela a la costa norte occidental producto de la interacción entre los Rollos Convectivos Horizontales y el Frente de Brisa de Mar. La existencia de una capa seca de 25 % en la posición de la tormenta entre 400 y 500 hPa

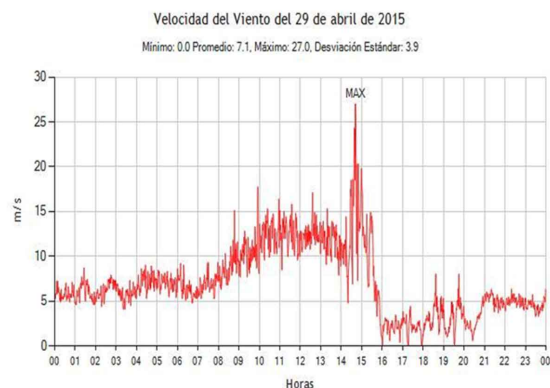
ocasionó la aeroavalancha por enfriamiento evaporativo, transportando, a su vez, los granizos hacia la superficie.

Condiciones para la lluvia localmente intensa de corta duración:

- El alto contenido de humedad a lo largo de la línea prefrontal, su profundización hasta 600 hPa y el lento movimiento al este de varios núcleos convectivos inmersos en la propia línea, unido a bajos valores de la CAPE, indicaron que las corrientes ascendentes no fueron capaces de soportar gran cantidad de agua en la nube, contribuyendo a la intensidad de la lluvia.

Las condiciones necesarias mencionadas para la ocurrencia de la aeroavalancha y la caída de granizos, así como la lluvia intensa de corta duración, coincidieron temporal y espacialmente en una misma región, para ambos casos. Por lo tanto, resultaron condiciones suficientes para que se produjesen los tres eventos severos.

- El retraso de la onda en 250 hPa (con respecto al patrón medio) fue la posible causa del lento movimiento de la prefrontal. Dicho factor contribuyó a que se desarrollara una línea de tormenta eléctrica

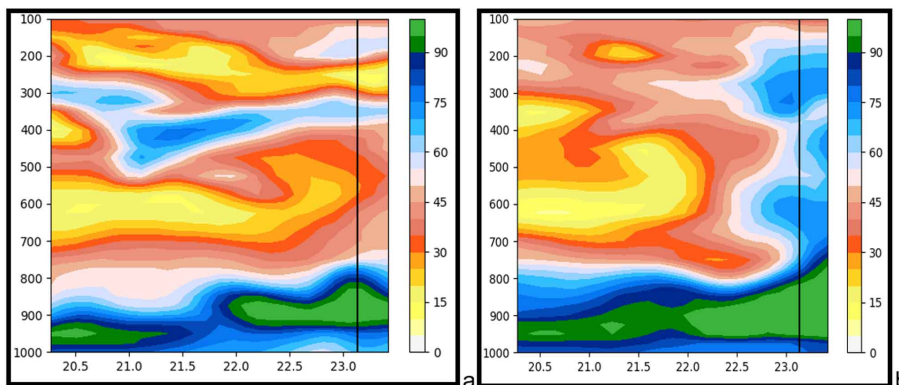


Fuente: registros de la estación automática de Casa Blanca
Figura 14. Velocidad del viento (m/s) el 29 de abril de 2015.

paralela a la costa norte, antes de la influencia de la línea prefrontal.

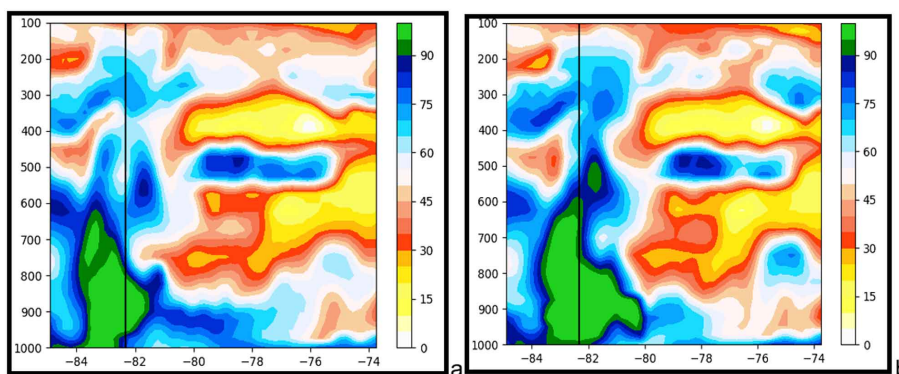
RECOMENDACIONES

Generalizar el análisis con más profundidad para el resto de las provincias occidentales del país donde se reportó severidad local ese mismo día, mediante las salidas de un modelo numérico de mayor resolución en comparación al empleado.



Fuente: RAP

Figura 15. Cortes verticales de la humedad relativa sobre la coordenada de Casa Blanca a las 2000 (a) y 2100 UTC (b) del 29 de abril a longitud fija (83,33° W).



Fuente: RAP

Figura 16. Cortes verticales de humedad relativa sobre la coordenada de Casa Blanca a las 2100 (a) y 2200 UTC (b) del 29 de abril a latitud fija (23,13° N).

REFERENCIAS

- Aguilar, G. 2006. "Condiciones a escala sinóptica para la ocurrencia de aeroavalanchas asociadas a las Tormentas Locales Severas en Cuba. Un esquema para su predicción". Tesis de Doctorado: Instituto de Meteorología, p. 124.
- Aguilar, G.; Carnesoltas, M. & Naranjo, L. 2009. "Condiciones a escala sinóptica favorables para la aparición de tormentas locales severas en Cuba. Período poco lluvioso". *Revista Cubana de Meteorología*, 15(1): 85-108.
- Alfonso, A. 1985. "El brote de tiempo severo en Cuba del 8 de febrero de 1978. Descripción del brote y situación sinóptica". *Ciencia de la Tierra y el Espacio*, 10: 101-114.
- Alfonso, A. 1994. "Climatología de las tormentas locales severas de Cuba. Cronología". Editorial Academia. La Habana, p. 168.
- Browning, K. A. & Atlas, D. 1965. "Initiation of Precipitation in Vigorous Convective Clouds". *Journal of the Atmospheric Sciences*, 22: 678-683.
- Byers, H.R. & Braham, R. R., 1948. "Thunderstorm Structure and Circulation". U.S. Weather Bureau. *Journal of Meteorology*, 5(3): 71-86.
- Carbone, R.; Foote, B.; Moncrief, M.; Gal-Chen, T.; Cotton, W.; Hjelmfel, M.; Raux, F.; Heymsfield, G. & Brandes, E., 1980. "Convective dynamics: Panel report. Chapter 24", p. 391-401.
- Carnesoltas, M. 2002. "La circulación local de brisa de mar y tierra. Conceptos fundamentales". *Revista Cubana de Meteorología*, 9(1): 39-60.
- Carnesoltas, M. et al. 2013. "Factores físicos que influyen en la caída de granizos y en las aeroavalanchas sobre Cuba". Proyecto Ramal: "Los patrones de TLS en Cuba, su relación con la variabilidad climática y elementos a mesoescala que determinan el tipo de severidad". Instituto de Meteorología. La Habana. Cuba.
- Carnesoltas, M. 2016. "Una fórmula lineal para determinar la temperatura del bulbo húmedo". Instituto de Meteorología. La Habana. Cuba.
- Carnesoltas, M. 2019. "Tormentas Locales Severas. Tres condiciones necesarias". *Revista Cubana de Meteorología*, 25(1): 90-97.
- Carnesoltas, M. & Gutierrez, M. 2019. "La energía del entorno donde se desarrolló el tornado del 27 de enero de 2019 en La Habana". *Revista Cubana de Meteorología*, 25(3): 443-447.
- Lecha, L.B.; Paz, L.R. & Lapinel, B. 1994. "El clima de Cuba". Editorial Academia. La Habana, p.186.
- Martínez, Y. 2011. "Condiciones termodinámicas asociadas a la ocurrencia de granizos en Camagüey". *Revista Cubana de Meteorología*, 17(2): 96-104.
- Rojas, Y. & Carnesoltas, M. 2017. "Campos de viento y temperatura a mesoescala en la región oriental de Cuba para la ocurrencia de tormentas locales severas. Estudio de caso". *Revista Cubana de Meteorología*, 23(1): 3-19.
- Stull, R. 2015. "Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science". Department of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences. University of British Columbia, p. 939.

Lic. Samantha López Hernández. Profesora instructor, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (Instec), La Habana, Cuba. E-mail: slopezhernandez1996@gmail.com, samantha.lopez@instec.cu.

Dr. Mario Carnesoltas Calvo. Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología (Insmet), La Habana, Cuba. E-mail: mario.carnesoltas@insmet.cu

Conflicto de intereses: Los autores de este trabajo declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución de los autores: Concepción de la idea: **Mario Carnesoltas Calvo** y **Samantha López Hernández**. Manejo de los datos: **Samantha López Hernández**. Análisis de los datos: **Samantha López Hernández**. Investigación: **Samantha López Hernández**. Metodología: **Mario Carnesoltas Calvo** y **Samantha López Hernández**. Software: **Samantha López Hernández**. Supervisión: **Mario Carnesoltas Calvo**. Validación de los resultados: **Samantha López Hernández** y **Mario Carnesoltas Calvo**.

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/)