



Una normalización de la Energía Potencial Disponible para la Convección

A normalization of the Available Potential Energy for the Convection

Mario Carnesoltas-Calvo✉

Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

Resumen

El conjunto CAPE – CIN es una variable diagnóstico de gran utilidad para conocer la energía potencial disponible para la convección en un momento y lugar dados. Sin embargo, como su determinación parte de un área mediante la integral entre las curvas de la temperatura de la partícula en ascenso y la de la temperatura del entorno, se corre siempre el riesgo de obtener iguales valores con diferentes distribuciones verticales en ambas curvas. Una solución es la normalización del valor del conjunto, teniendo en cuenta la altura media que ocupa dicha área y el espesor de la llamada capa convectiva, sin tener que modificar sus unidades de energía. Por ello se propone el empleo de HCAPE – HCIN (conjunto normalizado), en la comparación por ejemplo, con la energía correspondiente de las corrientes descendentes.

Palabras claves: Energía potencial disponible, Convección, CAPE normalizada

Abstract

The CAPE – CIN set is a quite useful variable to know the available potential energy for convection at a given place and time. However, as its determination is based on an area between the curves of the ascending particle temperature and the environmental temperature, there is always a risk of obtaining equal areas for different vertical distributions of both curves. One solution is the normalization of the set value, taking into account the mean height of the considered area and the depth of the so called convective layer, without having to modify its energy units. Therefore the use of HCAPE – HCIN (normalized set) is proposed for the comparison, for instance, with the corresponding energy of descendent streams.

Key words: Available potential energy, Convection, CAPE normalized

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

Recibido: 3/4/2017

Aceptado: 18/7/2017

[Haurwitz \(1941\)](#), mostró que “las energías interna (cvT) y potencial (gz) por unidad de masa, contenidas en una columna que se extiende hasta el tope de la atmósfera, admite una relación constante entre ambas, mientras que prevalezca el equilibrio hidrostático”, por lo tanto “la ganancia neta de energía cinética (Ek) ocurre en general, a expensa tanto de la energía potencial como la interna, en esta misma relación”. Lo anterior implica que es conveniente tratar las energías potencial e interna como una forma única de energía, denominada *energía potencial total*. Evidentemente, la *energía potencial total* no es una buena medida de la cantidad de energía disponible para la conversión en energía cinética. Entonces, la definición de la Energía Potencial Disponible (conocida como APE por sus siglas en inglés), será “la diferencia entre la energía potencial total de toda la atmósfera y la energía potencial total que deberá existir si las masas fueran redistribuidas bajo la conservación de la temperatura potencial hasta lograr una estratificación horizontal estable”.

Las propiedades de la APE así definida son: La suma de la APE y de la Ek se conserva bajo un flujo adiabático; la APE está totalmente determinada por la distribución de las masas; si la estratificación es horizontal y estáticamente estable, la APE = 0. De esta última se infiere que si la estratificación no es ni horizontal ni estáticamente estable, la APE > 0.

[Lorenz \(1955\)](#), partiendo del hecho que bajo un movimiento adiabático la energía total de toda la atmósfera debe permanecer constante, concluyó que “las únicas fuentes o sumideros para la energía cinética de toda la atmósfera será entonces la Energía Potencial y la Energía Interna”. [Pearce \(1978\)](#), definió la APE como “la propiedad de la atmósfera en la cual, la fuente de energía es la que se genera por la distribución espacial existente entre las fuentes y los sumideros de calor”. Las definiciones

sobre APE tienen como propósito lograr una expresión que, con buena aproximación, sea proporcional a la varianza de la temperatura media global, haciendo particiones entre las componentes zonal y de la perturbación y, además, una componente que incluya una distribución media de la temperatura en la vertical. Las componentes zonal y de la perturbación, que dependen de la varianza de la temperatura sobre las superficies isobáricas, son también referidas como la componente de la baroclinicidad de la APE. La primera componente del ciclo de energía, la tasa de generación de Energía Potencial Disponible, $G(A)$, se calcula por una fórmula dada por Lorenz (citado por [Pearce, 1978](#)):

$$G(A) = \frac{1}{g} \iint q N_A dp d\sigma \quad (1)$$

donde:

$$A = \frac{1}{g} \iint c_p \theta \left\{ \left(\frac{p}{p_0} \right)^\kappa - \left(\frac{p_r}{p_0} \right)^\kappa \right\} dp d\sigma$$

Y la integral se extiende sobre toda la atmósfera; q es la tasa de calentamiento por unidad de masa, $d\sigma$ es un elemento de área de la superficie de la tierra (e. g. $d\sigma = (a^2 \cos\phi) d\phi d\lambda$ donde ϕ es la latitud y λ es la longitud y N_A es el llamado “factor de eficiencia” definido por:

$$N_A = 1 - \left(\frac{p_r}{p_0} \right)^\kappa$$

Siendo p_r el promedio de la presión en la superficie de temperatura potencial constante que atraviesa el elemento de masa $(1/\rho) dp d\sigma$ a la presión p ; g es la aceleración debido a la gravedad y $K = R_d/c_p$ donde R_d es la constante del aire seco y c_p es el calor latente a presión constante.

En la mayoría de los casos que se trata sobre corrientes ascendentes y descendentes en los procesos convectivos en la atmósfera, aparece

como uno de los principales factores la Energía Potencial Disponible para la Convección (conocida por sus siglas en inglés como CAPE). Sin embargo, se hace necesario aclarar algunas de sus características, pues con bastante frecuencia se interpreta de manera incorrecta.

En primer lugar, y a pesar de que el valor de la CAPE aparece junto a los índices termodinámicos en los diagramas elaborados por estaciones aerológicas automáticas, cabe señalar que no es un índice termodinámico ni una medida del grado de estabilidad vertical. [Doswell III & Schultz \(2006\)](#), la consideraron “un ejemplo de variable combinada, cuyo cálculo es una integral vertical de múltiples variables de estados. Por lo general, se observan altos valores de la CAPE en aquellos lugares donde los niveles bajos contienen gran humedad con gradientes verticales condicionalmente inestables hasta la parte inferior de la tropósfera media”. Estos autores también plantearon que “la CAPE incluye campos que evolucionan cuasi – independientes y pueden superponerse por procesos de advección diferencial. Representa los lugares donde los campos de la humedad y de la inestabilidad condicional están superpuestos adecuadamente, pero no donde ellos estarán (o no estarán) superpuestos en un futuro”. Por esta razón la consideran una variable diagnóstico y no una variable pronóstico.

La CAPE además, es un buen ejemplo de una variable diagnóstico con un sólido argumento físico. [Moncrieff & Green \(1972\)](#), plantearon que “es la energía de flotabilidad acumulada en la capa, determinada matemáticamente por una integral”. “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”. Sus unidades son de energía (J/kg), equivalentes al cuadrado de las

velocidades verticales de la nube convectiva luego de alcanzar su Nivel de Convección Libre (NCL). Desde la década de 1950 varios investigadores propusieron expresiones matemáticas para calcularla. Así, de acuerdo a [Fawbush & Miller \(1953\)](#), y [Foster & Bates \(1956\)](#), la CAPE está determinada por

$$CAPE = R \int_{P_{NCL}}^{P_{NE}} \frac{T(p) - T^a(p)}{p} dp \quad (2)$$

donde: R es la constante de los gases, $T(p)$ y $T^a(p)$ son las temperaturas de la partícula y del aire del entorno, P_{NCL} y P_{NE} son las presiones en el NCL y del Nivel de Equilibrio (NE). Debido al alto contenido de humedad que siempre existe en los trópicos se recomienda emplear la temperatura virtual.

“La virtud de la integral con respecto a los índices que emplean derivadas, es que resulta inherentemente menos sensible a pequeñas diferencias. Desafortunadamente esta integración no tiene un valor único” ([Doswell III & Schultz, 2006](#)). Según [Blanchard \(1998\)](#), “la CAPE es un valor integrado verticalmente y mide la energía de flotabilidad acumulada en la capa de convección libre, o sea, desde el NCL hasta el NE”. [Moncrieff & Miller \(1976\)](#), la consideraron como un índice, pero aclararon que no es una medida de la inestabilidad. En un diagrama inclinado $T - \log p$ o en un tefigrama, el valor de la CAPE es proporcional al área comprendida entre el perfil de la temperatura (o temperatura virtual) y la adiabática saturada de la parcela que asciende. El área positiva está determinada por dos parámetros:

- El espesor de la capa de convección libre entre el NCL y el NE.
- La magnitud media de la flotabilidad caracterizada por el exceso de temperatura virtual de la parcela que asciende y el ambiente.

De esta forma es posible obtener siempre diversos valores numéricamente iguales de la

CAPE con diferentes distribuciones verticales y con significados también muy diferentes físicamente para las corrientes verticales. Luego, es necesario considerar la *relación de aspecto* del área positiva cuando se requieren interpretar y aplicar los valores de la CAPE.

Para evaluar la distribución vertical y la magnitud de la flotabilidad asociada con la CAPE, [Colby \(1984\)](#), presentó un método simple e informativo que consiste en dividir la CAPE entre el espesor de la capa de convección libre, obteniéndose la denominada NCAPE (CAPE Normalizada) con la desventaja de cambiar unidades de energía a unidades de aceleración. [Wicker & Cantrell \(1996\)](#), y [McCaul & Weisman \(1996\)](#), sugirieron que “*los valores relativamente altos de la CAPE en los niveles bajos y la fuerte aceleración asociada, justamente debajo de la base de la nube pueden ser críticamente importantes para el desarrollo de perturbaciones en la presión y de meso ciclones, ambos en los niveles bajos*”. Por esta razón en el trabajo operativo calculan la CAPE desde el NCL hasta 3 km más arriba (LFC3) y de igual manera NCIN.

Para una evaluación correcta de la energía en la vertical no basta con la CAPE, sino se requiere tener en cuenta simultáneamente el área negativa que representa la energía de

inhibición de la convección, conocida por CIN. Según [Moncrieff & Green \(1972\)](#), “*la CIN es una medida de cuan improbable es el desarrollo de tormentas o de la energía que se necesita para el desarrollo de las tormentas, es decir, es una medida de la energía que se requiere suministrar a la burbuja de aire para que alcance su NCL y pueda continuar su ascenso de forma independiente*”. La energía del área negativa está dada por la CIN:

$$CIN = R \int_{P_{5-10}}^{P_{NCL}} \frac{T(p) - T_a(p)}{p} dp \quad (3)$$

donde: p_{5-10} es la presión en los primeros 500 – 1000 m de altura.

[Blanchard \(1998\)](#), señaló que “*la notable diferencia encontrada entre la correlación de CAPE – LI y NCAPE – LI, indicaba que NCAPE debe ser un mejor indicador de la flotabilidad media que la CAPE. La teoría simple de la parcela omite los efectos de la carga de agua, de los procesos denominados entrainment y detrainment y de las perturbaciones de la presión*”.

Para comprender mejor el papel que juega la relación de aspecto del área de la CAPE y la CIN, en la [figura 1](#), se muestra un esquema de tres posibles variantes de distribución de áreas que representan el conjunto CAPE – CIN.

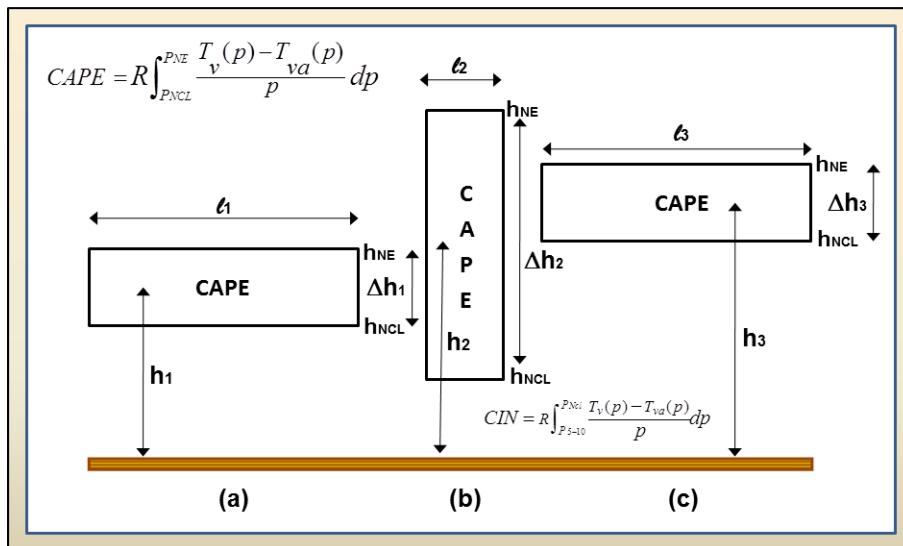


Figura 1. Esquema de tres posibles variantes de distribución del conjunto CAPE – CIN

Como las áreas de los tres rectángulos son iguales, también lo será el valor de la CAPE (expresado en J/kg):

$$\left. \begin{aligned} l_1 \Delta z_1 = l_2 \Delta z_2 = l_3 \Delta z_3 \\ CAPE_1 = CAPE_2 = CAPE_3 \end{aligned} \right\} l = \sum_{NCL}^{NE} \Delta T \quad (4)$$

Al normalizarlas por el método propuesto por [Wicker & Cantrell \(1996\)](#), y [McCaul & Weisman \(1996\)](#), sólo se tendrá en cuenta el espesor de la capa y con ello sus dimensiones se transforman del original cuadrado de la velocidad $[L^2T^{-2}]$ a dimensiones de aceleración $[LT^{-2}]$, y puede apreciarse entonces que:

$$NCAPE_1 = NCAPE_3 > NCAPE_2 \quad (5)$$

Sin embargo, para la atmósfera no es lo mismo el caso (a) que el caso (c). Se puede apreciar también que dicho procedimiento, tratando de evitar que la distribución vertical de la energía y los multivalores posibles de ambas variables conduzca a errores, no tiene en cuenta la altura en que se puede encontrar la capa de máxima concentración de energía.

Una posible solución que propuso [Carnesoltas et al. \(2013\)](#), resultó cuando ambas variables se multiplican por un factor adimensional que tiene en cuenta, tanto la altura en que se encuentra el centro geométrico del área como el espesor de la llamada capa convectiva. De esta forma:

$$CAPE \left(1 - \frac{h_{CAPE}}{\Delta z_{CAPE}} \right) \text{ y } CIN \left(1 - \frac{h_{CIN}}{\Delta z_{CIN}} \right) \quad (6)$$

Pero como:

$$\left. \begin{aligned} h_{CAPE} = \frac{h_{NE} + h_{NCL}}{2}; h_{CIN} = \frac{h_{NCL}}{2} \\ \Delta z_{CAPE} = h_{NE} - h_{NCL}; \Delta z_{CIN} = h_{NCL} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Al sustituir (6) en la expresión para el cuadrado de la velocidad de la corriente vertical ascendente de la convección profunda, teniendo en cuenta (7), se obtuvo:

$$w_c^2 = 2 CAPE_v \left(1 - \frac{h_{CAPE}}{\Delta z_{CAPE}} \right) - 0.5 CIN_v = HCAPE_v - 0.5 CIN_v \quad (8)$$

A estas nuevas variables diagnóstico normalizadas se denominaron $HCAPE_v$ y $HCIN_v$ para distinguirlas de las anteriores y señalar además que están calculadas con la temperatura virtual. Entonces el cálculo por (8) mantendrá las dimensiones del cuadrado de la velocidad $[L^2T^{-2}]$, y a pesar que los valores de la velocidad vertical resultan menores ($\approx 60\%$), se obtiene que “con iguales valores de la CAPE en los tres casos, a la parcela que asciende le resultará más eficiente utilizar la energía disponible contenida en una capa profunda ubicada desde los niveles inferiores (como la (b) en la [figura](#)), siguiéndole en orden una capa delgada (a), y resultándole más difícil emplear la energía contenida en la capa delgada ubicada a mayor altura (c)”. Así, si la parcela logra sobrepasar el NCL por cualquier mecanismo, sus velocidades serían para cada caso:

$$w_{cp2} > w_{cp1} > w_{cp3} \quad (9)$$

Resulta fácil inferir que para que se presente el caso (c), las capas bajas deberán tener muy poca humedad, de manera que la altura del NCA se encuentre más elevado y además, deberá existir un menor gradiente vertical de temperatura para que el NCL se encuentre aún más alto. Con estas condiciones le resultará muy difícil a las parcelas que ascienden alcanzar estos niveles tan altos y transformar esta energía potencial en cinética. Como puede notarse, el conjunto $HCAPE - HCIN$ constituye una de las principales fuentes de energía que poseen las parcelas que ascienden por los procesos convectivos desde la Capa Fronteriza Atmosférica, pero en definitiva, las condiciones imperantes a β - macro y α - meso escala, determinarán el grado de transferencia de energía entre la tormenta y el entorno.

Se puede plantear entonces que el conjunto $HCAPE - HCIN$ es una variable diagnóstico

que refleja mejor la energía potencial disponible para la convección, recomendando su empleo en los modelos numéricos, en especial los de alta resolución y para el balance de energía entre las corrientes ascendentes y descendentes de las celdas convectivas.

Agradecimiento

Deseo agradecer a la Dra. Gisell G. Aguilar Oro, en recuerdo a su memoria, el apoyo prestado en la realización de esta investigación como parte de los Proyectos Científicos que dirigió en forma destacada sobre las Tormentas Locales Severas.

Referencias

- Blanchard, D., 1998: *Assessing the vertical Distribution of Convective Available Potential Energy*. *Wea. For.*, 13, 870 – 877.
- Carnesoltas, M., M. Sierra, D. Rabelo y E. Fernández, 2013: *Factores físicos que influyen en la caída de granizos y en las Aeroavalanchas sobre Cuba*. Informe de Resultado. Instituto de Meteorología, 65 pp.
- Colby, F. D., Jr., 1984: *Convective inhibition as a predictor of convection during AVESESAME II*. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 2239 – 2252.
- Doswell III, C. and M. Schultz, 2006: *On the Use of Indices and Parameters in Forecasting Severe Local Storms*. *Electronic J. Severe Storms Meteor.*, 1 (3), 1– 22.
- Fawbush, E. J. and 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. and F. Bates, 1956: *A hail size forecasting technique*. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 37, 135 – 141.
- Haurwitz, B., 1941: *Dynamic Meteorology*. New York, McGraw-Hill Book Co., 365 pp.
- Lorenz, E. N., 1955: *Available Potential Energy and the Maintenance of the General Circulation*. *Tellus*, 157 – 167.
- McCaul, E. W. and M. L. Weisman, 1996: *The dependence of simulated storm structure on variations in the shape of environment buoyancy and shear profiles*. Preprints, 18th Conf. on Severe Local Storms, San Francisco, CA, Amer. Meteor. Soc., 718 – 722.
- Moncrieff, M. W. and J. S.A. Green, 1972: *The propagation of steady convective overturning in shear*. *Quart. J. Meteor. Soc.*, 98, 336 – 352.
- Moncrieff, M. W. and Miller, 1976: *The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines*. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 373 – 394.
- Pearce, R. P., 1978: *On the concept of available potential energy*. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 104, 737 – 755.
- Wicker L. J. and L. Cantrell, 1996: *The role of vertical buoyancy distributions in miniature supercells*. Preprints, 18th Conf. on Severe Local Storms, San Francisco, CA, Amer. Meteor. Soc., 225 – 229.