

La energía del entorno donde se desarrolló el tornado del 27 de enero de 2019 en La Habana

The energy of the environment where the tornado of January 27, 2019 in Havana developed



<http://opn.to/a/dKet4>

Mario Carnesoltas-Calvo ¹*, Marlin Gutierrez-Rivera ²

¹Instituto de Meteorología, Cuba

²Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Cuba

RESUMEN: A partir del intenso tornado que se produjo en la Habana el 27 de enero de 2019, se estimó conveniente conocer cuál era el estado energético del entorno donde se produjo el mismo. Para este caso no solamente se tuvo en cuenta la relación entre las fuerzas de flotabilidad y las inerciales que ofrece el número de Bulk Richardson, sino también la energía del sistema mediante la adaptación de un diagrama ya empleado por autores anteriores. Al diagrama se le añadieron las curvas de energía del sistema, lo que no sólo permitió ubicar el tornado ocurrido en La Habana, sino su comparación con otros sistemas convectivos que se desarrollan comúnmente sobre Cuba.

Palabras claves: Energía convectiva, severidad local.

ABSTRACT: After the intense tornado that occurred in Havana on January 27, 2019, it was considered convenient to know what was the energy state of the environment where it occurred. In this case, not only was it considered just the relationship between the buoyancy and inertial forces offered by the Bulk Richardson Number, but also the energy of the system by adapting a diagram already used by previous authors. The energy curves of the system were added to the diagram, which not only allowed locating the tornado that occurred in Havana, but also comparing it with other convective systems that commonly develop on Cuba.

Keywords: Convective energy, local severity.

El análisis dimensional establece relaciones entre diferentes variables y parámetros físicos basados en la relación entre las dimensiones del problema a resolver. A partir del mismo se pueden obtener los denominados “números adimensionales” que permiten utilizar los resultados experimentales sobre fenómenos específicos en condiciones limitadas y extender su uso como modelo para casos generales que incluyen fenómenos de otras escalas, pero dinámicamente equivalentes. Uno de los números adimensionales que representa el proceso convectivo en la atmósfera es el Número de Bulk Richardson (BRN), que “establece la relación entre la inestabilidad no local y el cambio del viento

desde superficie hasta la mitad de la tropósfera, variables de las cuales depende el tipo de tormenta que se genera” (Stull, 2015).

En la mayoría de los casos donde se trata la inestabilidad no local, se emplea la variable diagnóstico Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE, por sus siglas en inglés). “La CAPE representa la energía potencial por unidad de masa que contiene una burbuja de aire, es decir, la energía que sería gastada si la burbuja fuera levantada y sobrepasara su Nivel de Convección Libre”. De acuerdo a [Fawbush y Miller \(1953\)](#) y [Foster y Bates \(1956\)](#), la CAPE está determinada por:

*Autor para correspondencia: Mario Carnesoltas-Calvo. E-mail mario.carnesoltas@insmet.cu

Recibido: 30/06/2019

Aceptado: 21/08/2019

$$CAPE = R \int_{p_{NCL}}^{p_{NE}} \frac{T_v(p) - T_{va}(p)}{p} dp \quad (1)$$

Donde R es la constante de los gases para el aire seco, T_v y T_{va} son la temperatura virtual de la partícula y del aire del entorno, respectivamente, p_{NCL} y p_{NE} son las presiones en el Nivel de Convección Libre y del Nivel de Equilibrio. La CAPE que se determinó en la investigación es la SBCAPE (Surface Based CAPE), que es la CAPE calculada a partir de superficie terrestre ([Stull, 2015](#)).

Toda manifestación de APE, incluyendo la CAPE, constituye una medida de la energía que presentaría una tormenta de llegar a producirse. Esto quiere decir que, aunque la CAPE, pueda determinarse en cualquier punto del espacio, ya que su cálculo depende de variables primarias y continuas que están en todos los puntos de la atmósfera, esa variable no se materializa físicamente hasta que la tormenta no se produce. En realidad, la CAPE es el mecanismo más eficaz que presenta la atmósfera para tratar de restablecer su estado de equilibrio inicial (Carnesoltas, comunicación personal). De igual forma, esta energía es un nivel de referencia de hasta dónde pudiera desarrollarse la nube de tormenta, lo que no quiere decir que esta tenga que llegar obligatoriamente hasta el NE, puede limitarse por debajo del mismo o incluso superarlo, ya que dicho desarrollo depende de otros factores externos del entorno, y de la energía inicial.

El BRN se puede determinar como:

$$BRN = \frac{CAPE}{0.5 (\Delta M)^2} \quad (2)$$

Donde la diferencia ΔM se calcula a partir de:

$$\Delta M = \sqrt{\Delta U^2 + \Delta V^2} \quad (3)$$

$$\Delta U = U_m - U_{cs} \quad \Delta V = V_m - V_{cs} \quad (4)$$

Aunque realmente ΔM no constituye una cizalladura, por no ser la razón entre el cambio del viento y la distancia en que se produce ese cambio, sino sólo la medida de la variación del viento, se le llamará cizalladura respetando lo planteado por los autores del BRN; U_m y V_m son los valores medios

de las componentes de la velocidad del viento desde superficie hasta la mitad de la tropósfera, y U_{cs} y V_{cs} los valores promedios de las componentes del viento en la capa superficial. En este caso el viento medio se determinó entre superficie y los 500 hPa, y la capa superficial está comprendida entre superficie y los 0.5 km.

Se puede apreciar que el número de Bulk Richardson es una semejanza al número de Richardson que se emplea en la Capa Fronteriza Atmosférica, ya que en ambos se relacionan las fuerzas de flotabilidad y las inerciales, para estimar cuáles de estas dos fuerzas es la que influye más en la tormenta, y por tanto que regirán su comportamiento y desarrollo.

A pesar del significado físico que aportan los números adimensionales, el valor numérico que ellos pueden presentar no es suficiente a la hora de analizar las tormentas, esto se debe a que matemáticamente, constituyen una razón entre dos variables, y por ello distintas combinaciones entre la CAPE y la cizalladura vertical pueden dar el mismo valor de BRN, pero su significado físico ser totalmente distinto.

Una posible solución a este problema es determinar la raíz cuadrada del producto de ambas variables diagnóstico, quedando:

$$Es = \sqrt{0.5 CAPE \Delta M^2} \quad (5)$$

Lo que físicamente es una forma de representar la energía del sistema.

La clasificación de los tipos de sistemas convectivos y sus relaciones con la cizalladura vertical y la CAPE, o sea, de acuerdo a la cantidad de energía del sistema y su entorno, se ha estado planteado desde la década de 1980 ([Carbone, 1980](#); [Weisman and Klemp, 1982](#)). En la [figura 1a](#) se muestra el esquema de dichos autores con la ubicación de algunos sistemas como ejemplo (ecos arqueados, superceldas, multiceldas, celdas simples, etc.), teniendo en cuenta el BRN. Al retomar la idea años después, [Jorgensen y Weckwerth \(2003\)](#), presentaron un nuevo esquema de cizalladura contra la CAPE ([Figura 1b](#)), al cual también le añadieron sobre el mismo la ubicación correspondiente a los Derechos, las líneas de rápido movimiento, bandas estrechas de frentes

fríos, bandas de lluvia de ciclones y sistemas convectivos de baja energía; además, en la parte inferior del esquema señalaron la zona de los sistemas convectivos ordinarios, así como la diferencia entre en las zonas donde se desarrollan los sistemas de los trópicos y de las latitudes medias.

Bajo estas mismas ideas, se elaboró un nuevo diagrama con dos modificaciones, de manera que se pudiera discernir con mayor claridad la energía que presentaba el tornado ocurrido el 27 de enero de 2019 en La Habana. La primera modificación consistió simplemente en rotar los ejes de la CAPE y del cuadrado de la diferencia de velocidades (tomada como cizalladura vertical según el BRN), con vistas a que los mayores valores de la variable CAPE estuviera dirigida en sentido vertical hacia arriba, como lo hacen las partículas durante la convección, y la cizalladura vertical del viento dirigida en sentido horizontal como lo hacen las mismas partículas cuando son desviadas de la vertical local debido al viento horizontal. Pero lo de mayor interés consistió en introducir en el esquema no solamente las líneas de iguales valores del BRN, sino también de lo que se denominó Energía del Sistema (Es). De esta forma no sólo se puede conocer el valor del número adimensional, sino bajo qué condiciones energéticas del entorno se había desarrollado el tornado.

Para el diseño de este esquema los valores en los ejes se simplificaron, por ello a la hora de ubicar las tormentas es necesario dividir el valor de la

CAPE entre 1000 y de la cizalladura entre 10. Los valores altos de BRN corresponden a un fuerte empuje hidrostático en relación con la cizalladura vertical del viento, los que están asociados con las superceldas; los valores intermedios a los sistemas de multiceldas; mientras que los valores bajos se asocian a las celdas ordinarias.

En la [figura 2](#) se muestra el diagrama diseñado, en el que se encuentra representado el tornado que se produjo en La Habana el día 27 de enero de 2019. Además, para analizar de manera general el dominio en que se desarrollan los sistemas convectivos que se presentan bajo las condiciones del trópico insular, se seleccionó una muestra de 17 casos de Tormentas Locales Severas (TLS) y de 47 Tormentas Eléctricas ordinarias (TE) del año 2017, donde los reportes fueron extraídos de la relación de TLS que se recoge en el Centro de Pronóstico y de la Base de Datos de Clima respectivamente, mientras que los datos para los cálculos de la CAPE y de la cizalladura de todos los sistemas convectivos, incluyendo el que permitió la ocurrencia del tornado en cuestión, fueron determinados a partir del Sistema de Modelación Rapid Refresh (RAP).

En la [figura 2](#) se puede observar que el grupo de tormentas no supera los valores de 2100 J/kg de CAPE y de 30 (m/s)² de cizalladura, todas pertenecientes al entorno de bajas energías. De igual forma el tornado, a pesar de los daños que ocasionó y de la intensidad que alcanzó (EF4 según la escala mejorada de Fujita), se desarrolló en un

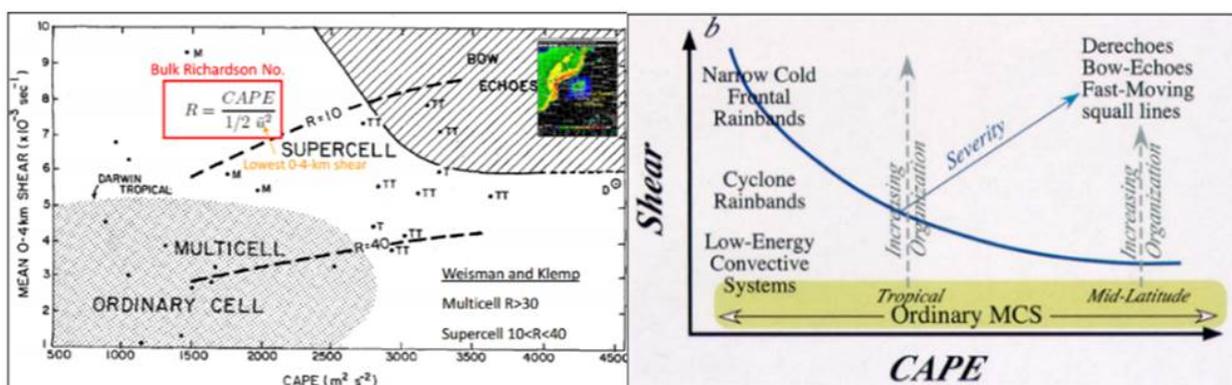


Figura 1. Diagrama de energías: a) Convección en función de la Cizalladura y de la CAPE ([Weisman and Klemp, 1982](#)); b) Clasificación de los tipos de sistemas convectivos y sus relaciones con la cizalladura vertical y la CAPE ([Jorgensen y Weckwerth, 2003](#)).

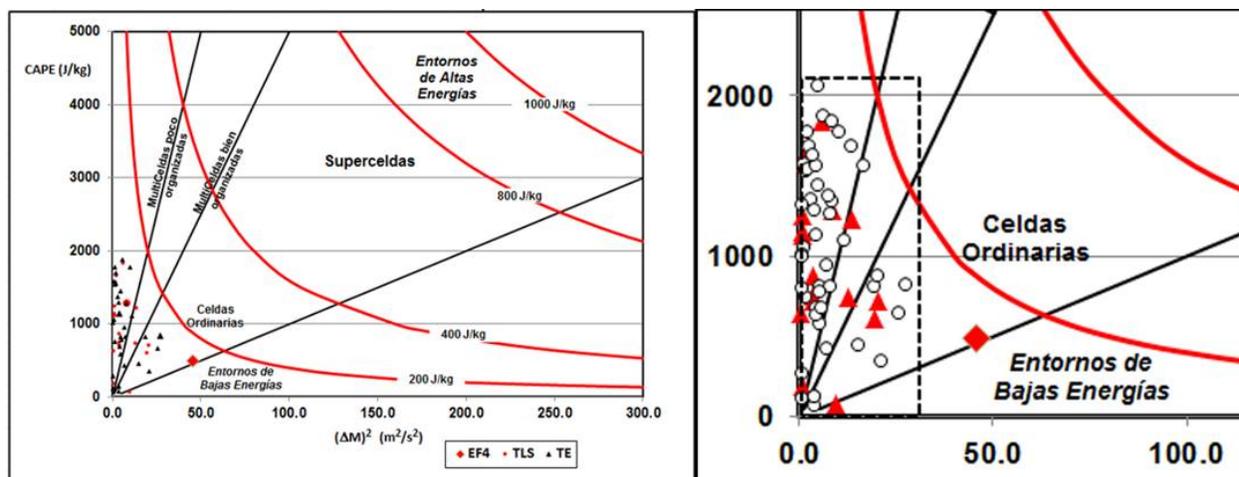


Figura 2. Diagrama de energías. Representación del Tornado del 27 de abril de 2019 y de un grupo de TLS y TE. Los valores de igual BRN se presentan con las líneas rectas, mientras que los de igual Es (J/kg) por las líneas curvas.

entorno donde las energías eran bajas, con valores de la CAPE de 491 J/kg y de cizalladura de 43 (m/s)²; lo que no significa de ninguna manera que el tornado o las tormentas no sean intensas, sino que para que se produjeran, fue necesario la intervención de factores externos. Para la mayoría de los casos de TLS y TE parecen haber intervenido como factores externos para el inicio de la convección profunda, la interacción de los Rollos Convectivos Horizontales (HCR, por sus siglas en inglés), con una superficie de discontinuidad, ya sea el frente de brisa de mar o el frente de racha de tormentas en etapa de disipación. Mientras que, en el caso de tornado del 27 de enero de 2019 en La Habana, parece haber obtenido su energía a partir del desarrollo de un vórtice en el eco arqueado, como parte de un Sistema Convectivo Cuasi-lineal.

Esto supone plantearse que las condiciones bajo las cuales se desarrollan los sistemas de tormentas en el trópico insular, difieren en gran medida de aquellas que generan las tormentas en latitudes medias, a pesar de que el BRN pudiera tener el mismo valor numérico, de acuerdo a la diferencia de energía que existe en el entorno. Por ello, a la hora de realizar análisis e investigaciones sobre las tormentas que se generan en el trópico, aunque se tomen en cuenta los resultados que se identifiquen en las altas latitudes, deben ser corroborados para los casos que se ponen de manifiesto en esa región

geográfica; de no cumplirse las mismas condiciones, deben buscarse los mecanismos y factores que generan esos eventos en latitudes bajas, teniendo en cuenta los valores de energía que intervienen en el proceso.

Se recomienda el empleo de este diagrama como herramienta para el análisis energético de los distintos sistemas convectivos que se producen.

REFERENCIAS

- Carbone, R., Foote, B., Moncrieff, M., Gal-Chen, T., Cotton, W., Hjelmfelt, M., Roux, F., Heymsfield, G., and Brandes, E., (1980). Convective dynamics: Panel report. Chapter 24, 391-401.
- Fawbush, E. J. & R. C. Miller, (1953). A method for forecasting hailstone size at the earth's surface. Bull. Amer. Meteor. Soc., 34, 235 - 244.
- Foster, D. S. & F. Bates, (1956). A hail size forecasting technique. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 37, 135 - 141.
- Jorgensen, D. P., & Weckwerth, T., (2003). Forcing and organization of convective storms. Radar and Atmospheric Science: A collection of essays in honor of David Atlas, R.A. Wakimoto and R.C. Srivastava. AMS Meteorological Monographs, American Meteorological Society, Boston, 75 - 103.

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.

Weisman, M. L., & Klemp, J. B., (1982). The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind and buoyancy. National Center for atmospheric research, Boulder. CO 80307, 110, 504 - 519.

Mario Carnesoltas Calvo. Centro de Física, Instituto de Meteorología, Cuba. E-mail: mario.carnesoltas@insmet.cu
Marlin Gutierrez Rivera. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Cuba. E-mail: mgrivera@instec.cu

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

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/)