

Condiciones a mesoescala que favorecen la lluvia localmente intensa bajo influencia anticiclónica

Mesoscale conditions favoring locally heavy rainfall under anticyclonic influence



CU-ID: 2377/v27n4e03

 Orelvis Valdés-Lorenzo*,  José Manuel Irañeta-Batallán,  Yesenia Arias-Mulet

Agencia de Medio Ambiente, Calle 20 No.4110 esq. 18A, La Habana, Cuba.

RESUMEN: Las precipitaciones localmente intensas afectan directamente a la agricultura; además, interfieren de forma negativa en el transporte, la inmobiliaria y significan la pérdida, en ocasiones, de vidas humanas. Es por ello que en esta investigación se realiza un estudio de casos bajo influencia anticiclónica en toda la columna troposférica, situación que no favorece la ocurrencia de precipitaciones. Se plantea como objetivo principal determinar las condiciones a mesoescala que favorecen la ocurrencia de lluvia localmente intensa durante el período lluvioso en la mitad occidental de Cuba. Para ello se determinó el comportamiento a mesoescala de la temperatura, humedad relativa y el viento, así como la divergencia y movimientos verticales, a partir de las salidas del modelo WRF (*Weather Research and Forecasting*). Para determinar la estructura interna y la evolución de las nubes de tormenta fueron empleadas imágenes de satélite y observaciones de radar. Los casos estudiados se desarrollaron en un ambiente de débil cizalladura vertical del viento desde superficie hasta 6 km de altura, con temperaturas entre -3 y -6°C en 500 hPa; mientras que la humedad relativa presentó altos valores en niveles bajos y una disminución por encima de 700 hPa. Además, predominaron en superficie altos valores de convergencia horizontal antes de la precipitación y fuerte divergencia hacia el horario de la precipitación, con los mayores movimientos ascendentes en 850 hPa. Las celdas convectivas se caracterizaron por ser intensas, presentando bajo eco centroide de máxima reflectividad en el momento de mayor intensidad, lo cual aumentó la eficiencia de la precipitación.

Palabras claves: lluvia localmente intensa, influencia anticiclónica, mesoescala.

ABSTRACT: Locally heavy rainfall directly affects agriculture; in addition, it negatively interferes with transportation and real state and sometimes means the loss of human lives. That is why in this research a study of cases is carried out under anticyclonic influence in the entire tropospheric column, a situation that does not favor the occurrence of precipitation. The main objective is to determine the mesoscale conditions that are conducive for the occurrence of locally intense rainfall during the rainy period in the western half of Cuba. For this, the mesoscale behavior of temperature, relative humidity and wind was determined, as well as divergence and vertical movements, from the outputs of the WRF (*Weather Research and Forecasting*) model. Satellite images and radar observations were used to determine the internal structure and evolution of the storm clouds. The cases studied were developed in an environment of weak vertical wind shear from the surface up to 6 km height, with temperatures between -3 and -6°C in 500 hPa; while the relative humidity presented high values at low levels and a decrease above 700 hPa. In addition, high values of horizontal convergence before precipitation and strong divergence towards the time of precipitation prevailed on surface, with the greatest upward movements at 850 hPa level. The convective cells observed were intense, presenting a low centroid echo of maximum reflectivity at the time of greatest intensity, which increased the efficiency of precipitation.

Keywords: locally heavy rainfall, anticyclonic influence, mesoscale.

INTRODUCCIÓN

Las grandes precipitaciones afectan directamente a la agricultura, particularmente durante las primeras etapas del desarrollo de los cultivos. Además, interfieren de forma negativa en el transporte y sus operaciones aéreas y terrestres, la inmobiliaria y sobre todo significan la pérdida, en ocasiones, de vidas humanas. Es por ello que, en Cuba, hoy en día el pronóstico de la precipitación constituye un factor de primer orden y necesidad.

Los estudios realizados en los últimos años han contribuido a una mejora progresiva en la predicción espacial de la precipitación. Sin embargo, los avances en su pronóstico

cuantitativo no han sido tan efectivos. Tales investigaciones abarcan en su mayoría las situaciones meteorológicas que se desarrollan en la β -macroescala y la α -mesoescala, y no tienen en cuenta aquellas precipitaciones que con similar acumulado ocurren en un lapso menor de tiempo. Se considera lluvia intensa a un acumulado mayor o igual a los 30 mm en una hora de duración, aunque también se pueden escoger los criterios de que es aquella que excede los 100 mm en un período de 24 horas, y la que supera los 50 mm en 12 horas o menos (OMM, 1992). Este criterio también es válido para Cuba, según el manual de procedimientos del Instituto de Meteorología (INSMET).

*Autor para correspondencia: Orelvis Valdés-Lorenzo. E-mail: orelvisvaldeslorenzo@gmail.com

Recibido: 04/02/2021

Aceptado: 13/09/2021

Por lo que constituye una necesidad profundizar en aquellas precipitaciones intensas que se producen a escala local y que traen consigo serias afectaciones a la economía y la sociedad. En este aspecto, vale resaltar las que ocurren bajo influencia anticiclónica, es decir, sin la presencia de un fondo sinóptico favorable.

Durante el período lluvioso se aprecia la influencia de las altas presiones del Atlántico Norte sobre Cuba, por lo que se presentan días secos, que conjuntamente con la imposición del sistema de brisas marinas y la confluencia del flujo a mesoescala constituyen un factor adicional que, en condiciones de cierta inestabilidad atmosférica, estimula la convección y ocasiona lluvias significativas en el horario de la tarde y primeras horas de la noche (González, 2014).

Solo dos investigaciones se han enfocado en las particularidades de la lluvia localmente intensa bajo marcada influencia anticiclónica (Irañeta, 2016; Armas et al., 2020). Dichos autores determinaron las condiciones a mesoescala que favorecen estas grandes precipitaciones durante el período poco lluvioso, empleando para ello el criterio de un acumulado igual o superior a 50 mm registrado en un lapso de tiempo igual o inferior a las seis horas. La primera investigación enmarcó su estudio en la mitad occidental de Cuba, mientras que la segunda lo hizo para la mitad oriental.

Aunque existen estos dos estudios acerca del tema, no se han realizado investigaciones para el período lluvioso; además es una necesidad realizar similares estudios con mayor resolución espacio-temporal, para de esta forma profundizar en las condiciones físicas y termodinámicas presentes en el ambiente, que traen como resultado acumulados significativos de precipitación, y así contribuir a un pronóstico más certero de eventos de precipitaciones localmente intensas, evitando pérdidas económicas y de vidas humanas.

Por ello el objetivo general de la investigación es determinar las condiciones a mesoescala que favorecen la ocurrencia de lluvia localmente intensa a muy corto plazo, bajo influencia anticiclónica, en la mitad occidental de Cuba durante el período lluvioso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Región de estudio

La región de estudio seleccionada, en lo adelante denominada mitad occidental de Cuba, abarcó las provincias de Pinar del Río, Artemisa, La Habana, Mayabeque, Matanzas, Villa Clara, Cienfuegos y Sancti Spiritus, incluyendo el municipio especial Isla de la Juventud. Esta forma de dividir al país en dos regiones, la mitad occidental y la mitad oriental, ha sido empleada por varios autores en estudios anteriores (González, 2014; Irañeta, 2016; Armas et al., 2020).

En el relieve llano y ondulado que identifica la región, sobresale la cordillera de Guaniguanico, la

cual está dividida en dos formaciones montañosas, en cuanto a la geología: la sierra del Rosario al este, y la sierra de los Órganos al oeste, siendo el Pan de Guajabón la mayor altura con 692 m. Otras elevaciones presentes son: las montañas de Guamuhaya, donde se encuentra el Pico San Juan, la mayor elevación de la mitad occidental de Cuba con 1140 m, las alturas de Bejucal-Madruga-Coliseo y las alturas de Santa Clara (ONEI, 2018).

Selección de la muestra

Se trabajó con una Base de Datos que contiene las observaciones trihorarias de los acumulados de precipitación, reportadas por 37 estaciones meteorológicas del servicio meteorológico cubano en el período 2010-2019. Esta información pertenece a los datos de archivo del INSMET, facilitados por el Centro de Clima (CENCLIM) de dicha institución.

Se identificaron aquellos días en los que al menos una estación reportara un acumulado de precipitación igual o superior a 50 mm en tres horas o menos. A partir de los días identificados, se determinó en cuáles de estos la lluvia localmente intensa se produjo bajo influencia anticiclónica en toda la columna troposférica. Para ello fueron empleados los mapas de Re-análisis de presión atmosférica a nivel del mar y altura geopotencial en los niveles de 850, 700, 500 y 200 hPa; así como los mapas sinópticos elaborados en el Centro de Pronósticos del Tiempo del INSMET para los horarios de las 00:00, 06:00, 12:00 y las 18:00 UTC. Luego de un exhaustivo análisis fueron identificados un total de 22 casos, que constituyen la muestra de estudio de la investigación (Tabla 1).

Análisis Sinóptico

Para el análisis de las condiciones imperantes a escala sinóptica correspondientes a los días seleccionados, se emplearon los mapas de re-análisis de temperatura del aire, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, velocidad vertical y divergencia en los niveles de 1000, 850, 700, 500 y 200 hPa, y hasta 300 hPa en el caso de la humedad relativa; además de los mapas de cizalladura vertical del viento en las capas 1000/850 hPa y 1000/600 hPa. Todos los mapas fueron descargados de los sitios web del National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR)¹.

Fue seleccionado un espacio sinóptico comprendido entre los 10°N-50°N y los 110°W-60°W (Figura 1), con una resolución horizontal de 2,5°. Esta área es representativa de los patrones circulatorios asociados a los fenómenos sinópticos que afectan al archipiélago cubano en el período lluvioso, pues permite la observación en toda la dimensión de estos y la posible interacción trópico-extratropical, teniendo a Cuba en un plano privilegiado.

Tabla 1. Casos de estudio seleccionados

| Fecha | No. | Estación Meteorológica | Hora (UTC) | Acumulado en 3h (mm) |
|------------|-------|------------------------|-------------|----------------------|
| 27/6/2011 | 78335 | Aguada de Pasajeros | 18:00-21:00 | 63.9 |
| 28/6/2011 | 78343 | El Yabú | 21:00-00:00 | 52.2 |
| 6/5/2012 | 78317 | Paso Real de San Diego | 18:00-21:00 | 53.3 |
| 17/8/2012 | 78318 | Bahía Honda | 18:00-21:00 | 62.8 |
| 16/5/2013 | 78335 | Aguada de Pasajeros | 21:00-00:00 | 56.5 |
| 18/10/2013 | 78374 | Tapaste | 21:00-00:00 | 57.2 |
| 22/10/2013 | 78331 | Jagüey Grande | 00:00-03:00 | 68.0 |
| 7/5/2014 | 78329 | Indio Hatuey | 21:00-00:00 | 75.8 |
| 2/6/2014 | 78322 | Batabanó | 21:00-00:00 | 55.2 |
| 16/8/2015 | 78312 | Santa Lucía | 21:00-00:00 | 54.6 |
| 10/5/2016 | 78327 | Unión de Reyes | 21:00-00:00 | 57.0 |
| 25/6/2016 | 78335 | Aguada de Pasajeros | 21:00-00:00 | 67.5 |
| 2/6/2017 | 78374 | Tapaste | 21:00-00:00 | 53.5 |
| 23/6/2017 | 78374 | Tapaste | 21:00-00:00 | 68.5 |
| 13/9/2017 | 78321 | La Fe | 18:00-21:00 | 63.7 |
| 23/10/2018 | 78341 | El Jíbaro | 21:00-00:00 | 65.4 |
| 31/05/2019 | 78373 | Santiago de las Vegas | 18:00-21:00 | 52.8 |
| 31/05/2019 | 78374 | Tapaste | 18:00-21:00 | 51.2 |
| 2/6/2019 | 78329 | Indio Hatuey | 21:00-00:00 | 73.5 |
| 7/6/2019 | 78348 | Caibarién | 21:00-00:00 | 63.4 |
| 1/7/2019 | 78317 | Paso Real de San Diego | 18:00-21:00 | 81.1 |
| 16/10/2019 | 78327 | Unión de Reyes | 00:00-03:00 | 56.2 |

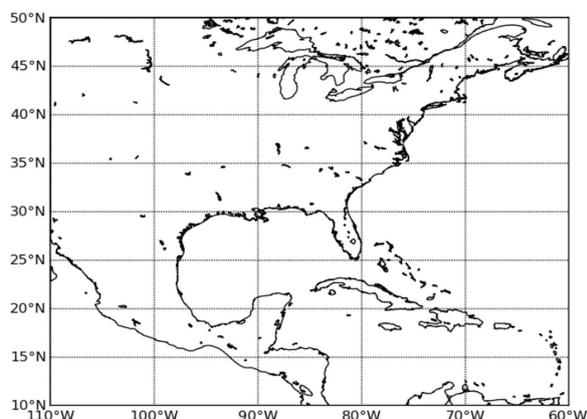


Figura 1. Espacio sinóptico utilizado en la investigación

Imágenes de satélite y observaciones de radar

Para el análisis de la evolución de la convección y el tipo de nubosidad imperante en los casos de estudio se emplearon las imágenes de los satélites GOES 13 y GOES 16, en los canales infrarrojo 4 y visible². Las imágenes del GOES 13 presentaron una resolución espacial de 1 km en el canal visible y 4 km en el infrarrojo 4. Mientras que, en el caso del GOES 16 fue de 0,5 km y 2 km, respectivamente.

Con el propósito de determinar la estructura interna de las tormentas que generaron lluvias localmente intensas fueron caracterizadas las siguientes variables radáricas propuestas en estudios anteriores (Gamboa,

2004): reflectividad máxima (km) ($Z_{m\acute{a}x.}$), altura del núcleo de máxima reflectividad (km) ($HZ_{m\acute{a}x.}$), altura del tope máximo (km) (TM), contenido de agua líquida verticalmente integrada (kg/m^2) (VIL) y densidad de VIL (kg/m^3) (VD). Finalmente, fue posible analizar las observaciones de radar meteorológico para 16 casos de 22.

Para ello fueron empleadas las observaciones de radar disponibles, facilitadas por el Centro Nacional de Radares. El análisis de las observaciones (formato .obs) se realizó mediante el empleo del software Vesta Proceso en su versión 5.3.19.2. Se obtuvo información de dos radares meteorológicos, teniendo en cuenta su cercanía a las estaciones que reportaron la lluvia localmente intensa. El radar de Casablanca realizó las exploraciones cada 10 minutos, mientras que el radar de Pico San Juan las hizo cada 15 minutos.

Además, fueron utilizadas las observaciones Level II del radar doppler ubicado en Key West³, Florida, Estados Unidos, dada su cercanía a la región de estudio y por contar con una tecnología moderna y sofisticada. Estas fueron analizadas empleando el programa Gibson Ridge Level II Analyst v1.71. Con este radar no fue posible estudiar la variable $HZ_{m\acute{a}x.}$, debido a la distancia objeto-radar, en la mayoría de los casos analizados no se obtuvo información del contenido de hidrometeoros en los primeros 5 km de altura, lo cual constituyó un obstáculo en la determinación de la intensidad real de las celdas convectivas (Tabla 2).

Análisis a mesoescala

El análisis de las condiciones a mesoescala se efectuó mediante el empleo de las corridas del modelo WRF bajo el Sistema de Pronóstico Inmediato (SisPI), desarrollado por especialistas del Centro de Física de la Atmósfera del INSMET, con una resolución de 3 km, lo cual concuerda con la escala espacial en la que se desarrolla este tipo de fenómenos mesoescalares (Figura 2).

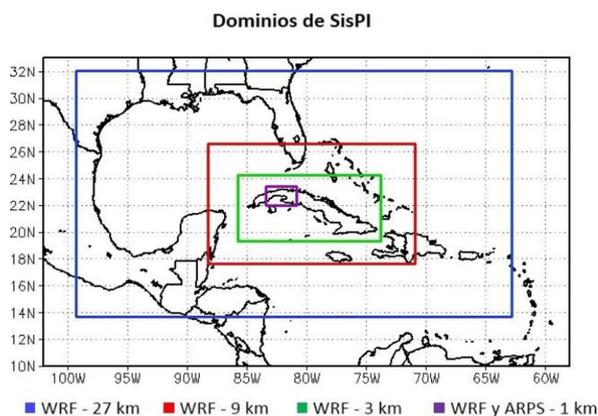


Figura 2. Dominios del modelo WRF bajo el Sistema de Pronóstico Inmediato (SisPI)

Fue posible contar con corridas para 7 días de estudio (inicializadas a las 00:00 y las 12:00 UTC) correspondientes a los años 2017 y 2019. Para la generación de las salidas gráficas del modelo fue empleado el sistema Grid Analysis and Display System (GrADS).

A partir de las salidas gráficas del modelo WRF se analizaron las siguientes variables y campos meteorológicos: temperatura del aire y humedad relativa en superficie y en los niveles de 1000, 950, 900, 850, 700, 600, 500, 400, 300 y 200 hPa; movimientos verticales en los niveles mandatorios, dirección y velocidad del viento en superficie y en los niveles antes mencionados, divergencia horizontal en superficie, cizalladura vertical del viento para las capas de 0-1 km, 0-3 km y 0-6 km, acumulado de precipitación en 3 horas y máximos de reflectividad. Además, se estudiaron la Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE) y la Energía de Inhibición Convectiva (CIN).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones imperantes a escala sinóptica

Las nubes de tormenta se desarrollan entre las escalas β -meso y la α -micro (Orlanski, 1975). Sin embargo,

el comportamiento de la convección, como el resto de los fenómenos meteorológicos asociados con ella, ocurre en una estrecha interacción entre los procesos de diferentes escalas atmosféricas. Por lo que es innegable la influencia que sobre los procesos mesoescalares ejerce la escala sinóptica, la cual abarca los sistemas que se desarrollan entre la β -macro hasta una parte de la β -meso. A continuación se realiza un análisis, en el horario previo a la precipitación, del comportamiento de las variables temperatura del aire, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, movimientos verticales y divergencia, así como la cizalladura vertical del viento para las capas 1000-850 y 1000-600 hPa.

La altura de la isoterma 0 °C se localizó ligeramente por encima de los 600 hPa en todos los casos. Por su parte, la temperatura del aire en el nivel de 500 hPa osciló entre -4,6 y -8 °C, siendo -5,3 °C la media del total de casos estudiados.

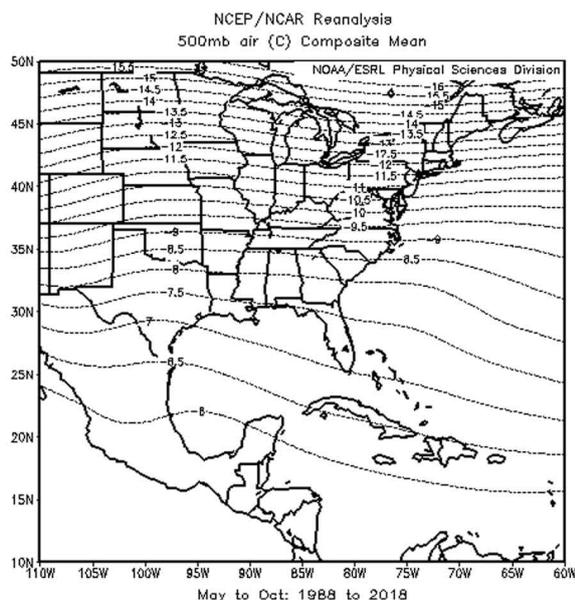
Estos valores fueron comparados con los obtenidos del mapa de valores medios para el período lluvioso entre 1988-2018, que oscilan entre (-7,0) y (-6,5) °C, como se muestra en la figura 3. Como se puede apreciar la media de los casos fue superior a la media histórica, y en general los valores individuales estuvieron ligeramente por encima del valor medio para dicho período. Por lo que se puede afirmar que la temperatura del aire en 500 hPa se comportó por encima de lo normal, lo cual no favorece el desarrollo de convección profunda, al no existir un fuerte gradiente de temperatura en la vertical.

La humedad relativa en el nivel de 1000 hPa fue superior al 70% en todos los casos de estudio, oscilando entre 70-85%, con un 75% de humedad relativa como valor más frecuente, siendo este nivel el que más aportó humedad. En 850 hPa hubo una disminución de esta variable, manteniéndose por encima del 50%, siendo el valor más frecuente 60%. En el nivel de 700 hPa hubo una fuerte reducción de la humedad relativa, apreciándose una capa seca, en 18 (81,8%) de los casos fue inferior al 50%, oscilando entre 10-60%. En 500 hPa se mantuvo la presencia de aire seco, con valores inferiores al 50% en 20 de los casos. Mientras que en el nivel de 300 hPa no hubo un comportamiento homogéneo de esta variable.

En la capa 1000-850 hPa la humedad relativa fue superior al 60% en todos los casos. Mientras que en la capa 1000-600 hPa hubo una ligera disminución de la humedad relativa, oscilando esta entre 45-65%, siendo el valor más frecuente 50% (Figura 4).

Tabla 2. Distancia máxima hasta la cual están disponibles los productos analizados mediante el radar de Key West

| Productos | Distancia |
|-----------|-----------|
| Zmáx. | 460 km |
| TM | 230 km |
| VM | 230 km |
| DM | 230 km |



Fuente:

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>

Figura 3. Temperatura media del aire en 500 hPa para el período lluvioso entre 1988-2018 (°C).

Lo expuesto anteriormente evidencia un elevado contenido de humedad en niveles bajos, con una intrusión de aire seco en niveles medios, lo cual potencia las corrientes descendentes dentro de la nube, como resultado del enfriamiento evaporativo. Esta distribución de la humedad en la vertical, constituye la primera condición para el inicio de la convección en Cuba (Armas et al., 2020). Sin embargo, dicha distribución no determina la ocurrencia de precipitaciones intensas, pues es necesario un elevado contenido de humedad relativa en la capa 850-500 hPa (Rodríguez, 2019).

En general, el giro de los vientos fue dextrógiro, presentando una componente Este en niveles bajos y medios, y una componente Oeste en niveles altos, mostrando un perfil vertical medianamente or-

ganizado. En relación a la intensidad del viento, tendió a mantenerse prácticamente constante en la capa 1000-700 hPa, sin superar los 8 m/s. Hubo un ligero aumento de la intensidad a partir de 500 hPa, encontrándose los mayores valores en el nivel de 200 hPa.

Los valores modulares de la cizalladura vertical del viento en la capa 1000-850 hPa oscilaron entre 0 y 4 m/s, siendo nula en 13 de los 22 casos, lo cual demuestra que la intensidad del viento se mantuvo prácticamente constante en niveles bajos. Para la capa 1000-600 hPa es negativa en 16 de los casos, con valores modulares entre 0 y 6 m/s, lo cual ilustra una disminución de la velocidad del viento hacia niveles medios.

La divergencia no mostró un comportamiento homogéneo. Sus valores modulares fueron bajos en toda la columna troposférica, oscilando entre 0 y $9 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. El nivel de 850 hPa fue el más favorable a la convergencia, mientras que en 500 hPa hubo divergencia en 17 de los 22 casos.

En general, los movimientos verticales fueron débiles, relacionados con los bajos valores de divergencia a gran escala, siendo inferiores a 0,1 m/s (valor modular) en la mayoría de los casos. Predominaron movimientos ascendentes en la capa 1000-700 hPa, encontrándose los mayores ascensos en el nivel de 850 hPa con un valor modular máximo de 0,175 m/s. En el nivel de 500 hPa no hubo un comportamiento homogéneo, mientras que en 200 hPa predominaron movimientos descendentes.

El análisis realizado evidencia que las condiciones a escala sinóptica no eran propicias para la ocurrencia de lluvias intensas dado el ambiente de estabilidad predominante. Es por ello, que a continuación se hará un estudio de las condiciones a mesoescala a partir de las salidas gráficas del modelo WRF, y el empleo de imágenes de satélite y observaciones de radar meteorológico.

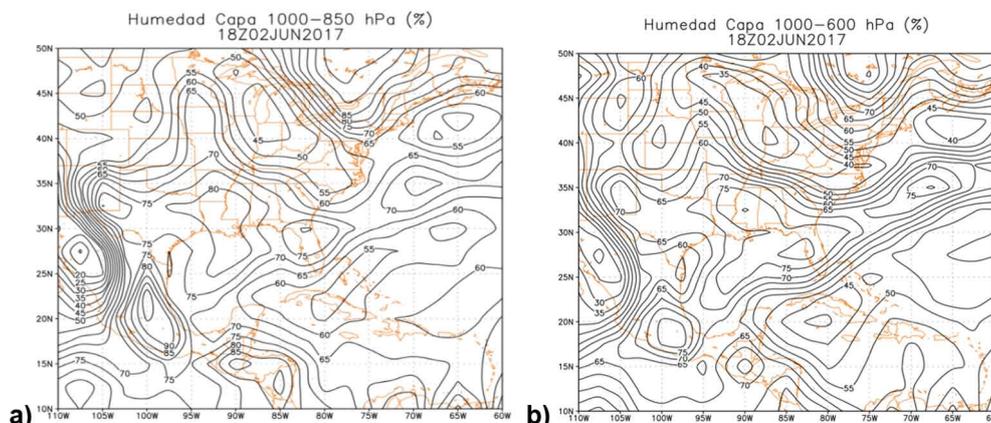


Figura 4. Mapas de re-análisis de humedad relativa correspondientes al 2 de junio de 2017 a las 18:00 UTC. a) capa 1000-850 hPa y b) capa 1000-600 hPa

Análisis a mesoescala de las variables meteorológicas a partir de las salidas del modelo WRF

Los modelos numéricos ofrecen una aproximación del estado futuro de la atmósfera, por lo que no simulan completamente la realidad, sino que tienen asociado incertidumbres. Sin embargo, constituyen una herramienta fundamental tanto para el pronóstico del tiempo como para el análisis de eventos pasados.

A continuación, se expone un análisis mesoescalar de las condiciones meteorológicas y termodinámicas simuladas para los días de estudio, mediante las salidas gráficas horarias del modelo WRF. En todos los casos la lluvia localmente intensa precipitó entre las 18:00 y las 03:00 UTC del día siguiente (2:00-11:00 p.m., hora local de verano).

Las temperaturas en superficie fueron cálidas, con valores que oscilaron entre los 30,5°C y 34°C, lo cual aportó suficiente energía para el ascenso de las parcelas de aire. La isoterma de 0°C se localizó próxima a los 5 km de altura en todos los casos, ligeramente superior a lo encontrado a gran escala. Mientras tanto, en 500 hPa las temperaturas fueron más cálidas que el valor medio histórico de -6,7°C, en 6 de los 7 casos, oscilando entre -6,7°C y -3,2°C. Esta situación no favorece la formación de granizos capaces de alcanzar la superficie, lo cual está directamente relacionado con que no hubo reportes de este tipo de severidad en ninguno de los casos de estudio de la investigación.

La humedad relativa mantuvo una tendencia al aumento a medida que se acercaba el horario en el que se registró la precipitación. Para el análisis de esta variable se escogió las 15:00 UTC, con el objetivo de evitar posibles alteraciones a causa de la ocurrencia de precipitaciones.

En superficie la humedad relativa fue superior al 60% en todos los casos. En la capa 1000-850 hPa se concentró el mayor contenido de humedad relativa, con valores que oscilaron entre 65 y 95%, siendo los niveles de 950 y 900 hPa los que más aportan humedad, generalmente con valores entre 80 y 95%. A diferencia de lo observado a gran escala, la capa húmeda alcanzó en ocasiones el nivel de 700 hPa, oscilando sus valores entre 40 y 75%. Por encima de este nivel hubo una disminución de la humedad relativa, con cifras inferiores al 50% en la mayoría de los casos. En 600 hPa fue inferior al 45% en 5 casos, oscilando entre 25 y 70%. En el nivel de 500 hPa no superó el 50% en 5 casos, oscilando entre 15 y 70%. La capa 400-300 hPa fue la más seca, con valores inferiores al 50% en todos los casos, llegando incluso a alcanzar el 5%.

Estas cifras son superiores a las obtenidas por reanálisis, mostrando un elevado contenido de humedad en las capas bajas de la troposfera. Esta distribución de la humedad en la vertical está más relacionada con

el fenómeno de la lluvia intensa que la observada a gran escala.

El aumento de la humedad relativa en los niveles bajos de la troposfera hacia el horario previo en que fue reportada la precipitación, produjo un descenso marcado del nivel de condensación por ascenso, encontrándose por debajo de los 1000 m en todos los casos, siendo 170 m el valor extremo inferior hallado en la investigación. Esto, unido al aumento de la convergencia en superficie, permitió rápidamente la condensación de la masa de aire.

El viento mostró poca variación en intensidad desde superficie hasta 500 hPa, sin superar los 5 m/s en la mayoría de los casos. Este comportamiento estuvo estrechamente relacionado con el hecho de que Cuba se encontraba inmersa en una faja de altos valores de geopotencial, por lo que predominaron vientos débiles en niveles bajos y medios. Por encima de 500 hPa hubo un incremento en la velocidad del viento, alcanzando su máxima intensidad en 200 hPa (Figura 5).

El giro del viento con la altura no tuvo un comportamiento homogéneo, pues su dirección estuvo en dependencia de la posición de los centros de altos valores de geopotencial que se localizaban sobre o muy próximos a Cuba. En niveles bajos predominaron vientos del segundo cuadrante, lo cual aportó gran contenido de humedad.

En el horario previo a la precipitación la CAPE fue superior a los 1000 J/kg, alcanzando el valor extremo de 2383 J/kg. Estos valores indican un potencial convectivo moderadamente inestable, suficiente para sostener fuertes corrientes ascendentes. El valor de la CIN estuvo por debajo de 40 J/kg, siendo inferior a 10 J/kg en 6 casos. Ello evidencia que con solo un pequeño forzamiento a mesoescala, sería suficiente para elevar la parcela de aire hasta el nivel de convección libre (NCL).

Lo expuesto hasta ahora demuestra que, aunque el ambiente sinóptico no era el idóneo para el desarrollo de procesos convectivos debido a la marcada influencia anticiclónica predominante en toda la columna troposférica, los altos valores de humedad en niveles bajos con elevadas temperaturas en superficie y el fuerte levantamiento a mesoescala, así como gran cantidad de energía acumulada en las capas bajas, fueron los detonantes de estos eventos de lluvia localmente intensa.

La cizalladura vertical del viento fue débil en todos los casos, para las capas superficie-1 km, superficie-3 km y superficie-6 km, correspondiéndose con lo observado a escala sinóptica. Este comportamiento limitó el mezclamiento de las celdas convectivas con el ambiente, evitando en lo posible la evaporación de las gotas de agua por la presencia de aire seco en niveles medios y altos; sin embargo, redujo el tiempo de vida de las tormentas debido al acoplamiento de las corrientes ascendente y descendente de la nube.

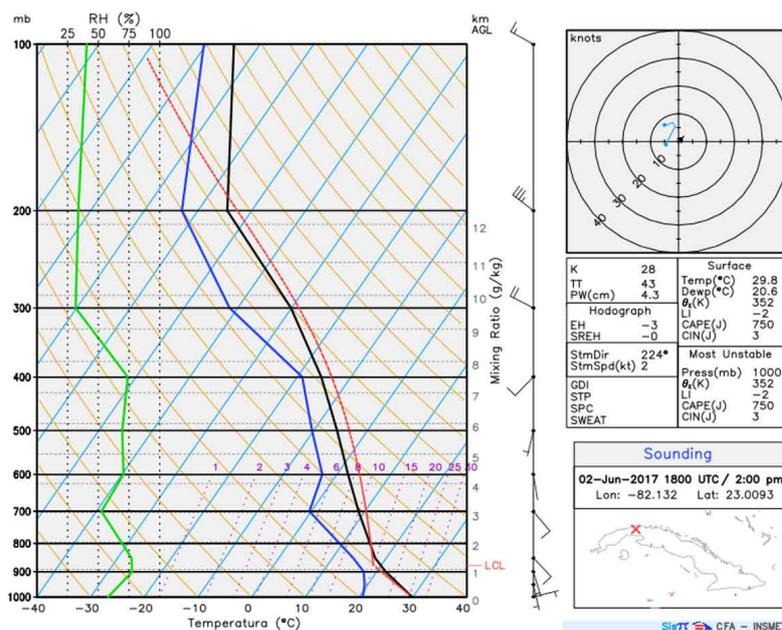


Figura 5. Sondeo termodinámico (simulado) de la estación meteorológica Tapaste correspondiente al 2 de junio de 2017, a las 1800 UTC

La divergencia en superficie tuvo un comportamiento homogéneo en todos los casos. En el horario previo a la precipitación se observó fuerte convergencia, con valores que oscilaron entre -50×10^{-5} y $-200 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, lo cual está asociado con la intensidad de la corriente ascendente que sostiene la nube. Mientras que, hacia el horario de la precipitación predominaron altos valores de divergencia, que oscilaron entre 40×10^{-5} y $200 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, señalando la presencia de fuertes corrientes descendentes y la ocurrencia de precipitaciones en superficie.

Los movimientos verticales fueron ascendentes desde niveles bajos hasta 300 hPa en la mayoría de los casos, lo cual favoreció el desarrollo de la convección profunda. Los mayores movimientos ascendentes se registraron en el nivel de 850 hPa, con valores que oscilaron entre 0,22 y 1,00 m/s, siendo superiores a 0,55 m/s en 5 casos. En el nivel de 200 hPa predominaron movimientos descendentes. Estos valores son muy superiores a los observados a escala sinóptica, debido a que la escala espacial y temporal utilizada por el modelo WRF, a diferencia de re-análisis, es representativa de la escala de las tormentas.

El producto Máximos de Reflectividad mostró la presencia de fuertes celdas convectivas, con núcleos de reflectividad entre 50 y 60 dBZ en la mayoría de los casos. Ello refleja que el modelo WRF fue capaz de simular la presencia de fuerte actividad convectiva sobre las áreas en las que se reportó lluvia localmente intensa.

La distribución espacial de las precipitaciones, simulada por el modelo WRF, estuvo conforme a la realidad en cuatro de los casos, que representan el 57,1 %, pues en los restantes la ubicación de la precipitación estuvo algo desplazada en relación con los reportes de las estaciones meteorológicas. Por otra parte,

su cuantificación fue subestimada en todos los casos por el modelo, encontrándose los valores numéricos muy por debajo de los registros reales, coincidiendo con Irañeta (2016).

Análisis de las imágenes de satélite

A continuación se realiza una descripción general de la evolución de la convección en los días bajo estudio mediante las imágenes de satélite.

El flujo medio del viento en las capas bajas de la troposfera fue del este al sudeste en 13 de los casos, mientras que en los 9 restantes fue del NE al E. Desde horas tempranas de la mañana se notó la presencia de Celdas de Rayleigh-Bénard (CRBs), las cuales evolucionaron a rollos convectivos horizontales (HCRs, por sus siglas en inglés), al incrementarse el flujo medio en las capas bajas de la troposfera.

De forma general, poco tiempo después de apreciarse los HCRs, se produjo la aparición del frente de brisa de mar (FBM), siendo más pronunciado en la costa ubicada en dirección contraria al flujo en niveles bajos. Seguidamente se produjo la interacción entre el FBM y las ramas ascendentes de los HCRs (Figura 6).

Lo anteriormente expuesto produjo un aumento notable del levantamiento y la convergencia en superficie, provocando un estallido de la convección en el borde delantero del FBM, que garantizó el ascenso de las parcelas de aire hasta el NCL, lo que resultó ser el detonante de la convección profunda y organizada desde las primeras horas de la tarde, coincidiendo con lo encontrado por Irañeta (2016) y Peinó et al. (2020). Vale aclarar que la aparición de los HCRs y el FBM, así como su interacción, no se produjo al unísono en toda la región, sino ocurrió de forma escalonada.

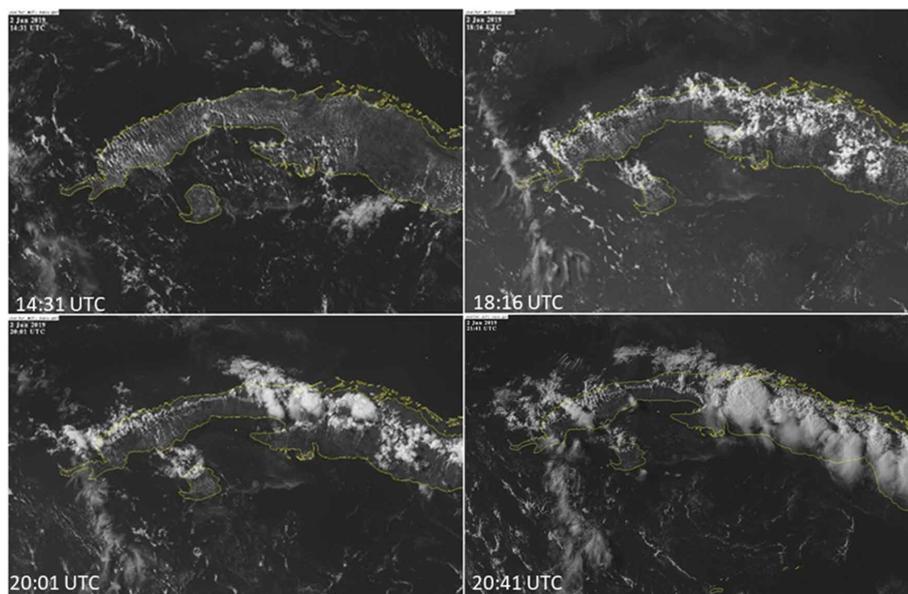


Figura 6. Secuencia de imágenes de satélite del GOES 16 del 2 de junio de 2019, correspondientes al canal visible, donde se observa la formación de actividad convectiva fuerte

En el caso correspondiente al 16 de agosto de 2015, en el cual se reportó lluvia localmente intensa en la estación meteorológica de Santa Lucía, Pinar del Río; el mecanismo que dio inicio a la convección profunda fue la interacción entre el frente de rachas de una tormenta en disipación, ubicada en la costa sur de Pinar del Río, y el FBM de la costa norte. Ello se corresponde con lo planteado por Varela & Carnesol-tas (2017), quien afirma que el movimiento de los frentes de rachas de tormentas en disipación, en una dirección paralela a la orientación de la costa, permite interactuar con el FBM e iniciar la formación de nuevas tormentas.

En las imágenes de satélite, correspondientes al canal visible, se observó como generalidad la presencia de toques penetrantes con escudos cirrosos, lo cual evidencia la presencia de intensas corrientes ascendentes dentro de los cumulonimbos, capaces de alcanzar el nivel de la tropopausa. Las imágenes correspondientes al canal infrarrojo 4 mostraron temperaturas muy frías, reflejando nubes de gran desarrollo vertical y la ocurrencia de convección profunda.

Análisis de las observaciones de radar

Con el propósito de determinar la evolución y la estructura interna de las tormentas que generaron acumulados de lluvia localmente intensa, fueron analizadas las observaciones de radar teniendo en cuenta la distancia objeto-radar, y su repercusión en la cuantificación de las variables radáricas planteadas en los objetivos. Se contó con observaciones para 16 de los 22 casos de estudio, pues en los demás días no se encontraba operativo ningún radar lo suficientemente cercano a la estación que reportó la precipitación o las observaciones no tenían la calidad requerida.

Fueron identificados dos tipos de configuraciones a partir de la morfología que presentó el patrón de radioecos. En 12 de los casos se apreció una configuración en forma de clúster; mientras que en los restantes 4 casos se observaron líneas.

En todos los casos analizados, la ocurrencia de la lluvia localmente intensa estuvo asociada con tormentas de multiceldas (Figura 7). En 4 de los casos de estudio esta fue generada por el paso de al menos dos celdas sobre la estación meteorológica, apreciándose el “efecto tren convectivo”, por lo que en la presente investigación fueron analizadas un total de 21 celdas convectivas.

Las celdas fueron de rápida evolución, presentando un movimiento con rumbo próximo al NW en 13 casos, producto de un flujo del sudeste en niveles medios de la troposfera. En todos los casos, las celdas tuvieron un tiempo de vida superior a los 30 minutos, llegando a sobrepasar la hora y media en 6 casos, producto de la interacción con frentes de rachas de otras tormentas en disipación.

Los valores de máxima reflectividad, encontrados durante el ciclo de vida de las celdas convectivas, se produjeron en su mayoría entre las 1800 y las 2330 UTC, oscilando entre 50,5 y 64 dBZ. En 6 de las celdas estudiadas la $Z_{m\acute{a}x}$, superó los 60 dBZ, lo cual evidencia la gran cantidad de hidrometeoros que contenían estas nubes (Figura 8).

Los resultados obtenidos coinciden con los valores encontrados por Peinó et al. (2020) para el caso de tormentas que producen lluvias localmente intensas, acompañadas de tiempo severo. Ello evidencia que no existen marcadas diferencias, con respecto a la $Z_{m\acute{a}x}$, entre las tormentas generadoras de lluvia localmente intensa y las que presentan, además, algún tipo de severidad.

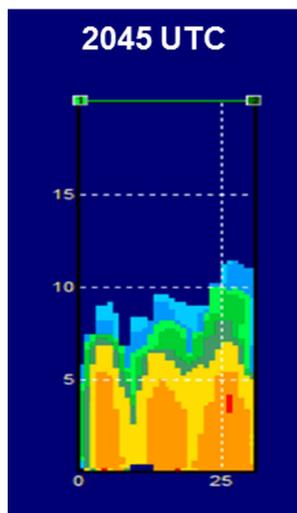


Figura 7. Corte vertical de la tormenta de multicelda que afectó el municipio Aguada de Pasajeros el 16 de mayo de 2013. Nótese la presencia de tres celdas convectivas

La altura del núcleo de máxima reflectividad (HZmáx.) osciló entre los 0,3 y 5 km, presentando todas las celdas eco centroide de máxima reflectividad por debajo de los 5 km de altura en el momento de mayor intensidad. Ello demuestra la existencia de grandes volúmenes de agua líquida por debajo de la isoterma 0°C, predominando los procesos de colisión-coalescencia, los cuales aumentaron la intensidad y eficiencia de la precipitación.

Durante el momento de mayor desarrollo vertical alcanzado por las celdas, el tope máximo osciló entre los 7,9 y 17,2 km, siendo superior a los 12 km en 12 casos. Los altos valores del TM indican la presencia de fuertes corrientes ascendentes dentro de los cumulonimbos, sostenidas por elevados valores de humedad en niveles bajos. Estos valores se corresponden con los encontrados por Gamboa (2004) para caracterizar a las nubes de tormentas (≥ 36 dBZ) que no producen tiempo severo.

El VIL no fue capaz de ofrecer en todos los casos información del contenido real de agua líquida de las

celdas, oscilando entre 10 y 72 kg/m². Este fue superior a 20 kg/m² en 11 casos, superando el valor de 50 kg/m² en 3 de ellos (Figura 9). En general, los valores individuales son semejantes a los encontrados por Gamboa (2004), quien obtuvo como mediana un valor próximo a los 25 kg/m².

Los valores de densidad de VIL observados en la etapa de madurez de las celdas oscilaron entre 0,8 y 4,2 kg/m³, siendo superiores a 1,4 kg/m³ en 9 casos. Ello se corresponde con lo encontrado por Gamboa (2004) y es inferior a los valores hallados por Armas et al. (2020).

CONCLUSIONES

- A partir del análisis de las imágenes de satélite, correspondientes al canal visible, se determinó que la interacción de los rollos convectivos horizontales (HCRs) con el frente de brisa de mar fue el detonante principal de la convección profunda en 21 de los 22 casos estudiados.
- Las observaciones de radar meteorológico mostraron que las celdas convectivas se caracterizaron por ser intensas, con una reflectividad superior a 50 dBZ, presentando bajo eco centroide de máxima reflectividad en el momento de mayor intensidad, lo cual aumentó la eficiencia de la precipitación.
- Los casos estudiados a partir de las salidas gráficas del modelo WRF mostraron que, la lluvia localmente intensa fue generada en un ambiente de débil cizalladura vertical del viento desde superficie hasta 6 km de altura, con valores de humedad relativa superiores al 65% en la capa 1000-850 hPa y una disminución de esta variable por encima de 700 hPa, con temperaturas cálidas en 500 hPa que oscilaron entre -3 y -6°C. Además, en superficie predominaron altos valores de convergencia horizontal antes de la precipitación y fuerte divergencia hacia el horario de la lluvia, con los mayores movimientos ascendentes en el nivel de 850 hPa.

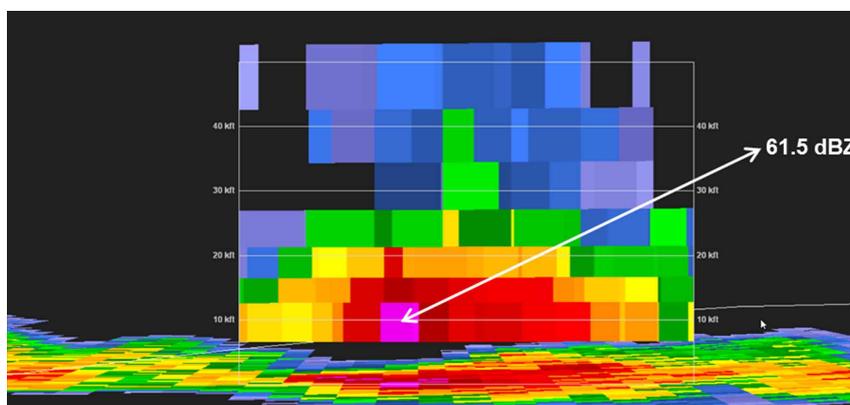


Figura 8. Corte vertical que muestra el valor de máxima reflectividad alcanzado por la celda que afectó el poblado Tapaste, provincia Mayabeque, el 23 de junio de 2017, a las 21:49 UTC

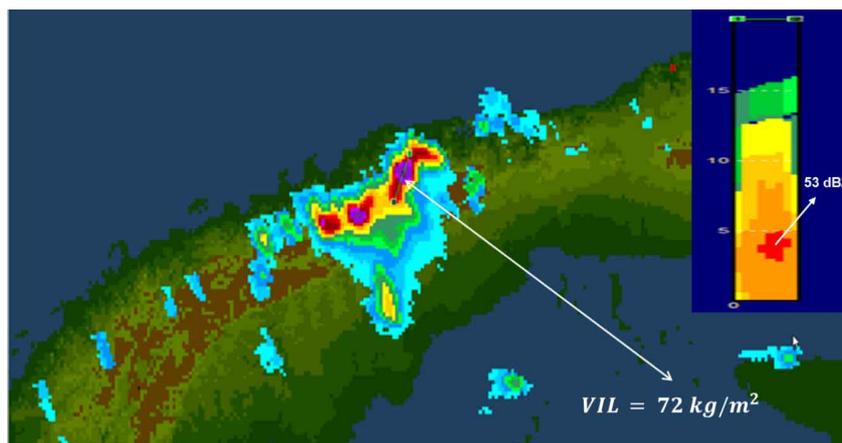


Figura 9. Valores de VIL y corte vertical que ilustra el eco centroide de máxima reflectividad por debajo de los 5 km de altura, correspondiente al 17 de agosto de 2012, a las 18:00 UTC

RECOMENDACIONES

- Extender el estudio a la mitad oriental de Cuba.
- Analizar el comportamiento de las variables examinadas en la investigación, mediante las salidas gráficas del modelo WRF, para algunos días en los que Cuba se encontraba bajo influencia anticiclónica en toda la columna troposférica y no se produjeron precipitaciones localmente intensas, con el objetivo de encontrar diferencias entre ambas situaciones.

AGRADECIMIENTOS

A Maibys Sierra por facilitar las corridas y las salidas gráficas del modelo WRF. A Eliezer Pila por la ayuda brindada en la obtención de los mapas de reanálisis y las imágenes de satélite.

REFERENCIAS

- Armas, O.; Varela, A. & Justiz, A. 2020. "Lluvia localmente intensa. Estudio de casos". *Revista Cubana de Meteorología*, 26(2): 1-17, ISSN: 2664-0880.
- Gamboa, F. 2004. Selección de indicadores radáricos como predictores de severidad. Tesis de Maestría, La Habana, Cuba: Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, 55 p., [Consulted: May 6, 2020].
- González, M. I. 2014. Lluvia intensa en el período poco lluvioso desde Ciego de Ávila hasta Guantánamo. Trabajo de Diploma, La Habana, Cuba: Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, 80 p., [Consulted: April 13, 2020].
- Irañeta, J. M. 2016. Estudio a mesoescala de eventos de lluvia localmente intensa para el período poco lluvioso en la mitad occidental de Cuba. Trabajo de Diploma, La Habana, Cuba: Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, 67 p., [Consulted: April 9, 2020].
- OMM. 1992. Vocabulario Meteorológico Internacional. Organización Meteorológica Mundial, No. 182, 2nd ed., Ginebra, Suiza, 784 p., ISBN: 7-5029-1634-2/Z, Available: <https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=5533>, [Consulted: March 26, 2020].
- ONEI (Oficina Nacional de Estadística e Información). 2018. Territorio. Anuario Estadístico de Cuba 2018, Available: <<http://www.onei.gob.cu/node/13804>>, [Consulted: March 29, 2020].
- Orlanski, I. 1975. "A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 56(5): 527-530, ISSN: 0003-0007, 1520-0477, DOI: 10.1175/1520-0477-56.5.527.
- Peinó, E.; Varela, A. & Bermúdez, Y. 2020. "Lluvias localmente intensas asociadas con tormentas locales severas. Condiciones sinópticas y mesoescalares". *Revista Cubana de Meteorología*, 26(1): 1-13, ISSN: 2664-0880.
- Rodríguez, E. J. 2019. Patrones sinópticos asociados a los frentes fríos que generan lluvias intensas en Cuba. Trabajo de Diploma, La Habana, Cuba: Universidad de La Habana, 76 p., [Consulted: April 20, 2020].
- Varela, A. & Carnesoltas, M. 2017. "Condiciones que favorecen el desarrollo de tornados en las provincias occidentales de Cuba en los períodos lluvioso y poco lluvioso". *Revista Cubana de Meteorología*, 23(3), 312-327, ISSN: 0864-151X.

¹ <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/hour/>; <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi-bin/data/composites/printpage.pl>

² <http://www.bou.class.noaa.gov/saa/products/welcome/>

³ <http://www.ncdc.noaa.gov/nexradinv/>

Orelvis Valdés-Lorenzo. Agencia de Medio Ambiente, Calle 20 No.4110 esq. 18A, La Habana, Cuba. E-mail: orelvisvaldeslorenzo@gmail.com

José Manuel Irañeta-Batallán. Agencia de Medio Ambiente, Calle 20 No.4110 esq. 18A, La Habana, Cuba. E-mail: jmibatallan@gmail.com ,

Yesenia Arias-Mulet. Agencia de Medio Ambiente, Calle 20 No.4110 esq. 18A, La Habana, Cuba. E-mail: yesi19890324@gmail.com

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Contribución de los autores: Concepción de la idea: **Orelvis Valdés Lorenzo** y **José Manuel Irañeta Batallán**. Obtención de datos: **Orelvis Valdés Lorenzo** y **Yesenia Arias Mulet**. Elaboración del artículo: **Orelvis Valdés Lorenzo**, **José Manuel Irañeta Batallán** y **Yesenia Arias Mulet**

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