

# Factores físicos significativos que generan aeroavalanchas identificados a partir del Sistema de Pronóstico Inmediato



<https://eqrcode.co/a/9Esrbn>

## Significant physical factors that generate downburst identified from the Sistema de Pronóstico Inmediato

✉ Gleisis Alvarez Socorro<sup>1\*</sup>, ✉ Mario Carnesoltas Calvo<sup>1</sup>, ✉ Alis Varela de la Rosa<sup>1</sup>,  
✉ José Carlos Fernández Alvarez<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Meteorología, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de la Habana, Cuba

<sup>2</sup>Centro de Investigación Mariña, Universidade de Vigo, Environmental Physics Laboratory (EPhysLab), Campus As Lagoas s/n, Ourense, 32004, Spain.

**RESUMEN:** Una de las manifestaciones de las Tormentas Locales Severas son las aeroavalanchas, las cuales pueden producir grandes pérdidas a la economía del país y a la sociedad en general. El objetivo de esta investigación fue identificar los factores físicos significativos que generaron aeroavalanchas a partir del Sistema de Pronóstico Inmediato (SisPI). Se seleccionaron como estudios de casos, cinco días con reportes de aeroavalancha y cinco días cercanos a estos en los cuales se produjo tormenta eléctrica sin severidad, de manera de poder comparar las condiciones existentes en el entorno en ambos casos. Para ello se tuvieron en cuenta una serie de factores físicos significativos propuestos por investigaciones anteriores. A partir del empleo de las salidas numéricas del SisPI, con 3 km de resolución espacial, se pudo obtener una mejor representación de los procesos físicos preexistentes en la nube de tormenta que generaron las aeroavalanchas. Los factores que discriminaron entre ambas tormentas fueron la absorción de calor latente por evaporación y fusión, la diferencia de temperatura potencial equivalente entre el nivel de máxima humedad en los niveles bajos y de mínima humedad en los niveles medios, la velocidad de la corriente descendente y la Energía Potencial Convectiva Disponible de la corriente descendente (DCAPE, por sus siglas en inglés). A diferencia de investigaciones anteriores, discriminaron además la flotabilidad y la advección de energía, ambos en los niveles medios de la tropósfera.

**Palabras claves:** Aeroavalancha, corriente descendente, factores físicos, SisPI.

**ABSTRACT:** One of the manifestations of Severe Local Storms are the downbursts, which can cause great losses to the country's economy and society in general. The objective of this research was to identify the significant physical factors that generated downburst from the Sistema de Pronóstico Inmediato (SisPI). Five days with reports of downbursts and five days close to these were selected as case studies in which an electrical storm occurred without severity, in order to be able to compare the existing conditions in the environment in both cases. To this end, a series of significant physical factors proposed by previous research were taken into account. From the use of the numerical outputs of the SisPI, with 3 km of spatial resolution, it was possible to obtain a better representation of the pre-existing physical processes in the storm cloud that generated the downbursts. The factors that discriminated between the two storms were the absorption of latent heat by evaporation and fusion, the difference in equivalent potential temperature between the level of maximum humidity in the low levels and of minimum humidity in the middle levels, the speed of the downdraft and Downdraft Available Convective Potential Energy (DCAPE). Unlike previous research, they also discriminated buoyancy and energy advection, both at the middle levels of the troposphere.

**Key words:** Downburst, downdraft, physical factors, SisPI.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las Tormentas Locales Severas (TLS) son consideradas como uno de los fenómenos más peligrosos dentro de la mesoescala. La necesidad de predecirlas ha aumentado en las últimas décadas tratando de mitigar el impacto social que tienen, pues son capaces de producir pérdidas de vidas humanas y grandes daños

económicos y materiales. Una de las manifestaciones de severidad en las TLS son los vientos lineales horizontales fuertes (más de 25 m/s), a lo largo de una línea que se desplaza por la superficie terrestre denominada Frente de Racha. Esta masa de aire se debe a la corriente fría descendente de la nube de tormenta conocida en Cuba como aeroavalancha (AA).

\*Autor para correspondencia: Gleisis Alvarez Socorro. E-mail: [galvarez@instec.cu](mailto:galvarez@instec.cu), [gleisis1998@gmail.com](mailto:gleisis1998@gmail.com)

Recibido: 04/01/2021

Aceptado: 23/07/2021

El pronóstico de las AAs, que afectan un área muy pequeña y su surgimiento, desarrollo y disipación puede ocurrir en un período muy corto de tiempo, continúa siendo una tarea de gran preocupación para los especialistas en meteorología. Hasta el momento, prevenir su ocurrencia con suficiente antelación, resulta extremadamente complicada. Por lo tanto, para resolver la tarea es imprescindible conocer primeramente, cuáles factores deben pre-existir en el entorno que permitan su ocurrencia, y en especial, bajo las condiciones del trópico insular.

La tarea no está en cero, pues ya se han llevado a cabo numerosas investigaciones acerca de las AAs, la mayoría enfocadas en la realización de un mejor pronóstico. Entre los resultados más importantes a tener en cuenta se destaca (Dowell III, 1982), quien reconocía al contenido de agua líquida y la flotabilidad negativa, debido al enfriamiento por evaporación, como factores que inician y sostienen una corriente descendente. (Srivastava, 1985), planteó que entre los factores que posibilitan que la fuerza de la corriente descendente se fortalezca, se encuentran la existencia y/o advección de aire relativamente seco con el consiguiente enfriamiento por evaporación y el refuerzo por la gran cantidad de agua líquida por unidad de volumen. También se destacan (Caracena & Maier, 1987), quienes plantearon la importancia del aire seco de niveles medios de la tropósfera, como un ambiente que produce Micro-aeroavalanchas (Micro-AAs) húmedas en el sur de la Florida. Además, los trabajos de (Atkins & Wakimoto, 1991), reflejan un análisis de las condiciones termodinámicas que favorecen la ocurrencia de estos fenómenos. Recientemente, (Oreskovic, 2016), realizó una investigación a partir de simulaciones numéricas de una aeroavalancha (AA) teniendo en cuenta un estudio paramétrico y una comparación con un modelo meteorológico. Además, (Burlando *et al.*, 2019), realizaron un estudio de una AA utilizando mediciones de LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging, por sus siglas en inglés) y la modelación de la nube cumulonimbos (Cb) a partir del modelo WRF (Weather Research and Forecasting, por sus siglas en inglés).

Las primeras investigaciones realizadas en Cuba acerca de las TLS tuvieron un carácter climatológico, destacándose los estudios de (Alfonso, 1994; Aguilar *et al.*, 2005). Seguidamente (Aguilar, 2007; Aguilar *et al.*, 2009; Carnesoltas *et al.*, 2010), centraron sus investigaciones en encontrar las condiciones a escala sinóptica que favorecen la ocurrencia de las TLS en Cuba. (Carnesoltas, 2019), se refirió a tres condiciones necesarias y una suficiente para la ocurrencia de las manifestaciones de severidad local como conjuntos de procesos causa-efecto, y no como valores umbrales de variables independientes. Específicamente en el caso de las AAs se destacan (Rabelo, 2012; Carnesoltas *et al.*, 2013), quienes propusieron una expresión analítica como variable de diagnóstico que permitió estimar la

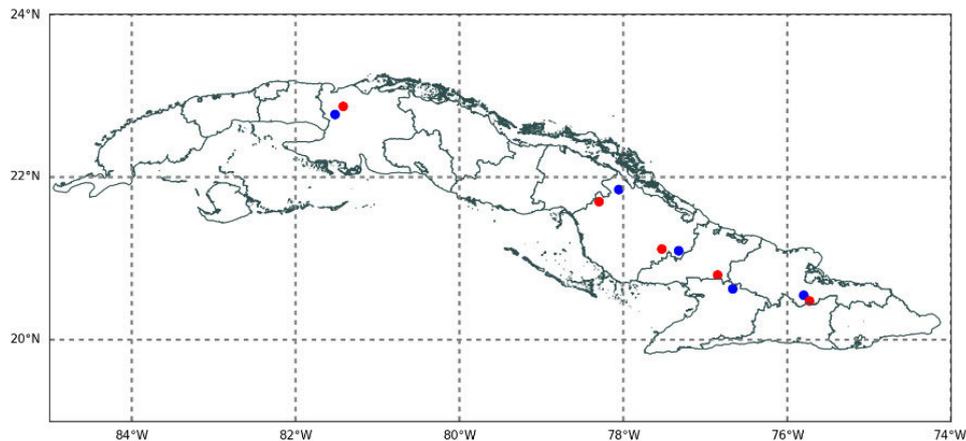
intensidad de la racha máxima potencial de las AAs, en la región que incluye a las provincias cubanas de La Habana, Mayabeque y Artemisa.

Por otra parte, (Gutiérrez, 2020), antecedente fundamental de esta investigación, determinó los factores físicos-meteorológicos preexistentes en los niveles medios troposféricos que posibilitan la ocurrencia de las AAs en Cuba, utilizando el Sistema de Modelación de Pronóstico Numérico del Tiempo Rapid Refresh (RAP, por sus siglas en inglés), el que presenta 13,5 km de resolución espacial. Según la autora, esta resolución no es la ideal para el trabajo a mesoescala, teniendo dificultades en la representación de los procesos físicos que generan AAs. Es por ello, que se hizo necesario emplear un modelo de mayor resolución espacial, que permitiera tener un mejor detalle de los factores físicos pre-existentes en el entorno, donde se va a desarrollar la tormenta que pudiera producir el evento severo. Específicamente en Cuba se ha implementado el Sistema de Pronóstico Inmediato (Sis-PI), que tiene como tarea fundamental el pronóstico numérico de eventos meteorológicos de escala local, entre ellos las AAs. Este sistema con una mayor resolución espacial, aun no ha sido empleado totalmente en el estudio de los factores físicos que son capaces de generar AAs, lo que motivó la realización de esta investigación, cuyo objetivo es identificar los factores físicos significativos que generan aeroavalanchas a partir de las salidas numéricas del SisPI.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Región de estudio y selección de los casos analizados

La región de estudio comprendió todo el territorio cubano, ya que se analizaron reportes de AAs y tormentas eléctricas (TEs) no severas de diferentes provincias del país. Para su selección se tuvo en cuenta que Cuba se ve afectada por varios sistemas meteorológicos, tanto en el período lluvioso como en el poco lluvioso, los cuales traen asociado en muchas ocasiones, TEs con severidad y sin severidad. Los casos seleccionados para esta investigación se muestran en la figura 1. Los puntos rojos representan las AAs, mientras que los puntos azules corresponden con las TEs. Las primeras se obtuvieron a partir de los reportes de TLS en el Centro de Pronóstico del Instituto de Meteorología (INSMET), teniendo en cuenta que este día no haya ocurrido ningún otro evento severo y que se contara con toda la información necesaria para realizar la investigación. En el caso de las TEs se seleccionaron días y horas cercanas a los reportes de AAs, para que no influyeran en los resultados los cambios del terreno ni las variaciones estacionales. En la Tabla 1 se muestra la relación de todos los casos, con la fecha, hora de reporte y lugar donde ocurrió la tormenta.



**Figura 1.** Distribución geográfica de las tormentas analizadas. Los puntos rojos representan las tormentas que produjeron aeroavalanchas y los azules a las tormentas sin aeroavalancha.

**Tabla 1.** Tormentas seleccionadas con (AA) y sin aeroavalanchas (TE).

	Día	Mes	Año	Hora (UTC)	Localidad	Provincia	Latitud	Longitud
AA	27	4	2017	2110	Unión de Reyes	Matanzas	22.87	-81.42
	1	7	2017	2123	Majibacoa	Las Tunas	20.80	-76.85
	20	7	2017	2100	Guáimaro	Camagüey	21.12	-77.53
	21	11	2017	2042	Guaro	Holguín	20.48	-75.73
	14	5	2019	2300	Esmeralda	Camagüey	21.70	-78.30
	30	4	2017	2225	Unión de Reyes	Matanzas	22.77	-81.52
TE	3	7	2017	1900	Jucarito	Camagüey	20.63	-76.67
	18	7	2017	1813	Guáimaro	Camagüey	21.10	-77.31
	23	11	2017	2035	Guaro	Holguín	20.55	-75.80
	13	5	2019	2015	Esmeralda	Camagüey	21.85	-78.06

## 2.2 Datos utilizados

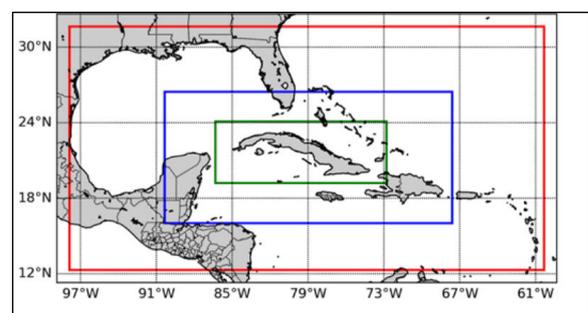
Los mapas de reanálisis se extrajeron a partir de los datos del National Center for Environmental Prediction (NCEP) y National Center for Atmospheric Research (NCAR)<sup>1</sup>.

Las observaciones de radar utilizadas fueron facilitadas por el equipo del Centro de Radares en Camagüey. Se contó con los radares de Casa Blanca, Camagüey y Holguín, puesto que todos los estudios de casos se ubicaron dentro de sus radios óptimos de medición, los cuales oscilan entre 110 y 150 km.

Para las imágenes de satélite de los casos correspondientes al año 2017 se empleó el satélite GOES 13 y para los casos del 2019 el GOES 16<sup>2</sup>.

Se utilizaron las salidas numéricas del SisPI, el cual utiliza como principal modelo atmosférico el Weather Research and Forecasting (WRF, por sus siglas en inglés), versión 3.8.1, inicializado con la salida del modelo Global Forecast System (GFS, por sus siglas en inglés), de 0.5 grados de resolución espacial y el núcleo dinámico Advanced Research WRF (ARW, por sus siglas en inglés).

Este sistema cuenta con tres dominios de simulación con resoluciones de 27, 9 y 3 km, centrados sobre el territorio cubano (figura 2). La configuración del WRF que forma parte del SisPI, se muestra en la tabla 2; en negrita las características específicas del dominio de 3 km, el cual se utilizó en esta investigación para tener más detalles de los factores físicos pre-existentes en el entorno donde se desarrolló la tormenta. Estas salidas presentan una resolución temporal de 1 hora.



**Figura 2.** Dominios empleados en el SisPI. El borde rojo delimita el dominio de 27 km, el azul el de 9 km y el verde interior de 3 km de resolución. Tomado de (Sierra et al., 2017).

<sup>1</sup>Los datos están disponibles en: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data/composites/hour/>

<sup>2</sup>Los datos están disponibles en: <https://www.avl.class.gov/saa/products/welcome>

## 2.5 Metodología utilizada

Después de la selección de los casos se utilizaron los mapas de reanálisis para conocer la situación sinóptica que estaba presente en cada uno de ellos.

En general se emplearon las imágenes de satélite y las observaciones de radar para analizar las condiciones a mesoescala, sobre todo el desarrollo, evolución y movimiento de la actividad convectiva. Específicamente, a partir de las imágenes de satélite se comprobó la hora de reporte de las AAs y de las TEs y se observaron las condiciones del campo de la nubosidad en toda la región de estudio. Mientras que, a partir del radar, se determinó la posición en la que estaba la nube que generó el evento severo, puesto que no necesariamente esta se encontraba en el lugar donde se reportó la AA. Se realizaron cortes verticales para conocer la estructura y secuencia de desarrollo de las nubes de tormenta. Además, se procesaron una serie de productos radáricos como topes, reflectividad máxima para ver la estructura vertical y concentración de la nube, así como el desarrollo de la convección.

Se emplearon las salidas numéricas del SisPI, como una nueva herramienta para determinar con mayor exactitud la posición de la corriente descendente e identificar los factores físicos significativos existentes en la atmósfera que pudieran discriminar entre la ocurrencia o no de las AAs. Para el trabajo con estos datos se empleó el lenguaje de programación Python en su versión 3.7, desarrollándose un algoritmo computacional para el procesamiento y obtención de los resultados. Específicamente las variables utilizadas fueron presión atmosférica, temperatura potencial, altura geopotencial, las componentes de la velocidad del viento

**Tabla 2.** Configuración del modelo WRF.

Parámetros	Configuración
Resolución espacial	27, 9 y 3 km
Cantidad de nodos por las x	145, 262, 469
Cantidad de nodos por las y	82, 130, 184
Niveles verticales	28, 28, 28
Centro	21.8° N y -79.74° W
Paso de integración	150 segundos
Microfísica	WSM5, WSM5, Morrison de doble momento
Cúmulos	Grell-Freitas, Grell-Freitas, no activado
PBL	Mellor-Yamada-Janjic, Mellor - Yamada-Janjic, Mellor -Yamada-Janjic

(u, v, w) y la razón de mezcla del vapor de agua, nube, lluvia y hielo. Se empleó el método spline cúbico para interpolar las variables a la latitud y longitud correspondiente de cada tormenta.

Las ecuaciones de las variables dinámicas y termodinámicas que se utilizaron para el cálculo de los posibles factores que fueron capaces de discriminar entre la ocurrencia o no de AAs, se muestran en la tabla 3, siguiendo la metodología planteada por (Gutiérrez, 2020).

Además, se determinó la velocidad de la corriente descendente, a partir de la DCAPE (Stull, 2015), mediante la siguiente fórmula:

$$w_{maxd} = \frac{-\sqrt{2DCAPE}}{2} \quad (1)$$

La velocidad vertical de la corriente descendente se utilizó para combinarla con los factores mencionados

**Tabla 3.** Fórmulas físicas de las diferentes variables dinámicas y termodinámicas utilizadas para el cálculo de los posibles factores discriminantes.

Variable	Fórmula	Posible factor discriminante
Variación de calor latente	$\Delta Q_L = L \cdot \Delta m_a$	Absorción de calor latente por evaporación y fusión
Temperatura potencial equivalente	$\theta_{eq} = \theta + \left( \frac{L_v \cdot \theta}{C_p \cdot T} \right)$	Diferencia de temperatura potencial equivalente (capa seca en los niveles medios de la tropósfera)
DCAPE	$DCAPE = g \int \frac{\theta_{vp} - \theta_{ve}}{\theta_{ve}}$	Capa seca en los niveles medios de la tropósfera
Flotabilidad	$\frac{F}{M} = \frac{\theta_{ve} - \theta_{vp}}{T_{ve}} g = B$	Aumento de la flotabilidad en la corriente ascendente
Agua precipitable	$d_w = \frac{rT}{g \cdot \rho_l} \cdot (P_1 - P_2)$	Aumento de la carga de agua
Viscosidad dinámica	$\mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}}$	Disminución de la viscosidad
Viscosidad cinemática	$\nu = \mu / \rho$	Disminución de la viscosidad
Componente vertical de Coriolis	$A_{cz} = 2\Omega u \cos \varphi$	Componente vertical de Coriolis con un flujo del Este
Advección horizontal de energía	$Adv\delta \frac{\partial \left( \frac{\rho_p \cdot w^2 d}{2} \right)}{\partial z}$	Disminución de la advección horizontal de energía
Advección horizontal de masa	$Adv\delta \frac{\partial \rho_p}{\partial z}$	Disminución de la advección horizontal de masa

anteriormente, con el objetivo de realizar un análisis puntual de cada uno y poder determinar si realmente lograban discriminar o no entre la ocurrencia de AA, siguiendo igualmente la metodología presentada por (Gutiérrez, 2020).

### 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

#### 3.1 Posición de la tormenta

En el presente artículo solamente se expondrán los resultados obtenidos de la AA del 27 de abril de 2017 y la TE del 30 de abril de 2017, debido a la representatividad de ambas. El resto de los resultados se pueden consultar en (Alvarez, 2020). En la figura 3 se pueden observar los cortes meridionales realizados para las tormentas mencionadas, donde la línea discontinua vertical negra representa la posible posición de la corriente descendente. La resolución temporal de las salidas numéricas del SisPI (cada 1 hora), limitó en algunos de los casos analizados, la correspondencia entre la hora exacta del reporte de las rachas máximas, y el momento en que el aire frío de las tormentas llegó a la superficie terrestre en la posición de la nube, aspecto que pudiera influir en la determinación de dicha posición. Las AAs presentaron una tendencia a localizarse en lugares donde los valores de la velocidad de las corrientes verticales fueron negativos, los cuales correspondieron con movimientos descendentes, mientras que las TEs se encontraban en lugares donde las velocidades de las corrientes verticales eran positivas, correspondiéndose con movimientos ascendentes.

Aunque hubo algunos casos de las TEs donde los valores de la velocidad vertical también eran negativos, pero su valor absoluto, era menor que el de las AAs, lo que significa que la velocidad vertical era menor.

#### 3.2 Análisis de los posibles factores

##### 3.2.1 Velocidad vertical de la corriente descendente

Los valores de velocidad para cada tormenta aparecen en la tabla 4, donde se puede ver que la velocidad de las AAs era mayor que en el caso de las TEs, todas sobrepasando los 36,0 m/s, excepto la del 21 de noviembre del 2017, con un valor de 34,5 m/s, que a pesar de no cumplir con ese valor crítico cuando se compara con la TE que le corresponde si es mayor. Se considera que esto puede estar relacionado con el hecho de que la hora de la salida utilizada para este día corresponde con las 2000 UTC, que son 40 minutos antes de la hora de reporte, por lo que ese valor pudiera haber aumentado en ese periodo de tiempo. Además este día, es el único de todos los analizados que pertenece al periodo poco lluvioso, y teniendo en cuenta lo planteado por (Carnesoltas *et al.*, 2013), “las TLS son más comunes, sobre todo, en el periodo lluvioso del año (mayo a octubre), con respecto al poco lluvioso (noviembre - abril)”, y (Durán, 2016), que planteó que “las condiciones se comportan de manera diferentes en ambos periodos”, se puede considerar entonces que, los factores necesarios para la formación de AAs en el periodo poco lluvioso presentan algunas diferencias en relación con el periodo lluvioso del año.

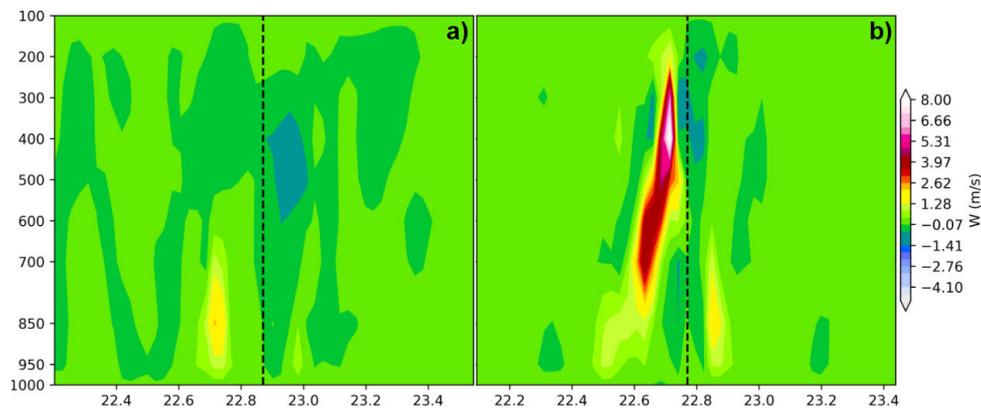


Figura 3. Cortes meridionales de la velocidad vertical a partir de las salidas numéricas del SisPI. a) 27 de abril del 2017 a las 2100 UTC (AA); b) 30 de abril del 2017 a las 2200 UTC (TE).

Tabla 4. Valores de la velocidad vertical de la corriente descendente de las aero-avanchas y las tormentas eléctricas sin severidad, determinados a partir de la DCAPE.

AA	w(DCAPE) (m/s)	TE	w(DCAPE) (m/s)
27-4-2017	48.62	30-4-2017	30.22
1-7-2017	44.65	3-7-2017	33.19
20-7-2017	36.33	18-7-2017	35.97
21-11-2017	34.52	23-11-2017	27.82
14-5-2019	34.47	13-5-2019	34.47

Es por ello que, para un análisis más detallado de los resultados, la AA y la TE que ocurrieron en el mes de noviembre del 2017, se representarán con una estrella roja y azul, respectivamente, para diferenciarlas del resto de las tormentas. Otro aspecto importante a destacar es que las tormentas ocurridas a finales del mes de abril (período de transición), el cual, según (Lecha *et al.*, 1994), ocurre a principios de noviembre y a finales de abril, pueden presentar condiciones muy similares a los meses del período lluvioso del año.

### 3.2.2 Factores que no lograron discriminar entre la ocurrencia de aeroavalanchas y tormentas eléctricas.

Los factores relacionados con viscosidad, agua precipitable, aceleración vertical de Coriolis y advección horizontal de masa, no lograron discriminar entre la ocurrencia de AA y TE, coincidiendo con lo obtenido por (Gutierrez, 2020). Una de las causas de estos resultados puede estar relacionado con el pequeño orden de magnitud que poseen, realizando un aporte mínimo a la aceleración de las corrientes descendentes. Incluso, se puede considerar que realmente no logran discriminar entre ambas tormentas, puesto que, a pesar de la utilización de una mayor resolución espacial, los resultados no difieren con respecto a la investigación anterior. Los resultados relacionados con estos factores se pueden consultar en (Alvarez, 2020).

### 3.2.3 Factores distintivos a los obtenidos en investigaciones anteriores

A diferencia de los resultados obtenidos por (Gutierrez, 2020), la flotabilidad y advección horizontal de energía, ambos en los niveles medios de la tropósfera, discriminaron entre la ocurrencia de AAs y TEs, como se puede observar en la Figura 4. Excepto para la advección de energía de la AA del 21 de noviembre del 2017, que presentó  $2,03 \cdot 10^{-1}$  J/s, lo que puede estar relacionado con las mismas causas planteadas anteriormente. El aumento de la flotabilidad en la co-

riente ascendente contribuye a que se eleve mayor cantidad de masa en el caso de las AAs, lo que posibilita que sea mayor también, la cantidad de masa que desciende, mientras que la disminución de la advección horizontal de energía permite que retorne mayor cantidad de flujo a la superficie, aumentando así en ambos casos la velocidad de la corriente descendente. Se considera que la resolución empleada en esta investigación estuvo relacionada con estos resultados, ya que determina un mejor detalle de los procesos físicos que se desarrollan dentro de la nube de tormenta. Además, el SisPI presenta parametrizaciones, las cuales después de varios estudios de sensibilidad se consideran las más acordes para nuestro país, según (Sierra *et al.*, 2017).

### 3.2.4 Factores que lograron discriminar entre aeroavalanchas y tormentas eléctricas.

La absorción de calor latente por evaporación y fusión, ambos en la corriente ascendente, fueron factores que lograron discriminar entre AA y TE, como se muestra en la figura 5, coincidiendo con los resultados obtenidos por (Gutierrez, 2020). Se estableció como posibles valores críticos 32000 J y 4200 J para el caso de la evaporación y fusión respectivamente. El calor absorbido por evaporación superó al calor que se absorbe por fusión, debido a que, en los trópicos, las nubes de tormenta presentan mayor contenido de agua líquida en comparación con el contenido de agua en estado sólido. Esta absorción de calor latente es el proceso que se conoce como enfriamiento evaporativo, el cual muestra los cambios que le ocurren a una porción de fluido de una nube al encontrarse con una capa seca.

Para el análisis de la capa seca se realizaron cortes verticales zonal y meridional de la variable humedad relativa, en el lugar de ubicación de cada una de las tormentas. En ambos casos existió un alto contenido de humedad en los niveles bajos hasta aproximadamente los 700 hPa, alcanzándose valores de humedad que oscilaron entre 75 y 100 % (figura 6). Este resul-

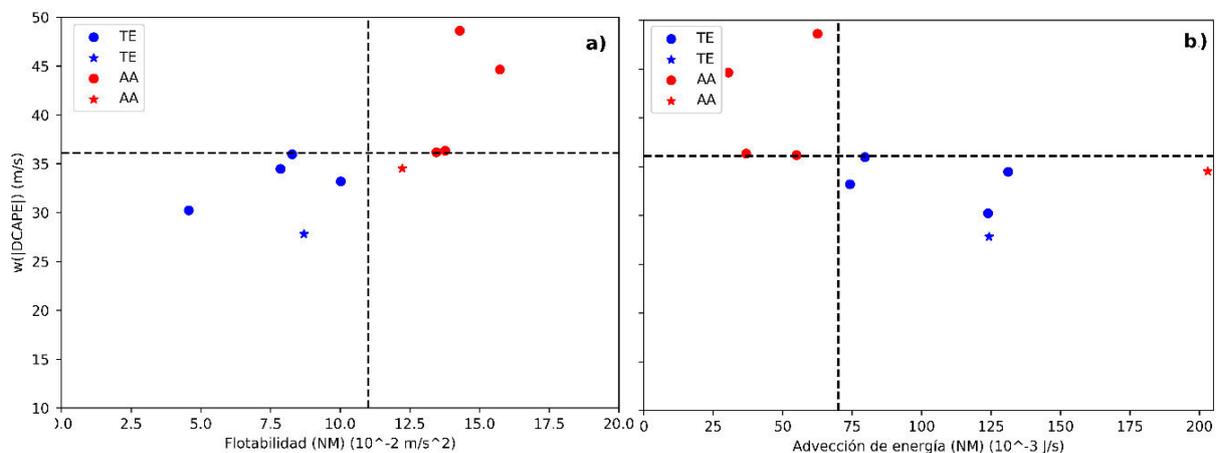


Figura 4. Relaciones entre: a) la flotabilidad y la velocidad vertical; b) la advección horizontal de energía y la velocidad vertical.

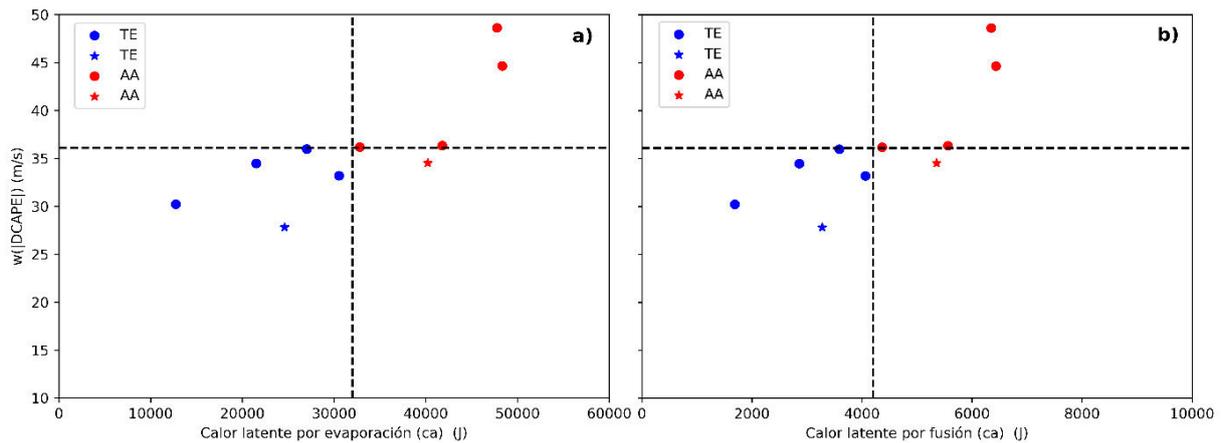


Figura 5. Relación entre la absorción de calor latente y la velocidad vertical. a) Evaporación y b) Fusión.

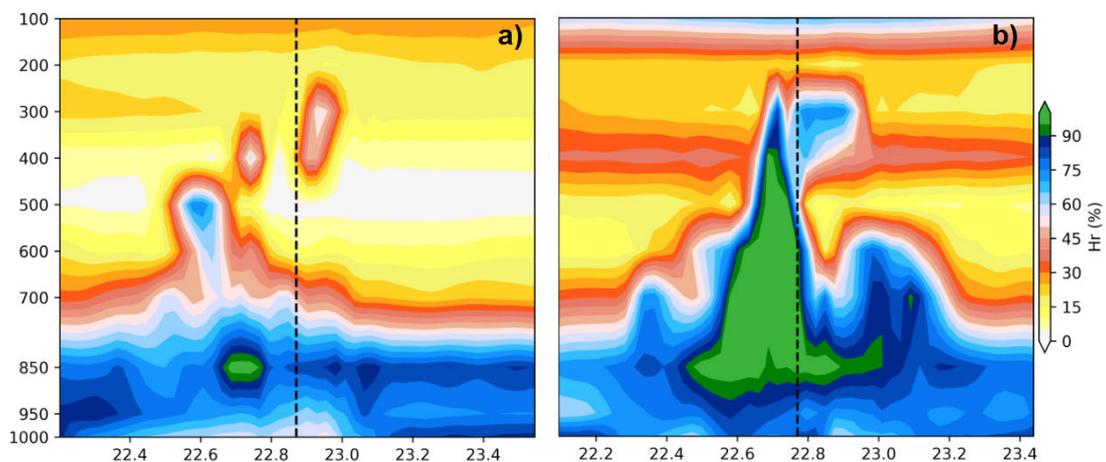


Figura 6. Cortes verticales meridionales de humedad relativa a partir de las salidas numéricas del SisPI. a) 27 de abril del 2017 (AA) y b) 30 de abril del 2017 (TE).

tado se corresponde con (Carnesoltas *et al.*, 2013), donde sugirió que “la formación de convección profunda, e incluso severidad dentro de ella, necesita la presencia de valores de humedad en los niveles bajos por encima del 80 %”.

La diferencia entre ambos días se observó principalmente en los niveles medios de la tropósfera, aproximadamente entre los 700 y 400 hPa. En el caso de las AAs existía una profunda capa seca en los niveles mencionados, con valores de humedad relativa por debajo del 20 %, confirmando lo planteado por Aguilar (2007) que “la presencia de una capa seca en niveles medios de la tropósfera es una condición necesaria para la ocurrencia de AAs en Cuba”. Sin embargo, en el caso de las TEs, la humedad relativa alcanzó valores mayores en los niveles medios, llegando incluso al 100%, como se muestra en la figura 6, en los otros casos oscilaban entre 35 - 50 %. Los valores bajos de humedad relativa en los niveles medios de la tropósfera, para el caso de las AAs, favorecieron la absorción de calor latente por evaporación y fusión mencionada anteriormente. Esto provocó que el aire circundante a las partículas de agua se enfriara, fuera más denso, con mayor peso específico, y se acelerara

hacia la superficie, lo que ayudó al fortalecimiento de la corriente descendente.

Hay que destacar que en el caso de la AA ocurrida el 21 de noviembre del 2017, la capa seca no estaba tan profunda y marcada como en el resto de los casos, como se puede observar en la figura 7. Sin embargo, si se compara con la TE que le corresponde, sí alcanzó valores de humedad relativa menores en los niveles medios de la tropósfera. Una de las causas de este resultado puede estar relacionada con el hecho de que este día pertenece al período poco lluvioso del año, donde las condiciones como se dijo anteriormente pudieran presentar algunas diferencias con respecto al otro período.

Además, se analizaron los campos espaciales de la diferencia de temperatura potencial equivalente entre el nivel de máxima humedad relativa en los niveles bajos y de mínima humedad relativa en los niveles medios. Las AAs tenían una tendencia a localizarse en lugares donde esta diferencia era más elevada con respecto a las TEs, lo que se aprecia en la figura 8, confirmando lo obtenido por (Gutiérrez, 2020). Esta variable, según (Atkins & Wakimoto, 1991), es representativa del contraste de humedad que se genera en el caso de las aeroavalanchas.

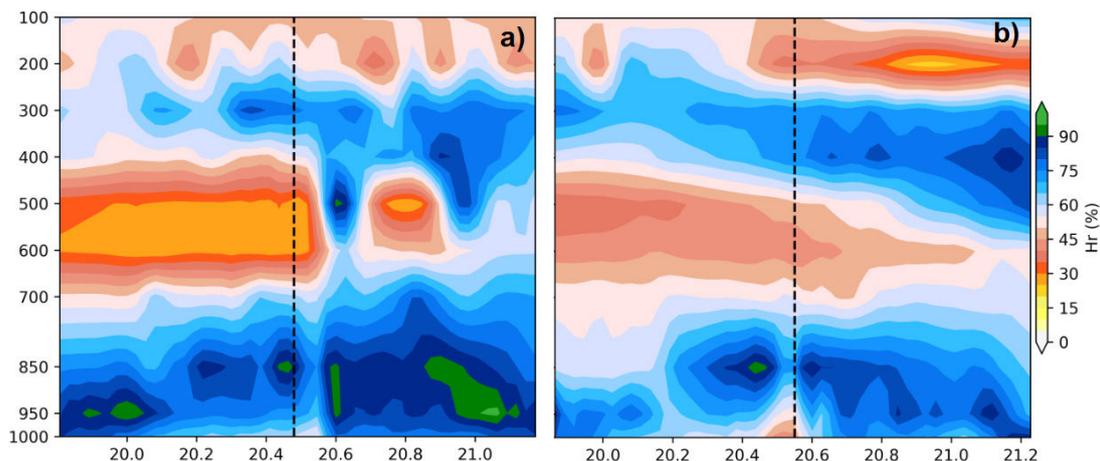


Figura 7. Cortes verticales meridionales de humedad relativa a partir de las salidas numéricas del SisPI. a) 21 de noviembre del 2017 (AA) y b) 23 de noviembre del 2017 (TE).

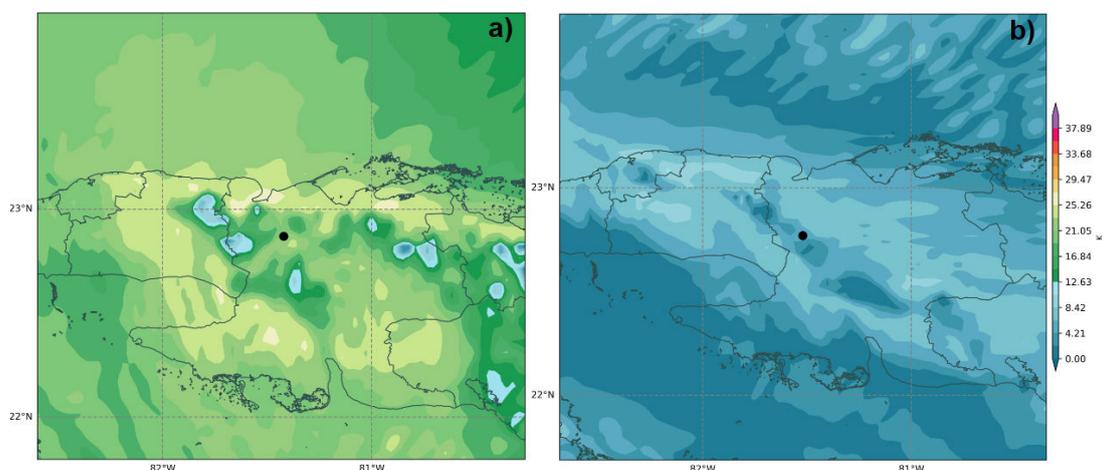


Figura 8. Campos de diferencia de temperatura potencial equivalente a partir de las salidas numéricas del SisPI. a) 27 de abril del 2017 (AA) y b) 30 de abril del 2017 (TE).

A partir del análisis puntual de este factor, se ratificó lo observado en los campos mostrados anteriormente (figura 9). En esta investigación se pudo establecer como posible valor crítico 8,0 K, mientras que en el caso de (Gutiérrez, 2020) fue de 11,0 K. Otras investigaciones como (Rabelo, 2012; Carnesoltas *et al.*, 2013) encontraron como valor crítico 21,0 K, diferencia que puede ser posible debido a la utilización en esta investigación de un modelo de mayor resolución, permitiendo un mejor contraste de la humedad existente en la columna troposférica.

Otra forma de comprobar la influencia de la capa seca en los niveles medios de la tropósfera fue a través del análisis de los campos espaciales de la DCAPE. Las AAs se encontraban en lugares donde la DCAPE era mayor que en el caso de las TEs (figura 10), como mismo sucedió con los campos de diferencia de temperatura potencial equivalente, coincidiendo con lo obtenido igualmente por (Gutiérrez, 2020).

Además, se utilizaron las cartas pseudoadiabáticas para un análisis puntual de este factor. El área amarilla que se observa en la figura 11 representa la DCAPE, la cual estuvo delimitada por la temperatura ambiente y la adiabática saturada de la parcela que desciende.

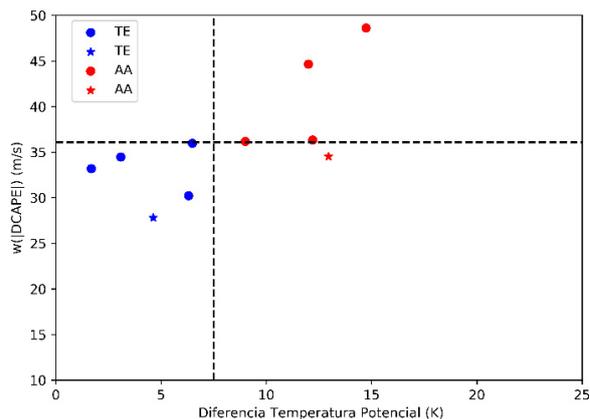


Figura 9. Relación entre la diferencia de temperatura potencial equivalente y la velocidad de la corriente descendente.

Esta área era mayor para las AAs que para las TEs, superando en todos los casos los 2600,0 J/kg (tabla 5), excepto la del 21 de noviembre del 2017 con un valor de 2382,7 J/kg. A pesar de ello, si se analiza cada caso de AA con su TE, en todas las AAs la DCAPE es superior, como mismo sucedió con la velocidad vertical.

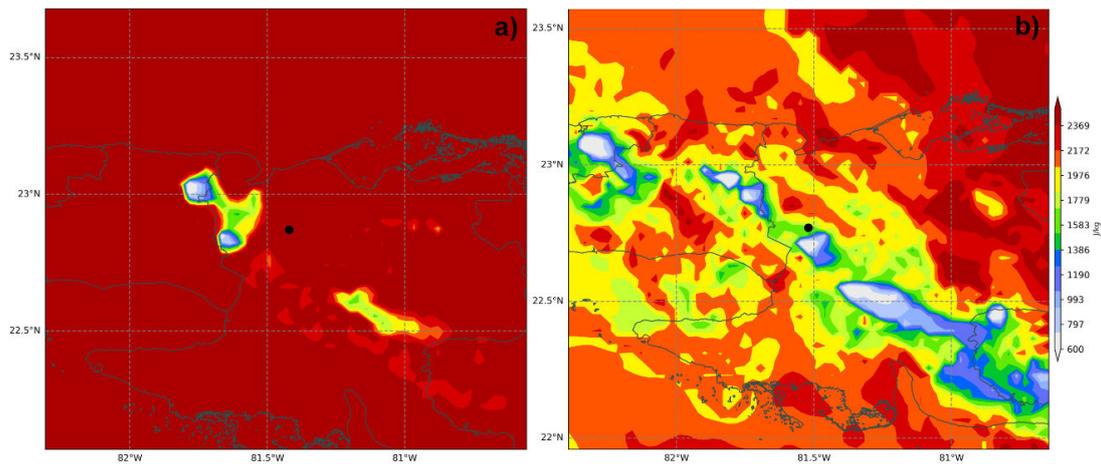


Figura 10. Campos de la DCAPE a partir de las salidas numéricas del SisPI. a) 27 de abril del 2017 (AA) y b) 30 de abril del 2017 (TE).

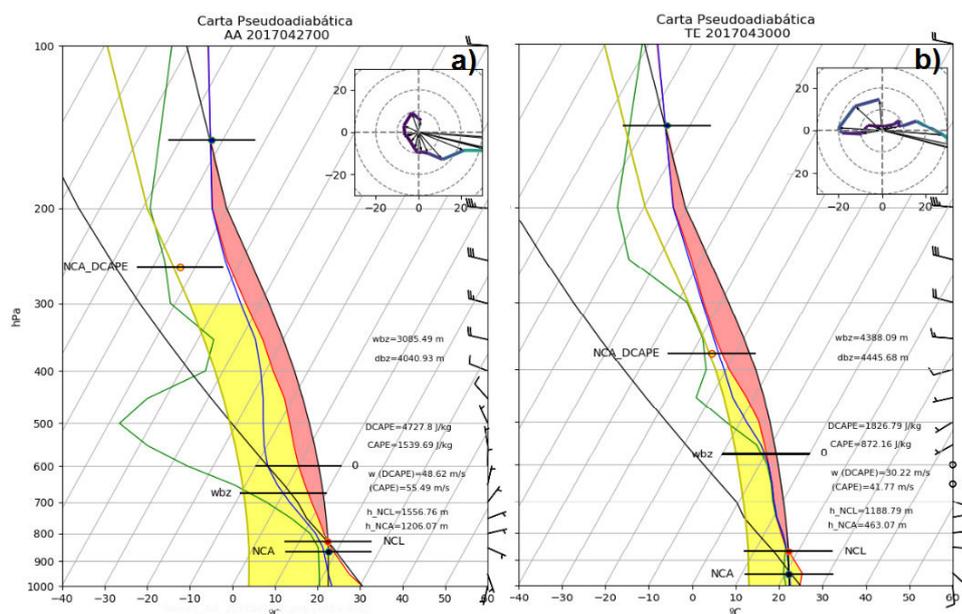


Figura 11. Cartas pseudoadiabáticas a partir de las salidas numéricas del Sis-PI. a) 27 de abril del 2017 (AA) y b) 30 de abril del 2017 (TE).

Tabla 5. Valores de la DCAPE para los casos de aeroavalanchas y tormentas eléctricas sin severidad.

AA	DCAPE (J/kg)	TE	DCAPE (J/kg)
27-4-2017	4727.8	30-4-2017	1826.8
1-7-2017	3986.7	3-7-2017	2203.3
20-7-2017	2640.2	18-7-2017	2587.9
21-11-2017	2382.7	23-11-2017	1547.9
14-5-2019	2618.7	13-5-2019	2376.0

Estos resultados relacionados con la absorción de calor latente por evaporación y fusión y con la capa seca en los niveles medios de la tropósfera, se consideran como los más representativos para discriminar entre AA y TE.

### CONCLUSIONES

1. Los factores que discriminaron entre las aeroavalanchas y las tormentas eléctricas sin severidad, para todos los casos analizados, fueron la absorción

de calor latente por evaporación y fusión, ambos en la corriente ascendente, la flotabilidad en los niveles medios y la diferencia de temperatura potencial equivalente entre el nivel de máxima humedad en los niveles bajos y de mínima humedad en los niveles medios.

2. La utilización de las salidas numéricas del SisPI permitió identificar la flotabilidad y la advección de energía, ambos en los niveles medios de la tropósfera, como factores discriminantes entre la ocu-

rrencia de aeroavalanchas y tormentas eléctricas no severas, a diferencia de investigaciones anteriores.

3. La viscosidad, el agua precipitable, la aceleración vertical de Coriolis y la advección horizontal de masa, aunque contribuyen a la aceleración de las corrientes descendentes, no fueron capaces de discriminar entre la ocurrencia de aeroavalanchas y tormentas eléctricas sin severidad, debido al orden de magnitud tan pequeño que poseen comparado con el resto de los factores.
4. La aeroavalancha del 21 de noviembre del 2017 no cumplió con los valores críticos establecidos para los factores de advección horizontal de energía en los niveles medios, la velocidad de la corriente descendente y la DCAPE, pudiéndose relacionar con la hora de la salida utilizada y por pertenecer al periodo poco lluvioso del año.

### RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones se deberán incorporar más estudios de casos, principalmente del período poco lluvioso del año, con el objetivo de comprobar si los resultados obtenidos se cumplen también en dicho periodo. Además, se debe implementar un algoritmo físico-matemático de post-procesamiento a partir de las salidas numéricas del SisPI, para calcular la magnitud del frente de racha, lo que constituiría una nueva herramienta para el pronóstico de las aeroavalanchas. Por otra parte, se pretende emplear otras formulaciones físicas en el cálculo de la velocidad vertical de la corriente descendente para comparar con los resultados obtenidos utilizando la DCAPE.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores deseamos agradecer a los especialistas del Centro de Física de la Atmósfera, del Centro de Pronósticos y del Centro de Radars de Camagüey, todos pertenecientes al INSMET, por facilitar todos los datos necesarios para la realización de esta investigación.

### REFERENCIAS

- Aguilar, G. 2007. *Condiciones sinópticas favorables para la ocurrencia de tormentas locales severas en Cuba. Un esquema para su predicción*. Informe Científico de resultado, No. 4, La Habana, Cuba: Instituto de Meteorología, 102 p., [Consulted: 13 agosto, 2020].
- 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, ISSN 0-864-151-X.
- Aguilar, G.; Carnesoltas, M. ; Naranjo, L. & Balseiro, C. 2005. "Climatología de las tormentas locales severas en Cuba en el período 1987-2002. Resultados de la modelación de un caso de estudio". *Revista Cubana de Meteorología*, 12(1):3-10, ISSN: 2664-0880.
- Alfonso, A. P. 1994. *Climatología de las tormentas locales severas de Cuba. Cronología*. La Habana, Cuba: Editorial Academia, 168 p., ISBN: 978-95-902-0060-1, [Consulted: 20 julio, 2020].
- Alvarez, G. 2020. *Factores físicos significativos que generan aeroavalanchas identificados a partir del Sistema de Pronóstico Inmediato (SisPI)*. Trabajo de Diploma de Licenciatura en Meteorología, La Habana, Cuba: Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana, 180 p., [Consulted: 15 octubre, 2020].
- Atkins, N. T. & Wakimoto, R. 1991. "Wet microburst activity over the southeastern United States. Implications for forecasting weather". *Forecasting*, 6(4):470 - 482, DOI: [10.1175/1520-0434\(1991\)006<0470:WMAOTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1991)006<0470:WMAOTS>2.0.CO;2).
- Burlando, M.; Romanic, D.; Boni, G.; Lagasio, M. & Parodi, A. 2020. "Investigation of the weather conditions during the collapse of the Morandi Bridge in Genoa on 14 august 2018 using field observations and WRF Model". *Atmosphere*, 11(7):72, DOI: [.org/10.3390/atmos11070724](https://doi.org/10.3390/atmos11070724).
- Caracena, F. & Maier, M. 1987. "Analysis of microburst in the FACE Meteorological Mesonet network in Southern Florida". *Monthly Weather Review*, 115(5):969 - 985, DOI: [10.1175/1520-0493\(1987\)115<0969:AOAMIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<0969:AOAMIT>2.0.CO;2).
- Carnesoltas, M. 2019. "Tormentas locales severas. Tres condiciones necesarias". *Revista Cubana de Meteorología*, 25(1):90-97, ISSN: 2640-0880.
- Carnesoltas, M. ; Aguilar, G. & Naranjo, L. 2010. "Condiciones sinópticas favorables para la aparición de tormentas locales severas en Cuba. Período lluvioso". *Revista Cubana de Meteorología*, 16(1):13-31, ISSN 0-864-151-X.
- 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 Científico de resultado, La Habana, Cuba: Instituto de Meteorología, 65 p., [Consulted: 2 septiembre, 2020].
- Doswell III, C. A. 1982. *The Operational Meteorology of Convective Weather*. Technical Memorandum NWS NSSFC-5. I, NTIS Accession No. PB83-162321, NOAA, 100p., [Consulted: 15 septiembre, 2020].
- Durán, I. 2016. "Cantidad de días con lluvia y su distribución por intervalos en condiciones normales y de sequía severa en el occidente de Cuba". *Revista Cubana de Meteorología*, 22(1):49-65, ISSN: 0864-151X.

- Gutierrez, M. 2020. "Factores físicos - meteorológicos en los niveles medios troposféricos que determinan la ocurrencia de aeroavalanchas en Cuba". *Revista Cubana de Meteorología*, 26(4), ISSN: 2664-0880.
- Lecha, L. B.; Paz, L. R. & Lapinel, B. 1994. *El clima de Cuba*. La Habana, Cuba: Editorial Academia, 235 p., ISBN: 959-02-006-0, [Consulted: 29 agosto, 2020].
- Oreskovic, C. 2016. *Numerical investigation of full scale thunderstorm downbursts: A parametric study and comparison to meteorological model*. Electronic master thesis and dissertation repository. Ontario, Canadá: The University of Western Ontario, 172p., Available: <<https://ir.lib.uwo.ca/etd/3743>>, [Consulted: 29 septiembre, 2020].
- Rabelo, D. 2012. *Procedimiento para la estimación de la velocidad de la racha máxima de una aeroavalancha*. Trabajo de Diploma de Licenciatura en Meteorología. La Habana, Cuba: Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, 60 p., [Consulted: 8 octubre, 2020].
- 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, La Habana, Cuba: Instituto de Meteorología, 26p., [Consulted: 15 septiembre, 2020].
- Srivastava, R. C. 1985. "A simple model of evaporatively driven down draft: Application to microburst downdraft". *Journal of the Atmospheric Sciences*, 42(10):1004-1023, DOI: [10.1175/1520-0469\(1985\)042<1004:SMOED>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1985)042<1004:SMOED>2.0.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, Vancouver, Canadá, 939p., ISBN-13: 978-0-88865-176-1, Available: [http://www.eos.ubc.ca/books/Practical\\_Meteorology/](http://www.eos.ubc.ca/books/Practical_Meteorology/).

*Gleisis Alvarez Socorro*. Departamento de Meteorología, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de la Habana, Cuba. E-mail: [galvarez@instec.cu](mailto:galvarez@instec.cu); [gleisis1998@gmail.com](mailto:gleisis1998@gmail.com)

*Mario Carnesoltas Calvo*. Departamento de Meteorología, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de la Habana, Cuba. E-mail: [mario.carnesoltas@insmet.cu](mailto:mario.carnesoltas@insmet.cu)

*Alis Varela de la Rosa*. Departamento de Meteorología, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de la Habana, Cuba. E-mail: [alis.varela@insmet.cu](mailto:alis.varela@insmet.cu); [silavarela@gmail.com](mailto:silavarela@gmail.com)

*José Carlos Fernández Alvarez*. Departamento de Meteorología, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de la Habana, Cuba. E-mail: [jcfernandez@instec.cu](mailto:jcfernandez@instec.cu); [fortunajcfa@gmail.com](mailto:fortunajcfa@gmail.com)

**Conflictos de intereses:** Los autores no declaran conflictos de intereses

**Contribución de autores:** Gleisis Álvarez-Socorro, Mario Carnesoltas Calvo y Alis Varela de la Rosa concibieron la idea de la investigación. Gleisis Álvarez-Socorro y José C. Fernández-Alvarez procesaron los datos y crearon las figuras. Gleisis Álvarez-Socorro analizó los resultados y escribió el manuscrito. Todos los autores contribuyeron a la revisión y edición del manuscrito.

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/)