

# Factores físico meteorológicos que influyen en la intensidad de las lluvias intensas de corta duración en Cuba a partir del modelo SISPI



<https://cu-id.com/2377/v30n4e03>

## Physical-meteorological factors that influence in the intensity of short-duration heavy rainfall in Cuba based on the SISPI model

 Beatriz Valdés Díaz<sup>1\*</sup>,  Alis Varela de la Rosa<sup>2</sup>,  Mario Carnesoltas Calvo<sup>3</sup>,  José Ángel Calzadilla Pérez<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Oficina Principal y de Vigilancia Meteorológica, Empresa Cubana de Navegación Aérea, Cuba.

<sup>2</sup>Centro de Pronósticos, Instituto de Meteorología, Cuba.

<sup>3</sup>Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, Cuba.

**RESUMEN:** A escala local, las lluvias localmente intensas de corta duración se asocian a la actividad diaria de las tormentas eléctricas. En ocasiones causan notables impactos negativos a las infraestructuras sociales y la seguridad humana, aunque no están consideradas dentro de las Tormentas Locales Severas. Su predicción se hace muy compleja de acuerdo a su gran variabilidad espacial y temporal, además de los mecanismos y multiplicidad de factores que intervienen en su generación. El objetivo principal de esta investigación fue determinar los factores físico-meteorológicos que discriminan la ocurrencia de estos eventos intensos, contribuyendo así, a la elaboración de su futuro pronóstico a corto plazo. Se seleccionó una serie de factores como posibles discriminantes y que respondiendo a leyes y procesos de la física influyeron en la intensidad de la precipitación. Para comprobar si fueron efectivos, se estableció una comparación entre casos en los que las tormentas generaron lluvias localmente intensas de corta duración y casos en los que estas no generaron estos fenómenos, a partir del cálculo de variables termodinámicas. El resultado más relevante se les atribuyó a que todos los factores físico-meteorológicos presentaron valores propicios para generar eventos intensos de precipitación en superficie.

**Palabras clave:** intensidad, lluvias localmente intensas de corta duración, tormentas eléctricas.

**ABSTRACT:** At a local scale, locally intense short-duration rainfall is associated with the daily activity of thunderstorms. Sometimes, it causes significant negative impacts on social infrastructure and human safety, although it is not considered within the Severe Local Storms. Its prediction becomes very complex according to its great spatial and temporal variability, in addition to the mechanisms and multiplicity of factors that intervene in its generation. The main objective of this research is to determine the physical-meteorological factors that discriminate the occurrence of these intense events, thus contributing to the elaboration of their future short-term forecast. A series of factors were selected as possible discriminants and that, responding to laws and processes of physics, influenced the intensity of the precipitation. To check if they were effective, a comparison was established between cases in which the storms generated locally intense short-duration rainfall and cases in which they did not generate these phenomena, based on the calculation of thermodynamic variables. The most relevant result was attributed to the fact that all physical-meteorological factors presented values conducive to generating intense surface precipitation events.

**Keywords:** Locally intense short-duration rainfall, thunderstorms, SISPI numerical model.

\*Autor para correspondencia: Beatriz Valdés Díaz. E-mail: [beatrizvaldesdiaz9@gmail.com](mailto:beatrizvaldesdiaz9@gmail.com)

Recibido: 06/03/2024

Aceptado: 03/06/2024

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

**Contribución de los autores: Concepción de la idea:** Beatriz Valdés Díaz, Mario Carnesoltas Calvo y Alis Varela de la Rosa.

**Manejo de los datos:** Beatriz Valdés Díaz y José Ángel Calzadilla Pérez. **Análisis de los datos:** Beatriz Valdés Díaz y José Ángel Calzadilla Pérez.

**Investigación:** Beatriz Valdés Díaz y José Ángel Calzadilla Pérez. **Metodología:** Beatriz Valdés Díaz, Mario Carnesoltas Calvo y Alis Varela de la Rosa.

**Supervisión:** Mario Carnesoltas Calvo y Alis Varela de la Rosa. **Validación**

**de los resultados:** Beatriz Valdés Díaz, Mario Carnesoltas Calvo, Alis Varela de la Rosa y José Ángel Calzadilla Pérez.

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 precipitaciones intensas en cortos intervalos de tiempo son fenómenos que ocurren a escala local y pueden acarrear desde pérdidas socio-económicas hasta de vidas humanas, las que provocan inundaciones súbitas y repentinas, sobre todo en ciudades importantes y con alta densidad poblacional. El comportamiento natural de la precipitación hace que sea necesario hablar de una relación no lineal para referirse a cómo cambia la intensidad de la precipitación con el intervalo de tiempo medido, ya que sus extremos suponen un interés especial para la sociedad porque determinan un nivel de riesgo al que se ve sometida (Monjo, 2010).

Según los registros pluviométricos, las lluvias suelen ser más intensas en los intervalos de tiempo inferiores a 60 minutos y las de larga duración, particularmente las ciclónicas, en intervalos de tiempo superiores a los 60 minutos (Planos *et al.*, 2004). La Organización Meteorológica Mundial (OMM, 1992) define el término de lluvia intensa como aquella precipitación que presenta un acumulado mayor o igual a los 30 mm en una hora de duración, sin embargo, esta definición es adaptable a distintas regiones, debido a la accesibilidad que presenta cada país a los registros pluviométricos. En este caso el Instituto de Meteorología de Cuba considera como lluvia intensa la clasificación propuesta por Rivero *et al.* (1981), como aquella precipitación que produce un acumulado en superficie igual o mayor a 100 mm en 24 horas; o igual o mayor a 50 mm en 12 horas.

A escala local, las lluvias intensas están asociadas a la actividad diaria de las tormentas eléctricas (TE), muy comunes en Cuba. Estas tormentas son formadas y mantenidas por fuertes corrientes ascendentes que logran transportar las gotas de agua hasta las porciones superiores de la nube, que luego precipitan y generan acumulados de precipitación significativas en superficie. Todo este proceso ocurre en un ciclo de vida que puede durar desde algunos minutos hasta algunas pocas horas según Byers & Braham (1948). Cuando estos acumulados son de 30 mm en un intervalo de tiempo inferior o igual a una hora, las lluvias pueden ser clasificadas como lluvias localmente intensas de corta duración.

Las lluvias localmente intensas de corta duración, aunque no están consideradas dentro de las Tormentas Locales Severas (TLS), definidas por Alfonso (1994), causan notables impactos negativos a las infraestructuras sociales y la seguridad humana. Incluso este investigador se refirió a la importancia que se les debía dar a la hora de hacer una clasificación y en correspondencia con ello analizó algunos casos de grandes precipitaciones en Cuba.

Tanto los eventos locales severos como las lluvias localmente intensas de corta duración, que pertenecen a la  $\alpha$  - micro escala (Orlanski, 1975), son eventos

discretos tanto espacial como temporalmente. Desde el punto de vista conceptual, se puede plantear que “el conjunto de procesos que intervienen en la generación, desarrollo y disipación de los eventos severos, incluyendo a las lluvias localmente intensas de corta duración, se pueden agrupar solo en tres condiciones necesarias y una condición suficiente” (Carnesoltas, 2019). Con este enfoque, se ha venido planteando que “cada uno de los eventos severos podrá desarrollarse si, y solo si, el conjunto de variables continuas que intervienen en cada condición necesaria, se encuentra de manera simultánea dentro de determinados rangos de valores” (Carnesoltas *et al.*, 2013; Rojas & Carnesoltas, 2013). En la tercera condición, se incluyen todos los procesos que liberan, en un breve plazo, la energía acumulada en los niveles medios dentro de la tormenta, que se manifestará en la superficie terrestre como un evento local severo. La condición suficiente es la simultaneidad espacio-temporal de las tres condiciones necesarias” (Carnesoltas, 2019). Para lograr un futuro pronóstico de las lluvias localmente intensas de corta duración en las TE las investigaciones deben estar dirigidas a resolver la tercera condición, o sea, determinar cuáles son los factores físico-meteorológicos que interaccionan y generan un acumulado igual o mayor a 30 mm en una hora de duración en superficie y, en consecuencia, una lluvia localmente intensa de corta duración.

### Factores físico-meteorológicos que influyen en la intensidad de la lluvia

Doswell *et al.* (1996) estableció que la cantidad de lluvia por unidad de área depende de la intensidad con la que cae y de la duración de la lluvia. La intensidad de la lluvia proveniente de una nube de tormenta depende de diferentes factores y procesos termodinámicos que ocurren en los niveles medios troposféricos, dentro de los que se pueden mencionar:

- Masa de agua precipitable
- Magnitud de la corriente descendente
- Organización de la corriente ascendente y descendente
- Altura de la isoterma de 0° C del bulbo húmedo

### Masa de agua precipitable

Los procesos de condensación, deposición y congelamiento se efectúan cuando hay un desprendimiento de energía, disminuyendo la energía interna y la temperatura de las partículas que cambian de fase, lo que provoca que los enlaces de las moléculas se fortalezcan, acercando y compactando las mismas. Con ello ocurren las transformaciones de vapor a líquido, de vapor a sólido y de líquido a sólido (Stull, 2015). Cualquier lluvia en una región es

producida por el vapor de agua que se condensa, por lo que, la intensidad de la lluvia puede ser medida a través de la tasa de calor latente liberado durante la condensación.

### **Organización de las corrientes ascendente y descendente**

“En el caso especial de la lluvia localmente intensa de corta duración (con muy baja frecuencia de ocurrencia con respecto a los otros eventos severos dentro de las TLS), el proceso de formación de la corriente descendente dentro de la nube convectiva parece ser algo diferente. En vez de organizarse la corriente descendente a un lado de la ascendente, deberá ocurrir sobre la misma, ya sea por el debilitamiento de la que asciende, o por un incremento excesivo de la masa de agua, de los granizos y del hielo dentro de la nube, o ambas causas a la vez” (Carnesoltas, 2019).

Con un valor de cizalladura igual a cero la corriente descendente arrastrará las gotas de lluvia sobre la misma corriente ascendente experimentando una resistencia en este movimiento, provocada por la misma. Con un valor de cizalladura del viento mayor que cero y menor que cierto valor crítico, la corriente ascendente estará poco inclinada con respecto al eje vertical de la tormenta y la corriente descenderá verticalmente a un lado y muy cerca de la ascendente, provocando una mayor advección de gotas de lluvia hacia la superficie, sin experimentar la resistencia de la corriente ascendente durante la caída. Si la cizalladura vertical supera cierto valor crítico, valor que depende del entorno y de factores termodinámicos, la corriente descendente estará muy separada de la ascendente y las gotas de lluvia se dispersarán en un radio muy grande provocando que la intensidad de la precipitación disminuya.

### **Magnitud de la corriente descendente. Capa seca en niveles medios**

Una gran magnitud de la corriente que desciende de la nube de tormenta arrastrando gotas de lluvia, aire y granizos provocará una mayor advección de estos hacia la superficie. Se conoce que “la fuerza de la corriente descendente se fortalece por la existencia y/o advección de aire relativamente seco con el consiguiente enfriamiento por evaporación; así como por el refuerzo por la gran cantidad de agua líquida por unidad de volumen, el tamaño pequeño de la gota, un gradiente vertical fuerte” (Kamburova & Ludlam, 1966; Srivastava, 1985) y además por la absorción de calor latente por evaporación y fusión (Moncrieff & Green, 1972).

Según Carnesoltas (2019) “si ocurren los procesos de enfriamiento evaporativo con diferentes intensidades, y simultáneamente actúa el simple efecto

de la gravedad por debajo de la altura de la isoterma de 0 °C del bulbo húmedo (wbz), actuarán ambas velocidades descendentes provocando una advección mayor de gotas de lluvia, o de granizos, o de masa de aire frío, aunque nunca las tres al mismo tiempo”.

### **Altura de la isoterma de 0 °C del bulbo húmedo**

“Los granizos permanecen en equilibrio con la tensión del vapor de agua a temperaturas inferiores a 0 °C del bulbo húmedo, o sea, cuando se encuentran por encima del wbz, y en su descenso al atravesar este nivel, comenzarán un gradual cambio de fase con la energía del entorno, hacia gotas de nube y de lluvia. Simultáneamente, el agua líquida sufrirá durante la caída otro cambio de fase hacia vapor de agua. A un mayor wbz, menor probabilidad existirá que los granizos alcancen la superficie de la tierra sin haberse derretido totalmente alcanzándola en estado líquido y una mayor cantidad de lluvia llegará a la superficie aún sin evaporarse” (Carnesoltas, 2019). Las profundas nubes que se extienden por encima de la isoterma de 0°C del bulbo húmedo incentivan el proceso de colisión coalescencia, lo que implica mayor intensidad de la lluvia y mayor eficiencia de la precipitación.

Teniendo en cuenta los antes planteado y para avanzar en un futuro pronóstico de las lluvias localmente intensas de corta duración en las TE esta investigación tiene como objetivo principal: Identificar cuáles son los factores físico-meteorológicos que interaccionan y generan un acumulado igual o mayor a 30 mm en una hora de duración en superficie y, en consecuencia, una lluvia localmente intensa de corta duración.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

En esta investigación se seleccionó el estudio de casos como vía para realizar un proceso de análisis e indagación de situaciones de lluvia localmente intensa, partiendo del entendimiento de las condiciones físicas que generaron estos eventos. Esto se obtuvo a través de la descripción y el análisis de las situaciones mediante análisis sinóptico, por las imágenes de satélite y a través de una serie de factores obtenidos a partir de los modelos meteorológicos, por ser una de las herramientas más utilizadas por los operativos del Centro de Pronóstico Nacional.

La investigación se realizó para las provincias de La Habana, Artemisa y Mayabeque. En estas provincias, la digitalización de 8 pluviogramas de la Red de Estaciones Meteorológicas Nacional entre los años 2011 y 2019 como parte de una investigación científica desarrollada en el Instituto Técnico Militar “José Martí” (ITM), permitió la selección los casos de estudio de eventos de lluvia localmente intensa de corta duración. Se tomaron aquellos casos donde

los acumulados de precipitaciones eran iguales o superiores a 30 mm en una hora o menos de duración. Otra parte de los casos se seleccionó, revisando en la BD de reportes de Tormentas Locales Severas y la BD del Centro del Clima los acumulados de precipitación con el intervalo de tiempo de la medición y hallando la intensidad media de la precipitación para una hora. Además de estos casos de lluvia intensa, se seleccionaron para su comparación otros de TE que no provocaron acumulados de precipitación significativos, para establecer un análisis de la tercera condición necesaria para las manifestaciones de severidad según lo planteado por Carnesoltas (2019). Estos días con intensidades medias de la precipitación inferiores a 30 mm/h se escogieron cercanos a los casos ya seleccionados de lluvia localmente intensa de corta duración para la misma estación. Esto garantizó que, tanto los cambios en el terreno como los cambios estacionales no fueran factores que influyeran en la variación de las condiciones.

Partiendo de las condiciones expuestas anteriormente se dispuso de 10 días para el estudio de casos, es decir 5 donde estuvo presente el fenómeno de lluvia localmente intensa de corta duración (TEC) y cinco donde este fenómeno no estuvo presente (TES). Estos casos estuvieron comprendidos entre el 2017 y el 2019, disponiendo para cada caso imágenes de satélite y corridas del Modelo de Investigación y Pronóstico del Tiempo (WRF, por sus siglas en inglés), bajo el Sistema de Predicción Inmediato (SisPI). Las tablas 1 y 2 muestran los días seleccionados.

### Herramientas y metodología a utilizar en la investigación

Para definir las configuraciones sinópticas que produjeron lluvias localmente intensas de corta duración, se emplearon las series del archivo mundial de datos del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR, por sus siglas en inglés) y del Centro Nacional de Predicción del Tiempo

(NCEP, por sus siglas en inglés), disponibles en el sitio web: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/omposites/hours>. Se escogieron los campos de presión al nivel medio del mar y de alturas de geopotencial en 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa y 200 hPa en forma de una matriz limitada horizontalmente entre los 60° y 100° W y los 10° y 40° N que abarca toda el área correspondiente a Cuba y mares adyacentes.

Para determinar las condiciones a mesoescala bajo las cuales se formaron las tormentas que generaron lluvias localmente intensas de corta duración se emplearon las imágenes del satélite GOES 13 en los canales visible e infrarrojo, en dependencia de los horarios en que se produjeron las tormentas. Las imágenes se extrajeron del sitio web: <https://www.bou.class.noaa.gov/saa/products/welcome> con una resolución temporal de 10 min.

### Sistema de Pronóstico Inmediato

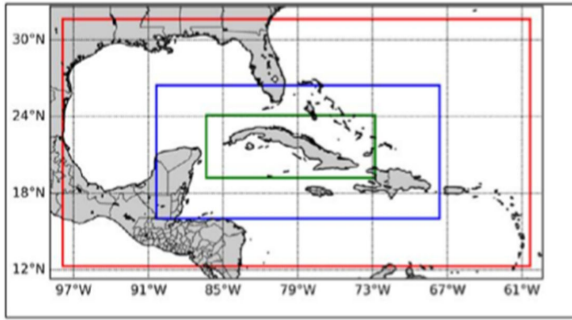
Otra herramienta utilizada en esta investigación fue las salidas numéricas proporcionadas a partir del Sistema de Pronóstico Inmediato (SisPI). Con estas salidas se obtuvieron las variables primarias, a partir de las cuales se determinaron otras secundarias que fueron utilizadas en la determinación de los valores de los factores físico-meteorológicos. Este sistema fue desarrollado por el Centro de Física de la Atmósfera del INSMET y tiene como objetivo esencial la predicción a corto plazo de los diferentes procesos atmosféricos. Según Sierra *et al.* (2017): “el SisPI tiene en su base el modelo atmosférico WRF en su versión 3.5. Este sistema es inicializado con los datos del Global Forecast System (GFS) de 0.5 grados de resolución espacial y tiene cuatro actualizaciones diarias (0000, 0600, 1200 y 1800 UTC) de su pronóstico con una actualización trihoraria de las condiciones de frontera laterales. Cuenta con tres dominios de simulación con resoluciones de 27, 9 y 3 km (figura 1), con un horizonte de pronóstico de 24 horas para el dominio de 3 km y de 72 horas para los dominios de 27 y 9 km”.

**Tabla 1.** Días con tormentas eléctricas que generaron lluvias localmente intensas de corta duración.

Fecha	Provincia	Estación	Nombre	Acum. total (mm)	Intensidad (mm/h)
18/4/2017	La Habana	78373	Santiago de las Vegas	46,0	46,0
8/6/2017	Mayabeque	78340	Bainoa	130,4	43,5
8/6/2017	Mayabeque	78374	Tapaste	96,8	48,4
4/4/2019	Mayabeque	78323	Güines	70,0	70,0
10/7/2019	Artemisa	78318	Bahía Honda	7,8	52,0

**Tabla 2.** Días con tormentas eléctricas que no generaron lluvias localmente intensas de corta duración.

Fecha	Provincia	Estación	Nombre	Acum. total (mm)	Intensidad (mm/h)
20/4/2017	La Habana	78373	Santiago de las Vegas	40,0	20,0
7/6/2017	Mayabeque	78340	Bainoa	5,7	4,6
7/6/2017	Mayabeque	78374	Tapaste	8,1	4,1
5/4/2019	Mayabeque	78323	Güines	6,8	6,8
5/7/2019	Artemisa	78318	Bahía Honda	7,8	7,8



**Figura 1.** Dominios de simulación empleados en el Sistema de Predicción Inmediato. El borde rojo delimita el dominio de 27 km, el azul el de 9 km y el verde interior el de 3 km de resolución (tomado de Sierra *et al.*, 2017).

En la presente investigación se utilizó el dominio de 3 km. Se dispuso de datos horarios con inicializaciones a las 0000 UTC para los días en que las tormentas ocurrieron en horas de la tarde hasta las 0000 UTC del día posterior y a las 1200 UTC para aquellos días en que las tormentas ocurrieron después de las 0000 UTC del día posterior. Estas condiciones se tomaron para evitar que el horario de evolución de la tormenta que generó los eventos de lluvia intensa se encontrara en el tiempo de acople del modelo numérico que es de 12 horas según Sierra *et al.* (2017).

A partir de estas salidas se obtuvieron las variables primarias: temperatura potencial (K), componentes del viento zonal, meridional y vertical (m/s), razones de mezcla del vapor de agua, del agua líquida y del hielo (g/Kg) para todos los niveles verticales antes mencionados. Con ellas se determinaron otras variables secundarias que fueron utilizadas en la determinación de los factores físico-meteorológicos que influyeron en la intensidad de la precipitación, las cuales se mencionan a continuación:

- Contenido total de agua precipitable

$$dw = \frac{rt}{g \cdot \rho_l} (P1 - P2) \quad (1)$$

Donde  $rt$  es el promedio de la razón de mezcla en la columna,  $\rho_l$  es la densidad del agua líquida que es  $1000 \text{ kg/m}^3$  y la aceleración de la gravedad es  $g$  igual a  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Para una columna donde  $rt$  varíe con la altura, se determinan los promedios de razón de mezcla de cada capa y se suman.

- Cizalladura vertical

$$\Delta v = \frac{\Delta u^2 + \Delta v^2}{\Delta z} \quad (2)$$

Donde  $u$  y  $v$  son las componentes zonal y meridional del viento, respectivamente y  $z$  la altura de cada capa.

- Magnitud de la corriente descendente

$$DCAPE = g \int_{z=0}^{zNDL} \frac{\theta_{vp} - \theta_{ve}}{\theta_{ve}} dz \quad (3)$$

Donde  $zNDL$  es la altura del NDL, que no es más que el nivel donde el aire que rodea la precipitación comienza a tener flotabilidad negativa comparado con el aire del entorno y desciende,  $\theta_{vp}$  es la temperatura potencial virtual de la parcela,  $\theta_{ve}$  es la temperatura potencial virtual del entorno y  $z$  la altura de cada nivel.

La DCAPE también se puede determinar por el área entre el perfil de temperatura y la adiabática saturada de la parcela que desciende. En este caso, se determinó como nivel de descenso libre aquel en los niveles medios (300 - 600 hPa) donde la humedad relativa era mínima, ya que constituye el nivel donde se produce la mayor evaporación e inyección de flotabilidad negativa.

La velocidad máxima de la corriente se puede estimar mediante:

$$wmaxd = -\sqrt{2DCAPE} \quad (4)$$

- Altura de la isoterma  $0^\circ\text{C}$  del bulbo húmedo

Para el cálculo de la altura de la isoterma de  $0^\circ\text{C}$  de la temperatura del bulbo húmedo ( $wbz$ ) fue necesario calcular la temperatura del bulbo húmedo en cada nivel de presión por un método lineal a partir de la expresión determinada por Carnesoltas (2019), a partir de las tablas psicrométricas que se usan en el INSMET, y que a su vez están calculadas a partir de las tablas Smithsonianas de 1953.

La altura de la isoterma  $0^\circ\text{C}$  del bulbo húmedo ( $wbz$ ) se puede calcular a partir de la siguiente fórmula:

$$wbz = h(1) + (h(2) - h(1)) \left( \frac{tw(1)}{tw(1) - tw(2)} \right) \quad (4)$$

Donde  $h(1)$  es la altura del nivel 1 con  $tw(1)$  y  $h(2)$  es la altura del nivel 2 con  $tw(2)$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para determinar las condiciones que a escala sinóptica fueron favorables para la ocurrencia de TE que generaron lluvias localmente intensas de corta duración, se identificaron primeramente los sistemas sinópticos que mantuvieron una influencia sobre la región de estudio. Se tuvo en cuenta para ello los patrones encontrados por Fernández & Díaz (2005), así como los de Orbe & Barcia (2007), investigaciones en las que se identificaron las configuraciones sinópticas desde superficie hasta los niveles medios y altos de la tropósfera que favorecieron la generación

de lluvias intensas, principalmente en la región occidental del país, desde Artemisa hasta Mayabeque. De esta forma quedaron identificadas tres situaciones sinópticas fundamentales divididas en dos grupos:

- Grupo I: Vaguada en niveles medios y altos de la tropósfera.
- Grupo II: Componente meridional occidental del anticiclón subtropical del Atlántico sobre la región occidental de Cuba y un frente frío en el sudeste del golfo de México.

A excepción de los casos de TE que se produjeron en abril de 2017 y de 2019, donde Cuba se encontró bajo la influencia anticiclónica migratoria continental, las demás tormentas ocurrieron bajo la débil influencia del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte, cuyo centro se encontraba retirado hacia el Atlántico oriental. En niveles bajos de la tropósfera el flujo del viento predominó del sudeste al suroeste en los casos de TE generadoras de lluvias localmente intensas de corta duración. Durante las TE no generadoras de estos eventos el flujo que predominó en niveles bajos de la tropósfera fue del sur-sudeste al sur-suroeste. Este flujo, en ambos casos, contribuyó a la advección de calor y humedad desde el mar Caribe y permitió el incremento de la humedad relativa en estos niveles, una de las condiciones que propuso Carnesoltas *et al.*, (2013) para las manifestaciones de severidad en las tormentas.

Según el análisis de las imágenes de satélite, en la mayoría de los casos, tanto de TEC como de TES analizados estuvieron presentes desde horas tempranas de la mañana los Rollos Convectivos Horizontales (HCRs, por sus siglas en inglés) a lo largo del flujo medio de la capa fronteriza atmosférica. La interacción de dichas estructuras coherentes con el frente de brisas de mar garantizó el levantamiento hasta el nivel de convección libre (NCL), lo que resultó ser el detonador principal para la convección profunda y organizada en el borde delantero de dicho frente hacia horas de la tarde, coincidiendo con lo planteado por Carnesoltas (2002) y Varela (2017). Sin embargo, en cinco casos, las tormentas se generaron a partir de los frentes de rachas de las tormentas en disipación, lo que también constituye una de las causas del inicio de la convección en las tardes (Varela, 2017).

### Comprobación de los posibles factores que influyen en la intensidad de la precipitación

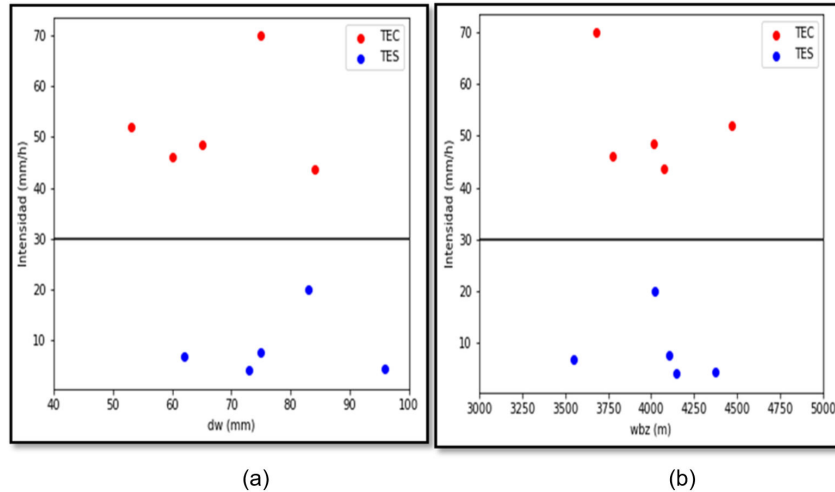
Se calcularon para cada caso de estudio de TEC y TES los factores físico-meteorológicos expuestos anteriormente y se realizó una comparación gráfica entre ellos. En la figura 2 la línea negra horizontal representa el valor crítico de la intensidad media de la precipitación, teniendo en cuenta los casos analizados, que tiene un valor de 30 mm/h.

Los primeros factores analizados fue el contenido total de agua precipitable (figura 2a) y altura de la isoterma de 0°C del bulbo húmedo (figura 2b). Ninguno de estos factores discriminó correctamente la generación de lluvias localmente intensas de corta duración. Los valores del contenido de agua precipitable en todos los casos analizados (tanto los de lluvia intensa como los que no) oscilaron entre 52.9 y 96.2 mm, valores muy superiores a los acumulados de precipitación registrados en superficie. Esto evidencia que todas las tormentas fueron capaces de contener grandes acumulados de agua líquida, producto a las fuertes corrientes ascendentes que transportaron las gotas de agua a las porciones superiores de la nube y tuvieron suficiente contenido total de agua precipitable para generar acumulados significativos en superficie.

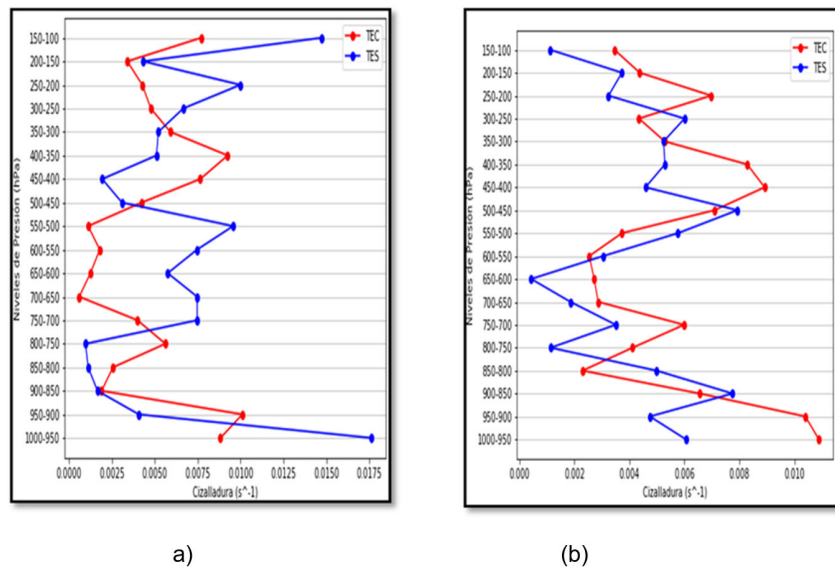
En el caso de la altura de la isoterma 0°C del bulbo húmedo, en todas las tormentas analizadas esta se encontró encima a los 3 551,5 m, como se observa en la figura 2b. Hasta estas alturas las gotitas nubosas alcanzan un tamaño relativamente grande mediante el proceso de condensación, porque la tasa de aumento del radio de las gotitas decrece con el tiempo. Las gotitas nubosas calientes crecen y forman precipitación a través del proceso de colisión y coalescencia. Las gotitas más grandes caen por gravedad a través de las gotitas pequeñas y crecen a medida que chocan y se incorporan a ellas. A través de este proceso se favorece la eficiencia de la precipitación, lo que permite que se incremente también los acumulados en superficie. Sin embargo, no se determinó un valor crítico de este factor para la generación de lluvias localmente intensas de corta duración.

La organización de las corrientes ascendente y descendente se determinó a partir del análisis de la cizalladura vertical del viento horizontal. Para ello, se calcularon los valores de cizalladura para cada nivel desde 1000 hasta 100 hPa en intervalos de 50 hPa. Se graficaron estos valores en los casos de TEC junto a los casos de TES. Los resultados correspondientes a los casos de los días 20 y 18 de abril de 2017, así como a los del 4 y 5 de abril de 2019 se muestran en la figura 3a y 3b, respectivamente.

El análisis de la cizalladura vertical del viento arrojó valores de máxima cizalladura vertical en niveles muy bajos de la tropósfera hasta los 850 hPa, tanto en las TES como en las TEC, lo que pudo influir en el flujo de entrada de las celdas convectivas. Otros niveles de gran cizalladura se encontraron entre 450 hPa y 200 hPa en las TEC y entre 550 hPa y 250 hPa para los casos de TES. Esto estuvo relacionado con la presencia de fuertes corrientes en niveles superiores de la tropósfera que posibilitaron cierta estabilidad en las capas bajas de la misma. Los valores mínimos de cizalladura vertical del viento tanto en casos de TEC como de TES se encontraron en niveles entre 850 hPa y 400 hPa.



**Figura 2.** Relación entre el contenido total de agua precipitable en toda la nube y la intensidad media de la precipitación para una hora (a), Relación entre wbz y (b) la intensidad media de la precipitación para una hora



**Figura 3.** Comportamiento de la cizalladura vertical del viento por niveles para (a) las tormentas de los días 20 y 18 de abril de 2017, b) las tormentas de los días 4 y 5 de abril de 2019

El comportamiento anterior de la cizalladura vertical del viento fue favorable para la formación de celdas ordinarias, en las que la corriente descendente rápidamente interactuó con la ascendente, reemplazándola y disipando la tormenta. Esta débil cizalladura vertical del viento permitió que las corrientes ascendentes estuvieran poco inclinadas con respecto a los ejes verticales de las tormentas y las corrientes descendieran verticalmente a un lado y muy cerca de las ascendentes, provocando una mayor advección de gotas de lluvia hacia la superficie, sin experimentar las resistencias de las corrientes ascendentes durante la caída. Sin embargo, este factor no resultó discriminante en la generación de lluvias localmente intensas.

Un factor que pudo provocar una mayor advección de gotas de lluvia hacia la superficie terrestre fue que la corriente descendente tuviera una gran magnitud.

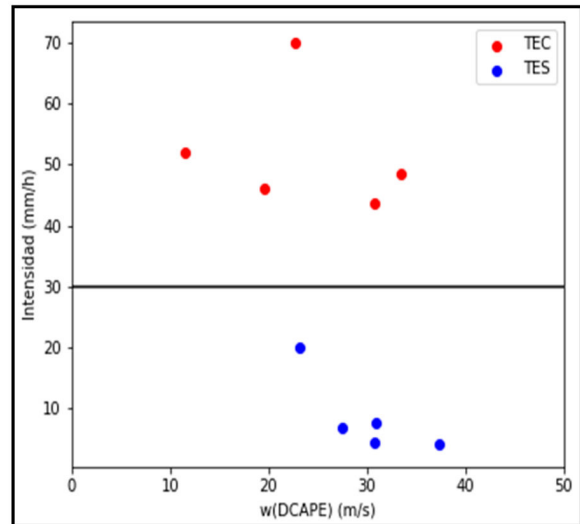
Por esto, se analizó la relación de esta velocidad, obtenida a partir de la DCAPE, con la intensidad media de la precipitación para una hora. Este factor no resultó discriminante igualmente para la ocurrencia de lluvia localmente intensa de corta duración (figura 4). Las velocidades de las corrientes descendentes en las tormentas analizadas tuvieron valores desde 11,5 m/s hasta 37,3 m/s.

### Distribución vertical de la humedad relativa

A partir de los datos del SisPI, se realizaron cortes verticales zonales y meridionales de la variable humedad relativa en los puntos donde se produjeron las TEC y las TES. A partir del análisis de la humedad relativa se encontró un marcado contraste entre los niveles bajos y medios de la tropósfera en todos los casos, predominando valores superiores a 80 % desde superficie hasta 700 hPa en cuatro

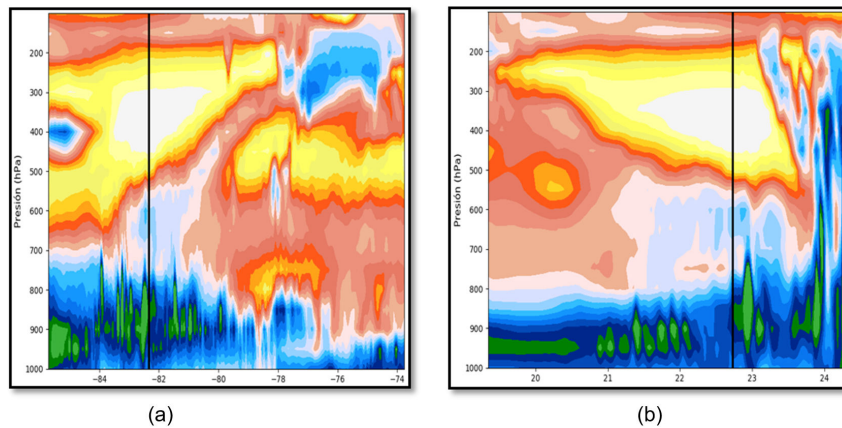
casos de TEC, condición necesaria para la formación de convección profunda e incluso severidad dentro de ella (Carnesoltas *et al.*, 2013). Por otra parte, una extensa capa seca estaba presente desde los 600 hPa hasta los niveles superiores, con valores de humedad relativa inferiores a 50%, alcanzando en tres casos valores de hasta prácticamente 0% en un área extensa. Estos bajos valores de humedad relativa en una profunda capa de la tropósfera favorecieron la absorción de calor latente por evaporación y fusión, lo que aceleró las corrientes descendentes y provocó una mayor advección de gotas de agua hacia la superficie. En contraste con los otros cuatro casos de TEC, el día 10 de julio de 2019, esta capa seca se extendió a partir de los 400 hPa. Esta TEC correspondió a la de menor velocidad de la corriente descendente, sin embargo, generó una lluvia localmente intensa de corta duración.

En los casos de TES la capa seca se extendió también desde los 600 hPa, con valores de humedad relativa por debajo de 50%. En solo un caso esta capa seca se extendió a partir de los 500 hPa y en solo dos casos alcanzaron valores de 0% en un área

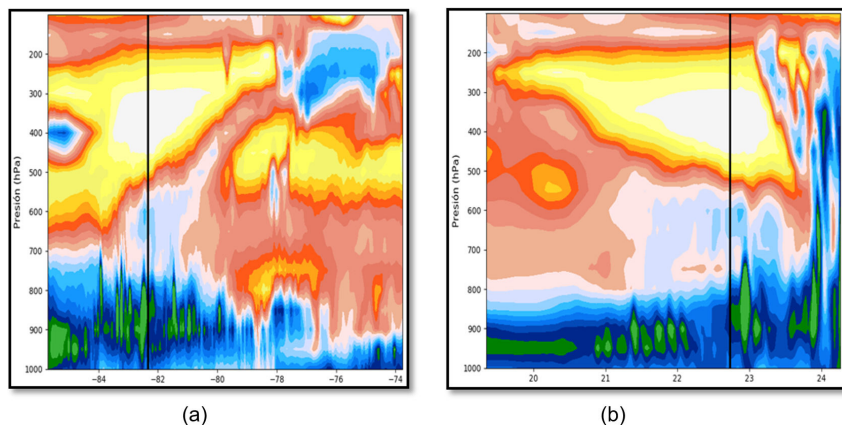


**Figura 4.** Relación entre w(DCAPE) y la intensidad media de la precipitación para una hora

extensa. Los cortes verticales de dos ejemplos, que corresponden a una TEC y una TES, respectivamente, se muestran en la [figura 5](#) y [6](#).



**Figura 5.** Distribución vertical de la humedad relativa a partir del Sistema de Predicción Inmediato. Caso de tormenta eléctrica sin lluvia intensa del 7 de junio de 2017 a) Corte meridional y b) Corte zonal



**Figura 6.** Distribución vertical de la humedad relativa a partir del Sistema de Predicción Inmediato. Caso de tormenta eléctrica con lluvia localmente intensa del 8 de junio de 2017: a) Corte meridional b) Corte zonal. La línea negra vertical representa la posición de la tormenta



## CONCLUSIONES

A partir de la muestra de estudio y bajo las consideraciones tenidas en cuenta para el desarrollo de los experimentos se puede arribar a las siguientes conclusiones:

- Los factores físico-meteorológicos en el entorno de los niveles medios de la tropósfera, que influyen en la intensidad de la precipitación, pero no logran discriminar la generación de lluvias localmente intensas de corta duración son: el contenido total de agua precipitable, la organización de la corriente ascendente y descendente, la velocidad de la corriente descendente y la altura de 0°C del bulbo húmedo.
- Los factores que influyen en la duración de la lluvia y discriminaron correctamente la generación de lluvias localmente intensas de corta duración fueron: la longitud en dirección al desplazamiento del sistema nuboso y el número de celdas convectivas.

## REFERENCIAS

- Alfonso, A. P. (1994). "Climatología de las tormentas locales severas de Cuba". La Habana: Ed. Academia, 1994, 168 pp. ISBN: 959-02-0060-5, consulted: abril 2022.
- Byers, H.R. & Braham, R. R. (1948). "Thunderstorm Structure and Circulation". U.S. Weather Bureau. *Journal of Meteorology*, Vol.5. No. 3: 71-86 pp.
- Carnesoltas, M. (2002). "La brisa de mar y tierra. Conceptos fundamentales". *Revista Cubana de Meteorología*, 9(1): 39-60 pp. ISSN: 0864-151X.
- Carnesoltas, M.; Sierra, M.; Rabelo, D. & Fernández, E. (2013). "Factores físicos que influyen en la caída de granizos y en las aeroavalanchas sobre Cuba". *Informe de Resultado*. Instituto de Meteorología, 65 pp.
- Carnesoltas, M. (2019). "Tormentas locales severas. Tres condiciones necesarias". *Revista Cubana de Meteorología*. Vol. 15, No. 1, 2019. E-ISSN: 0864-151X
- Doswell, C. A.; Brooks, H. E. & Maddox, R. A. (1996). "Flash Flood Forecasting: An Ingredients-Based Methodology". *Weather and Forecasting*, 11, 560-581. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1996\)011%3C0560:FFFAIB%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1996)011%3C0560:FFFAIB%3E2.0.CO;2)
- Fernández, A. J. & Díaz, Y. (2005). "Catálogo de los Procesos Sinópticos del Archipiélago Cubano en el período 1979-1993". *Editorial Academia*, pp. 167.
- Kamburova, P. L. & Ludlam, F. H. (1966). "Rainfall evaporation in thunderstorm downdraughts". *Amer. Meteor. Soc.*, (92):510-518.
- Moncrieff, M. W. & Green, J. S. (1972). "The propagation of steady convective overturning in shear". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, (98):336-352.
- Monjo, R. (2010). "El índice n de la precipitación intensa". [www.Divulgameteo.Es](http://www.Divulgameteo.Es). Retrieved from <http://divulgameteo.es/uploads/Indice-n.pdf>. Consulted: Agosto 2022.
- OMM, (1992). *Vocabulario Meteorológico Internacional*. Organización Meteorológica Mundial, No. 182, Ginebra, 784 pp.
- Orbe, G. & Barcia, S. (2007). "Patrones sinópticos que generan días con lluvias localmente intensas en la mitad occidental de Cuba. Distribución temporal y espacial de las mismas". *Memorias IV Congreso Cubano de Meteorología*, Ciudad de La Habana, pp. 13.
- Orlanski, I. (1975). "A rational subdivision of scale for atmospheric processes". *Bull. Met. Soc.*, Vol. 65. No.1: 527-530pp.
- Planos, E., Limia, M. & Vega, R. (2004). "Intensidad de las precipitaciones en Cuba". *Resultado Científico*. Programa Ramal: "Análisis y pronóstico del tiempo y el clima terrestre y espacial". 80 pp.
- Rivero, R., Antuña, J. C. & Pérez, C. A. (1981). "Climatología sinóptica de las lluvias de más de 100 mm en el territorial Camagüey - Ciego de Ávila". *Boletín Científico Técnico*, (5).
- Rojas, Y. & Carnesoltas, M. (2013). "Configuraciones típicas que adoptan los campos de viento y temperatura a meso escala en la región oriental bajo la influencia de los patrones a escala sinóptica favorables para las tormentas locales severas". *Informe de Resultado*. Instituto de Meteorología, p. 116.
- Sierra, M.; Borrajero, I., Ferrer, A.; Morfa, Y.; Morejón, Y. & Hinojosa, M. (2017). Estudios de sensibilidad del SisPI a cambios de la PBL, la cantidad de niveles verticales y las parametrizaciones de microfísica y cúmulos, a muy alta resolución. Informe Científico de resultado, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba, 26 p., DOI: <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.29136.0005>, Available: [https://www.researchgate.net/publication/325050959\\_Estudios\\_de\\_sensibilidad\\_del\\_SisPI\\_a\\_cmbios\\_de\\_la\\_PBL\\_la\\_cantidad\\_de\\_niveles\\_verticales\\_y\\_las\\_parametrizaciones\\_de\\_microfísica\\_y\\_cumulos\\_a\\_muy\\_alta\\_resolucion](https://www.researchgate.net/publication/325050959_Estudios_de_sensibilidad_del_SisPI_a_cmbios_de_la_PBL_la_cantidad_de_niveles_verticales_y_las_parametrizaciones_de_microfísica_y_cumulos_a_muy_alta_resolucion), [Consulted: August 10, 2022].
- Srivastava, R. C. (1985). "A simple model of evaporatively driven down draft: Application to microburst downdraft". *J. Atmos. Sci.*, (42):1004-1023. DOI: [http://doi.org/10.1175/1520-0469\(1985\)0422.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0469(1985)0422.0.CO;2).
- Stull, R. (2015). "Practical meteorology: An algebra-based survey of atmospheric science". *Dept. of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences*, University of British Columbia. 939 pp. ISBN-13: 978-0-88865-176-1, Available: [http://www.eos.ubc.ca/books/Practical\\_Meteorology/](http://www.eos.ubc.ca/books/Practical_Meteorology/)
- Varela, A. (2017). "Factores que intervienen en la formación de tornados en la región occidental de Cuba". *Tesis presentada en opción al grado de Máster en ciencias meteorológicas*. La Habana, pp. 102. [Consulted: March 15, 2022].

Beatriz Valdés Díaz. Oficina Principal y de Vigilancia Meteorológica. Empresa Cubana de Navegación Aérea. E-mail: [beatrizvaldesdiaz9@gmail.com](mailto:beatrizvaldesdiaz9@gmail.com)

Alis Varela de la Rosa. Centro de Pronósticos. Instituto de Meteorología. E-mail: [alis.varela@insmet.cu](mailto:alis.varela@insmet.cu)

Mario Carnesoltas Calvo. Centro de Física de la Atmósfera. Instituto de Meteorología. E-mail: [alis.varela@insmet.cu](mailto:alis.varela@insmet.cu)

José Ángel Calzadilla Pérez. Oficina Principal y de Vigilancia Meteorológica. Empresa Cubana de Navegación Aérea. E-mail: [JCalzadilla@iingen.unam.mx](mailto:JCalzadilla@iingen.unam.mx)