

## Los sondeos aerológicos en Camagüey para la predicción de tiempo severo

### Aerological soundings in Camagüey for the prediction of severe weather



<http://opn.to/a/cO9u8>

Dainelaine Navarro-Silva<sup>✉</sup>, Ismael Pomares-Ponce<sup>✉</sup>, Eduardo Estrada-Canosa<sup>✉</sup>

Centro Meteorológico Provincial, Camagüey, Cuba

**RESUMEN:** En el presente trabajo se proponen nuevos umbrales para determinados índices de estabilidad (LI, SI, TT, además de utilizan el CAPE y el SWEAT) que permiten pronosticar la formación y desarrollo del tiempo severo, a partir del procesamiento estadístico de los reportes de TLS coincidentes con los datos de los sondeos aerológicos realizados en Camagüey. Para lograr el objetivo de la investigación se realizó un análisis de los índices termodinámicos que indican severidad. Finalmente se efectuó una evaluación de la eficiencia obtenida y como resultado se obtiene que dichos umbrales son inapropiados para la predicción del tiempo severo.

**Palabras clave:** Sondeos aerológicos, tiempo severo, tormentas locales severa, índice de estabilidad.

**ABSTRACT:** In the present work new thresholds are proposed for certain stability indexes (LI, SI, TT, in addition to using the CAPE and the SWEAT) that allow predicting the formation and development of severe weather, from the statistical processing of the TLS reports coinciding with the data of the aerological soundings carried out in Camagüey. To achieve the objective of the research an analysis of the thermodynamic indices indicating severity was carried out. Finally, an evaluation of the obtained efficiency was made and as a result it is obtained that the use thresholds are inappropriate for the prediction of severe weather.

**Keywords:** aerological soundings, severe weather, severe local storms

---

<sup>✉</sup> Autor para correspondencia: Dainelaine Navarro-Silva. E-mail: [nanin@cmw.insmet.cu](mailto:nanin@cmw.insmet.cu)

Recibido: 3/4/2018

Aceptado: 20/6/2018

## INTRODUCCIÓN

La predicción de fenómenos asociados a tormentas de diferente grado de severidad ha sido de interés para el hombre desde tiempos remotos. El pronóstico de la severidad es una de las cuestiones que todos los días los meteorólogos se esfuerzan por perfeccionar, para minimizar los daños a la economía y las pérdidas de vidas humanas. La necesidad de disponer de herramientas para la predicción del tiempo severo propició la aparición de los índices de estabilidad en el siglo pasado ([Showalter, 1953](#)). Relacionado con el tema, [Schafer \(1986\)](#) hace un recuento sobre el empleo de métodos de pronóstico de la severidad hasta mediados de la década del 80.

Por otra parte, [Schulz \(1989\)](#) obtiene los índices de estabilidad a partir de los sondeos realizados durante 83 días de un experimento realizado en 1985 en Colorado, EU. El valor de los índices fue comparado con las condiciones del tiempo observadas para determinar su capacidad predictiva del tiempo severo. En 1997 Tuduri & Ramis investigan las características de las condiciones ambientales asociadas a 313 eventos convectivos en el Mediterráneo oeste empleando los radiosondeos realizados en Mallorca, España. Basados en los eventos de severidad observados se crean 5 grupos, los índices de estabilidad clásicos, así como el CAPE y la helicidad son empleados para discriminar entre los grupos. Mediante el análisis de conglomerados los autores logran caracterizar las condiciones ambientales asociadas a cada tipo de evento severo, para ello emplean los índices de estabilidad, el CAPE, la helicidad y 34 variables que describen la estructura térmica y de humedad en la vertical.

En Cuba la actividad severa no está dada solamente por los organismos tropicales, sino son formados por los sistemas de convección profunda a escala local que bajo situaciones favorables se convierten en tormentas locales severas (TLS) ([Aguilar et al., 2005](#)). [Martínez et al., 2004](#) plantean que los llamados índices

termodinámicos o índices de estabilidad se han relacionado tradicionalmente con las condiciones del tiempo a escala local, estos han sido utilizados, tanto en la investigación como en la práctica operativa del pronóstico del tiempo. Otros autores han empleado algunos índices y otros parámetros derivados de los perfiles termodinámicos para diferentes regiones de Cuba, así [Sosa \(1981\)](#) discutió algunas magnitudes relacionadas con la humedad para la provincia La Habana. [Alfonso \(1985\)](#) encontró una ecuación de predicción para la probabilidad de lluvia en Ciudad de La Habana, en función de magnitudes derivadas del sondeo aerológico.

Rivero *et al.*, 2002, emplean los índices de estabilidad para analizar su relación con la lluvia en Camagüey a las 1200 GMT, empleando datos de precipitación en 24 horas del Instituto Nacional de recursos Hidráulicos (INRH). También, [Carnesolta \(2011\)](#), propone la aplicación del principio de conservación de la energía para identificar la secuencia de transformaciones sucesivas de la energía en el proceso de la convección atmosférica a escala local, en especial para los elementos que dan lugar a la severidad en las tormentas locales. [Rojas y Carnesoltas \(2013\)](#) estudian las condiciones necesarias a mesoescala que determinan la ubicación de las TLS sobre la región oriental, bajo las condiciones a escala sinóptica que imponen los patrones tridimensionales favorables.

En Camagüey se han empleado tradicionalmente los índices de estabilidad tanto en trabajos investigativos ([Rivero et al., 2002](#); [Aroche et al., 1999, 2000, 2001](#); [Gamboa et al., 2001](#)) como en la práctica cotidiana. Sin embargo, la utilización de los índices en el trabajo diario ha mostrado que los umbrales actuales de los índices de estabilidad para el diagnóstico de condiciones de severidad, no predicen eficientemente las Tormentas Locales Severas. Ante esta situación aparece la necesidad de identificar la posible ocurrencia de tiempo severo a partir de la utilización de

nuevos umbrales para los índices de estabilidad y así mejorar su predicción en Camagüey.

A partir de lo anteriormente planteado se tiene como objetivo, identificar nuevos umbrales para un grupo de índices de estabilidad, que contribuyan a mejorar el diagnóstico de tiempo severo, propiciar la alerta temprana a la población y a los organismos del Estado sobre la posible ocurrencia de TLS y así contribuir a la mitigación de los daños mediante la toma de decisiones oportunas.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Para el presente trabajo se utilizó la base de datos de los reportes de TLS ocurridas en todos los municipios de la provincia de Camagüey, desde 1970 hasta el 2018. La base de datos contiene una cronología de los fenómenos severos observados tales como tornados, trombas en la altura, lluvias intensas, aeroavalanchas, rachas de vientos lineales de más de 96 km/h y granizos. Además, se emplearon los sondeos aerológicos realizados en el Centro Meteorológico Provincial de Camagüey. Los datos de los sondeos aerológicos del archivo, fueron realizados entre 1970 - 1996 con una estación (Meteorit) proveniente de la antigua Unión Soviética y del año 2005 hasta el 2013 con una estación de radiosondeo de fabricación francesa (MODEM).

Se seleccionaron 371 sondeos de ellos 125 se lanzaron en días coincidentes con la ocurrencia de algún tipo de TLS. El resto, 246 sondeos, corresponden a días claros, definidos como aquellos días en que no ocurrió ningún tipo de severidad.

En la [tabla 1](#) se muestra total de casos de severidad reportados en la provincia de Camagüey entre 1970 y el 2013, los tipos de TLS, su simbología, la cantidad total de casos reportados, las TLS coincidentes con la realización de los sondeos y el por ciento en relación con la cantidad total de tormentas severas. En este último caso aparecen 128 TLS coincidentes con sondeos en lugar de 125 debido a que los fenómenos severos diferentes que ocurren un mismo día se consideran independientes, así como el porcentaje de casos con respecto al total. En la tabla se aprecia que solo una pequeña cantidad de sondeos coinciden con los reportes de severidad (10.7%).

De la selección anterior se seleccionaron 12 casos como muestras independientes para evaluar la efectividad de los valores umbrales propuestos mediante la metodología descrita anteriormente. Los días que se analizaron se relacionan en la [tabla 2](#).

Los índices seleccionados fueron el índice de levantamiento (LI), de Showalter (SI), el Total de Totales (TT), la Energía Potencial

**Tabla 1.** Cantidad de casos por cada tipo de fenómeno severo

Tipos de TLS	Símbolo	Cant. de TLS	Casos coincidentes con sondeos	%
Lluvia de más de 100 mm	LI	652	58	8.9
Granizos	Gr	252	33	13.1
Rachas de 90 km o más	Ra	129	18	14.0
Tornado	T	118	12	10.2
Tromba en la altura	Ta	28	3	10.7
Aeroavalanchas	Ae	11	3	27.3
Tromba marina	Tm	3	1	33.3
<b>TOTAL</b>		<b>1193</b>	<b>128</b>	<b>10.7</b>

Convectiva Disponible (CAPE) y amenaza de tiempo severo (SWEAT), estos se calcularon a partir de los perfiles de los sondeos aerológicos empleando las fórmulas descritas a continuación ([Martínez et al. 2001](#)).

**Tabla 2.** Muestra independiente

Día	Evento	Año	Fenómeno
18	5	1986	Día claro
2	10	1989	Día claro
5	11	1989	Día claro
6	5	1989	Día claro
8	10	1990	Día claro
8	11	1990	Día claro
31	8	2013	Granizo
28	8	2013	Granizo
29	8	2013	Granizo
10	9	2013	Lluvias de 100 mm y rachas
10	8	2013	Granizo
16	9	2013	Granizo

El (LI) evalúa el estimado de la inestabilidad de la atmósfera media, a partir de la diferencia entre la temperatura ambiente (T) en el nivel de 500 hPa y la temperatura de una burbuja (Tp) que alcanza el nivel de 500 hPa. Se calculó de la por la siguiente fórmula ([Miller, 1972](#)):

$$LI = T_{500} - T_{P00} \quad (1)$$

Para Estados Unidos Miller en el año 1972 propuso los siguientes umbrales:

- $LI \leq 0$  = posibles tormentas eléctricas
- $LI \leq -4$  = posibles tormentas locales severas

El Índice Showalter (SI) se calculó mediante la expresión siguiente

$$SI = T_{500} - T_{P500} \quad (2)$$

**donde:**

$T_{500}$  - es la temperatura (°C) en el nivel de 500 hPa

$T_{P500}$  - es la temperatura (°C), en un diagrama adiabático, que una burbuja de aire alcanza si es elevada por la adiabática no saturada desde 850 hPa hasta el nivel de condensación y después continúa elevándose por la adiabática saturada hasta los 500 hPa.

$SI \leq +3$  = chubascos y posibilidad de tormentas

$SI \leq -3$  = actividad convectiva severa.

El índice (TT) también se utilizó para esta investigación que es la suma del total vertical y el total cruzado. El total vertical significa el gradiente de temperatura entre 850 y 500 hPa y el total cruzado es la suma del punto de rocío del nivel de 850 hPa y la temperatura de 500 hPa. Se calcula mediante la expresión siguiente:

$$TT = T_{d850} + T_{850} - 2 (T_{500}) \quad (3)$$

**donde:**

$T_{d850}$  - es la temperatura del punto de rocío en los 850 hPa

$T_{850}$  - es la temperatura en el nivel de 850 hPa

$T_{500}$  - es la temperatura en los 500 hPa.

Los umbrales para el TT que se emplean son:

- $TT \geq 44$  = posibilidad de tormentas, baja probabilidad de tiempo severo.
- $TT \geq 50$  = moderada probabilidad de tormentas locales severas.
- $TT \geq 55$  = alta probabilidad de tormentas locales severas

El CAPE también se utilizó en esta investigación que es el área en un diagrama termodinámico, delimitado por el gradiente real de temperatura del aire y el gradiente adiabático saturado, conectados por nivel de convección libre y el nivel de equilibrio. El nivel de equilibrio es el nivel cercano al tope de la tropósfera donde la flotabilidad negativa prevalece debido a que la parcela de aire se ha enfriado, por un proceso adiabático saturado, y ha alcanzado la misma temperatura que sus alrededores. Se calculó a través de la fórmula siguiente:

$$CAPE = g \int_{NCL}^{NE} \left( \frac{T_{vb} - T_{va}}{T_{va}} \right) dz \quad (4)$$

**donde:**

g - es una constante

NE - es el nivel de equilibrio

NCL - nivel de condensación libre

$T_{vb}$  - representa la temperatura virtual de la burbuja

$T_{va}$  - la temperatura virtual de la curva de estado.

Los umbrales para el CAPE son los siguientes:

- $CAPE < 1000$  convección débil.

- $1000 \leq \text{CAPE} < 2500$  convección moderada.
- $\text{CAPE} \geq 2500$  convección fuerte

Por último, se seleccionó el índice SWEAT que su valor indica amenaza de tiempo severo. Se calculó mediante la expresión siguiente:

$$\text{SWEAT} = 12 T_{d850} + 20 (TT - 49) + 2U_{850} + 5 U_{500} + 125(0.2 + \text{Sen } (f))$$

**donde:**

$T_{d850}$  - es la temperatura del punto de rocío en el nivel 500

TT - es el total de totales

$U_{850}$  y  $U_{500}$  - es la velocidad del viento en esos niveles y (f) es el ángulo que forman

Los umbrales son:

- $\text{SWEAT} > 300$  son posibles tormentas severas.
- $\text{SWEAT} > 400$  son posibles tormentas con tornados.

Para determinar la factibilidad en el pronóstico de la severidad mediante el uso de los índices en primer lugar se calcula la media y desviación estándar de cada evento de severidad.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En la [tabla 3](#) se observa la estadística del LI para los 4 primeros tipos de severidad y se muestra que las rachas de 90Km/h o más presentan los valores medios mínimos del LI y es también el fenómeno que menos variabilidad presenta.

El valor máximo le corresponde a las lluvias de más de 100 mm, en este caso el índice de inestabilidad presenta mayor variabilidad, encontrándose el 68% de los casos entre 1.27 y

-3.51, los valores umbrales empleados en el departamento especifican las ocurrencias de severidad para valores menores o iguales a -4. Como puede apreciarse, solo un pequeño por ciento de los casos aquí tratados cumple con esa condición. La condición señalada se cumple en mayor medida para el caso de las rachas de 90 Km/h o más, disminuyendo en los casos de la ocurrencia de granizos y de los tornados.

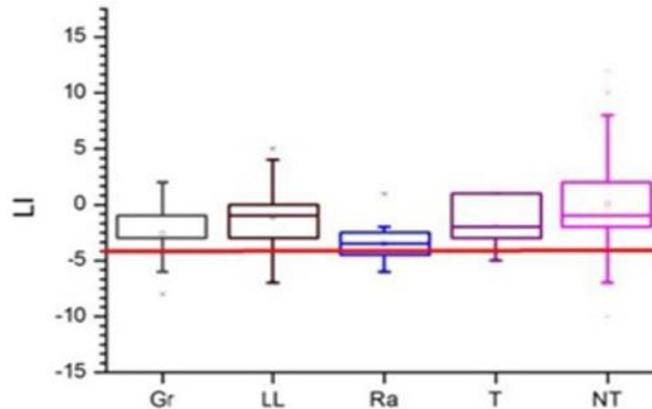
Además del diagrama de caja para cada fenómeno de severidad aparece un diagrama de caja para días claros, o sea días en que no se reportaron tormentas, pero sí se realizaron sondeos aerológicos. Los diagramas sirven para ilustrar la distribución típica de los índices y muestran la cantidad de casos que caen fuera de los umbrales definidos por la línea roja, además del solapamiento con los días claros.

En la [figura 1](#) se muestran los valores del LI para fenómenos severos y días claros. De utilizar el LI para pronosticar cualquiera de los 4 fenómenos de severidad lo hace mejor para las rachas y el peor caso para la ocurrencia de lluvias de más de 100 mm. Si se utiliza el LI para pronosticar la severidad como un todo (sin distinguir entre los fenómenos) el índice es un mal predictor.

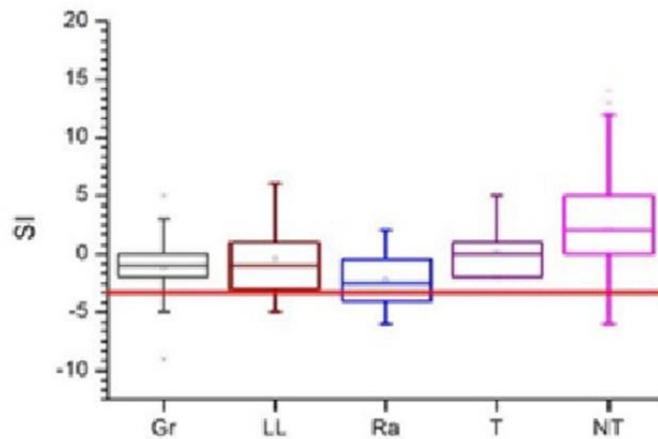
El valor umbral del índice SI es un poco más elevado que el LI ( $\leq -3$ ), aunque en muchas ocasiones los umbrales de ambos se toman iguales. Los valores medios del SI ([Tabla 3](#)) son también más elevados, su variabilidad es mayor, sin embargo, la habilidad de pronosticar de este índice es mucho menor, lo hace correctamente para los casos de las rachas y los granizos. La [figura 2](#) muestra los valores del SI.

**Tabla 3.** Promedio y desviación estándar del LI y SI

Fenómenos severos	LI		SI	
	Media	Desv Est.	Media	Desv Est.
Gr	-2.58	2.39	-1.27	2.70
LI	-1.12	2.39	0.22	2.90
Ra	-3.50	1.83	-1.89	2.61
T	-2.42	1.93	0.00	2.22
TLS	-1.90	2.4	-0.46	2.83



**Figura 1.** Diagrama de caja con la distribución de los valores del LI para los fenómenos severos y días claros



**Figura 2.** Diagrama de caja con la distribución de los valores del SI para los fenómenos severos y días claros

Tomando todos los eventos severos en su conjunto el SI también resulta un mal predictor para los umbrales establecidos actualmente.

En la [tabla 4](#) se observa el análisis estadístico realizado para el TT, SWEAT y el CAPE. El índice TT pronostica tormenta local severa con una probabilidad moderada cuando alcanza valores mayores o iguales a 50 y con mayor precisión para  $TT \geq 55$ . En los casos aquí analizados las medias quedan por debajo de los valores umbrales ([Tabla 4](#)), siendo las rachas y los granizos los fenómenos mejor pronosticados. Teniendo en cuenta todos los eventos severos una porción no muy elevada de los mismos sobrepasan los valores umbrales. Al igual que los anteriores índices se fallaría en la

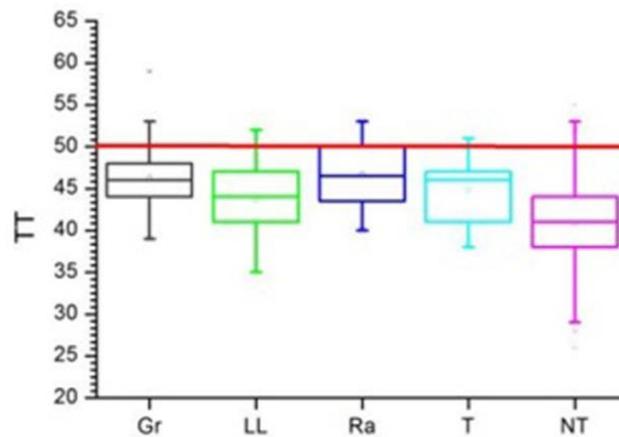
mayoría de las ocasiones en el pronóstico de la severidad.

En la [figura 3](#) se aprecia los valores del TT para los fenómenos severos y días claros. Teniendo en cuenta todos los eventos severos una porción no muy elevada de los mismos sobrepasan los valores umbrales. Al igual que los anteriores índices fallaría la mayoría de las ocasiones para pronosticar la severidad.

Los valores del SWEAT mayores a 300 indican la posibilidad de tormentas severas. La media de este índice no supera el valor umbral ([Tabla 4](#)), sin embargo, teniendo en cuenta la variabilidad de la muestra este valor es sobrepasado en solo 25 ocasiones, que representan el 21.2% de los casos. Las rachas

**Tabla 4.** Promedio y desviación estándar de TT, SWEAT y CAPE para los diferentes fenómenos severos.

Fenómenos severos	TT		SWEAT		CAPE	
	Media	Desv Est.	Media	Desv Est.	Media	Desv Est.
Gr	46.21	3.92	219.09	134.81	1300.33	1056.71
Ll	43.74	4.24	167.03	143.78	729.25	634.46
Ra	46.47	3.68	253.65	156.44	1557.36	859.74
T	44.75	3.86	167.42	165.42	1680.90	889.11
TLS	44.88	4.12	194.43	142.76	1089.22	908.47



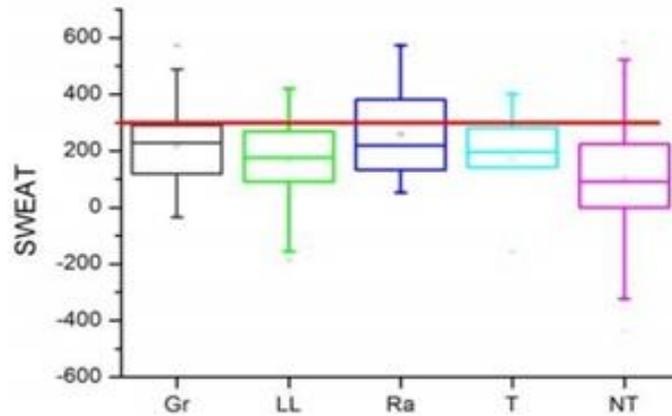
**Figura 3.** Diagrama de caja con la distribución de los valores del TT para los fenómenos severos y días claros.

de 90 Km/h o más se llevan el mayor peso dentro de los fenómenos severos que sobrepasan el valor límite, entonces estos fenómenos son los mejores que se pronostican con este indicador. La [figura 4](#) muestra un diagrama de caja con la distribución de los valores del TT para los fenómenos severos y días claros. En caso de pronosticar tiempo severo el SWEAT fallará en la mayoría de los casos.

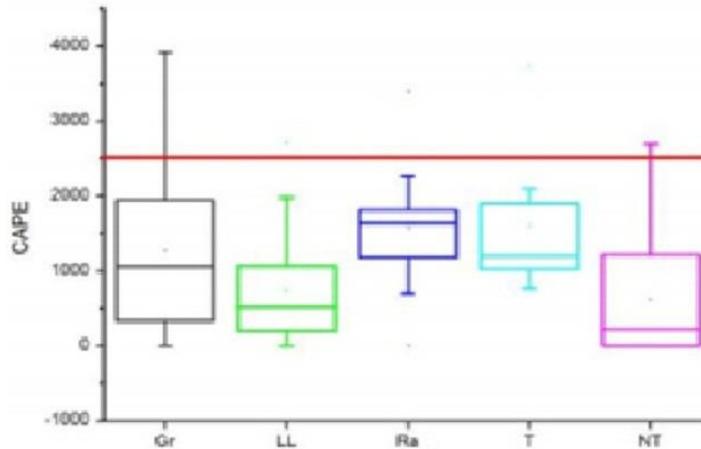
En la [tabla 4](#) se aprecia que en presencia de severidad el valor del CAPE debe ser elevado, ya que está relacionado con las corrientes ascendentes que en tiempo severo deben ser intensas, no obstante, los valores son bajos. Estos resultados coinciden con el obtenido por Aroche et al., 1998. Al igual que en los casos analizados anteriormente, el CAPE no pronostica eficientemente la severidad para los valores umbrales utilizados. Como se puede apreciar en la [tabla 4](#) todos los valores medios

quedan por debajo del valor umbral que indica severidad ( $\geq 2500$ ). En la base de datos solo se encontraron 5 valores del CAPE que superaron este límite.

La distribución de los valores del CAPE para los fenómenos severos y días claros se muestran en la [figura 5](#). En el caso del CAPE debe tenerse en cuenta que los sondeos empleados en la presente investigación se realizaron muy temprano en la mañana, en el horario de las 12:00 z cuando la energía presente en la atmósfera no es tan elevada como la que tiene lugar en horas del mediodía, razón por la cual el CAPE no alcanza los valores esperados cercanos al umbral establecido. Este último no se corresponde entonces con el horario de lanzamiento del globo, lo que sugiere que para pronosticar eficientemente la severidad con este indicador se debe emplear el CAPE calculado con el sondeo de las 13:00Z, si este se realiza.



**Figura 4.** Diagrama de caja con la distribución de los valores del TT para los fenómenos severos y días claros.



**Figura 5.** Diagrama de caja con la distribución de los valores del CAPE para los fenómenos severos y días claros.

Esto conlleva a preguntarse la efectividad de los índices en el pronóstico de la severidad relacionado con el horario de lanzamiento del globo sonda y la hora en que se producen los fenómenos severos, habitualmente en la tarde.

Los análisis de los índices de estabilidad indican que son inapropiados para la predicción del tiempo severo para los valores umbrales actuales. Estos han sido creados para condiciones existentes en regiones geográficas diferentes a las nuestras, por tanto, es necesario establecer nuevos umbrales que satisfagan el pronóstico de la severidad para la provincia de Camagüey sobre todo por las implicaciones que tendrá el mismo para la sociedad y economía territorial.

Para el establecimiento de nuevos umbrales se sigue la siguiente estrategia: se toma como umbral para la severidad el valor del 25 o el 75 percentil de los días claros según sea el caso, por ejemplo, para el LI se toma el valor del 25 percentil, debido a que valores superiores a este se solapan con los valores de los índices de los fenómenos de severidad, en este caso -2, o sea valores menores o iguales a -2 indican tiempo severo.

Los umbrales indicando alta probabilidad de tiempo severo se seleccionan, en este caso, entre el 75 percentil más elevado de todos los fenómenos severos y el 25 percentil del día claro, en este caso 2, entonces los umbrales para

el LI propuesto quedarían de la siguiente manera:

- $Li > 2$ , días claros con escasa probabilidad de tormentas severas
- $-1 > Li = 2$ , probable ocurrencia de severidad
- $Li \leq -1$ , alta probabilidad de ocurrencia de severidad

Los límites umbrales para la probable ocurrencia de severidad se seleccionan entre el umbral de severidad y el 25 ó 75 percentil opuesto.

Un método para determinar con rigurosidad la efectividad de una variable como parámetro de pronóstico es el empleo de las tablas de contingencia 2 x 2 (Wilks, 2006).

Doswell & Schultz, 2006 proponen este método para evaluar la efectividad de los índices de estabilidad, emplearemos dicho procedimiento en nuestro caso.

En la [tabla 5](#) se muestran los valores umbrales seleccionados para cada índice, en las columnas 3 y 4 aparecen la cantidad de eventos severos donde los índices sobrepasan el umbral (SI) y aquellos días con severidad en que este umbral no se alcanzó (No). En las columnas 5 y 6 los días claros en que se sobrepasó el umbral y no ocurrió severidad (SI) y los días claros en que los índices se mantuvieron por debajo del umbral.

Para explorar la capacidad de pronóstico de los índices de inestabilidad para el valor umbral seleccionado se calculó la probabilidad de detección (POD) y la razón de falsa alarma (FAR) para la combinación de días con severidad y días claros, empleando una tabla de

contingencia 2x2 (columnas 3 a 6). Los resultados se muestran en la [tabla 5](#). También se muestra en la tabla antes mencionada el Skill Score o Grado de acierto (S) que combina la información de la tabla de contingencia para obtener la relación entre el número de pronósticos correctos, el número total de pronósticos y el número esperado de pronósticos correctos. Este coeficiente es igual a 1 cuando todos los pronósticos son correctos e igual a cero en caso contrario. Puede observarse en la [tabla 5](#) que los índices LI, SI y TT pronostican correctamente la severidad, especialmente el LI, lo anterior se confirma con los valores alcanzados por el POD, donde todos son mayores de 50, mientras que el FAR está por debajo de 0.5.

Valores del POD del 45 y 35 % para el SWEAT y el CAPE respectivamente, nos dicen que no pronostican correctamente la severidad para los valores umbrales elegidos. Un análisis de la tabla y las figuras nos señala que el umbral seleccionado del CAPE está por encima de los valores que este indicador alcanza para el caso de las lluvias de 100 mm, estas constituyen la mayoría de los eventos severos estudiados. Por esta razón en la tabla de contingencia los casos de acierto son mayores que los fracasos, obteniéndose en consecuencia un valor bajo del POD y de S. Cuando no se tiene en consideración las lluvias de 100 mm, la capacidad del CAPE como predictor mejora ligeramente, con un POD de 51% y el Grado de acierto (S) alcanza un nivel bastante bajo (0.10), por lo que el CAPE, aunque mejora

**Tabla 5.** Valores umbrales, elementos de la tabla de contingencia 2x2 e índices indicativos de la efectividad del pronóstico.

	Umbral	TLS		NT		S	POD %	FAR
		SI	No	SI	No			
LI	-1	89	29	57	188	0.49	75	0.25
SI	0	77	41	84	161	0.28	65	0.35
TT	44	77	41	75	170	0.32	65	0.35
SWEAT	225	53	65	61	184	0.20	45	0.55
CAPE	1200	23	42	31	92	0.11	35	0.65

sigue siendo un mal predictor para el valor umbral seleccionado.

Con el SWEAT ocurre de similar manera, pero los valores de los índices por debajo del umbral se distribuyen entre la mayoría de los eventos severos, exceptuando las rachas de 90 Km/h o más.

Empleando el valor umbral del CAPE es posible pronosticar la severidad para todos los fenómenos severos menos las lluvias de 100 mm, con el valor umbral del SWEAT es posible pronosticar las rachas de 90 Km/h o más pero no los restantes fenómenos severos.

Al no ser efectivos los valores umbrales antes mencionados, se decide seleccionar nuevos umbrales, pero en este caso aumenta el grado de "incertidumbre" debido a que por encima del umbral queda un porcentaje mayor de índices obtenidos bajo la condición de días claros. En la [tabla 6](#) se muestran los resultados obtenidos luego de la selección de los nuevos umbrales.

Puede verse que la capacidad predictiva se incrementa para ambos indicadores,

sobresaliendo el CAPE donde la razón de falsa alarma disminuyó notablemente (0.07), mientras que la probabilidad de detección aumentó al 93%. Para el SWEAT la POD se incrementó del 45 al 67% y la falsa alarma (FAR) se mantiene en niveles racionales. Por las características del CAPE y todo lo referido anteriormente con respecto a este indicador, el valor umbral seleccionado debe valorarse con cautela y es preferible emplear los valores obtenidos del sondeo lanzado a las 13:00Z, si este se realiza.

En la [tabla 7](#) se muestran los umbrales propuestos por los autores de esta investigación.

En la [tabla 8](#) se muestra la aplicación de los nuevos umbrales a una muestra independiente, en ella aparece la fecha, los umbrales determinados para cada índice y el tipo de fenómeno o día claro que tuvo lugar. Como se puede apreciar, los pronósticos se pueden catalogar de aceptable exceptuando el SWEAT que no aciertan para los días claro.

**Tabla 6.** Nuevos valores umbrales, elementos de la tabla de contingencia 2x2 e índices indicativos de la efectividad del pronóstico para el SWEAT y el CAPE.

	Umbral	TLS		NT		S	POD %	FAR
		SI	No	SI	No			
SWEAT	150	74	44	61	184	0.64	67	0.33
CAPE	600	45	20	48	75	0.91	93	0.07

**Tabla 7.** Propuesta de valores umbrales para el pronóstico de severidad

Categoría	LI	SI	TT	SWEAT	CAPE
Escasa probabilidad TLS	LI > 2	SI > 2	TT < 41	SWEAT < 90	CAPE < 190
Probable ocurrencia severidad.	LI ≥ -1	SI ≥ 0	TT ≥ 41	SWEAT ≥ 90	CAPE ≥ 190
	LI ≤ 2	SI ≤ 2	TT ≤ 44	SWEAT ≤ 150	CAPE ≤ 600
Alta probabilidad de ocurrencia de severidad.	LI < -1	SI < 0	TT > 44	SWEAT > 150	CAPE > 600

**Tabla 8.** Propuesta de nuevos umbrales para una muestra independiente

Día	Mes	Año	CAPE	LI	SI	TT	SWEAT	Fenómeno
18	5	1986	299	0	-1	44	235	Día claro
2	10	1989	1417	-1	-1	44	191	Día claro
5	11	1989	36	0	0	45	43	Día claro
6	5	1989	0	1	1	42	214	Día claro
8	10	1990	1073	-1	-1	43	182	Día claro
8	11	1990	1226	-1	1	40	48	Día claro
31	8	2013	2392	-2	-	43	170	Granizo
28	8	2013	1681	-3	-	46	305	Granizo
29	8	2013	2500	-3	-	46	260	Granizo
10	9	2013	2392	-2	-	43	170	Lluvia de 100mm o más
10	8	2013	1670	-2	-	46	57	Granizo
16	9	2013	1311	-3	-	45	198	Granizo

### CONCLUSIONES

Los análisis de los índices de estabilidad indican que son inapropiados para la predicción del tiempo severo para los valores umbrales actuales y por tal motivo se establecen nuevos umbrales con el fin de satisfacer el pronóstico de la severidad para la provincia de Camagüey, sobre todo por las implicaciones que tendrá el mismo para la sociedad y economía territorial.

Los nuevos valores umbrales muestran ser efectivos con valores del POD por encima del 50% como se demostró a través de las tablas de contingencia.

Se debe tener cautela al aplicar los valores umbrales del CAPE y emplear preferiblemente los valores obtenido de los sondeos realizados en horas de la tarde.

### RECOMENDACIONES

La efectividad de los índices en el pronóstico de la severidad debe ser analizada en relación con el horario de lanzamiento del globo sonda, la distancia y la hora a la que se producen los fenómenos severos. Por tanto, es conveniente realizar este estudio con los sondeos lanzados en el horario de la tarde, que no fue posible por existir pocos casos coincidentes con los eventos de severidad.

### REFERENCIAS

- Aguilar, G., Carnesolta, M., Fernández, C. & Naranjo, L. 2005. Comportamiento 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.
- Alfonso, A. 1985: Pronóstico a corto plazo de turbonadas en la Provincia Ciudad de La Habana. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, No. 10, pp. 115-118.
- Aroche R., Pomares I., Martínez M., Figueroa B., Castellanos M., Rodríguez N. y Finalé A., 1999: Climatología de las Tormentas Convectivas Locales en Camagüey y provincias aledañas. Informe Científico-Técnico. Programa Territorial, CMP Camagüey, 35 p.
- Aroche, R., Gamboa F., Pomares I., Gonzalez A., Martínez M., Figueroa, 2001: Características de variables termodinámicas explicativas de la formación y desarrollo de las TLS. Informe Científico-Técnico. Programa Territorial, CMP Camagüey, 43 pp.
- Carnesolta, M. 2011. Transformación de la energía en la convección atmosférica local.

- Revista Cubana de Meteorología*, 12 (1), 3-10.
- Doswell III, C. A. & Schultz, D. M. 2006. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. *Electronic J. Severe Storms Meteor. 1*, pp. 1-14.
- Martínez, D., Báez, R., y Jo, I. 2001. La influencia de los perfiles meteorológicos a escala local sobre la lluvia en camagüey, Cuba. *Revista Brasileira de Meteorología*, v.16, n.1, pp. 67-79.
- Martínez, D., Pozo, D., Rivero, I., Gamboa, F., Novo, S., Borrajero I., Bezanilla, A., Pérez, C., Báez, R. & Echavarría, E. 2004. Caracterización de las tormentas convectivas sobre Cuba y su relación con la lluvia y los perfiles meteorológicos. Informe científico-técnico. INSMET, p. 259.
- Rivero, I., Martínez, D., Báez, R. & Echevarría, E., 2002. Los perfiles meteorológicos a las 12 GMT y la lluvia en Camagüey. *Revista Cubana de Meteorología*, 9 (2).23.
- Rojas Y., Carnesoltas, M., 2013. Configuraciones típicas que adoptan los campos de viento y temperatura a mesoescala en la región oriental bajo la influencia de los patrones a escala sinóptica favorables para las tormentas locales severas. Informe de Resultado, La Habana, Cuba: Instituto de Meteorología, 116 p.
- Schafer, J.T.1986: Severe Thunderstorm Forecasting. A perspective. *Weather and Forecasting*, Vol.1, 164-189.
- Showalter, A. K., 1953: A stability index for thunderstorm forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 34, p. 250-252.
- Shultz, P. 1989. Relationship of several stability indices to convective weather events in northeast Colorado. *Weather and Forecasting*, Vol. 4, 73-84
- Sosa, J.A.1981: Pronóstico objetivo de turbonadas para las provincias La Habana y Ciudad de La Habana. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, No. 3: 119-127.
- Tuduri E. & Ramis, C 1997. The Environments of Significant Convective Events in the Western Mediterranean. *Weather and Forecasting*, Vol. 12, pp. 294-306.
- Wilks, D. 2006. Statistical methods in the atmospheric sciences: an introduction. *Academic Press*.

**NOTA:** Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

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