

Tormentas Locales Severas. Tres Condiciones Necesarias

Severe Local Storms. Three Necessary Conditions



Mario Carnesoltas-Calvo ¹*

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

¹Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba

RESUMEN: Se presenta una actualización sobre los métodos y procedimientos que se utilizan en las investigaciones sobre las Tormentas Locales Severas, con un análisis crítico de los dos razonamientos principales empleados. Se exponen las ventajas de considerar sólo tres condiciones necesarias para las manifestaciones de severidad local como conjuntos de procesos causa - efecto, y no como valores umbrales de variables independientes.

Palabras clave: Tormentas Locales Severas, Condiciones necesarias.

ABSTRACT: An update is presented on methods and procedures used in research of Local Severe Storms, together with a critical analysis of the two main approaches applied. The advantages of using only three necessary conditions for manifestations of local severity as sets of cause - effect and not as thresholds of independent variables are shown.

Keywords: Severe Local Storms, Necessary conditions.

INTRODUCCIÓN

A pesar que la duración temporal y extensión espacial de las denominadas Tormentas Locales Severas (TLS) son mucho menores que las de un huracán, por citar sólo un ejemplo de otro fenómeno meteorológico severo, no hay dudas que resultan también un peligro para la vida humana y causan pérdidas económicas y materiales. La tarea de pronosticarlas aún continúa siendo de enorme interés tanto desde el punto de vista científico como práctico, y no son pocos los materiales científicos publicados en las últimas décadas sobre las investigaciones y experimentos realizados.

“Aunque los umbrales para definir la ocurrencia o no de cada uno de los tipos de manifestaciones de severidad que provocan las TLS siguen teniendo carácter subjetivo” (Alfonso, 1994), los Servicios Meteorológicos Nacionales (SMN) coinciden en incluir en ellas los tornados, la caída de granizos y los vientos lineales de 25 m/s o más. En cualquier latitud del planeta, menos en la franja ecuatorial y los polos, existen reportes de caída de granizos, mientras

los vientos lineales severos o no, ocurren con mucha mayor frecuencia. Los tornados en latitudes medias y continentales están asociados por lo general a las tormentas superceldas (Browning, 1965), mientras que Varela (2017), demostró que “en condiciones del trópico insular son de menor intensidad y se asocian a la vorticidad generada por interacciones entre estructuras coherentes y superficies de discontinuidad en la Capa Fronteriza Atmosférica”; por esta razón los tornados no se incluyen en la presente comunicación corta. Sin embargo, aunque las “lluvias localmente intensas de corta duración”, no están consideradas dentro de las TLS, el hecho que sus orígenes estén vinculados a los procesos de los niveles medios de la tropósfera, al igual que los vientos lineales y los granizos, permite incluirlas en un análisis como el actual sobre los trabajos de investigación. Debe aclararse que con esto no se pretende en lo absoluto modificar la clasificación oficial adoptada por los SMN de los que se consideran o no eventos localmente severos, sino por la única razón de agrupar los eventos por sus similares mecanismos de origen.

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

Recibido: 30/10/2017

Aceptado: 24/04/2018

En esta comunicación corta se analizan críticamente los enfoques que se emplean en las investigaciones sobre las TLS, y se exponen con mayor detalle las tres condiciones necesarias para las manifestaciones de severidad local.

Todos los eventos meteorológicos locales considerados severos, son eventos discretos tanto espacial como temporalmente. Los intentos de explicar un evento discreto a partir de ciertos “valores umbrales” (o críticos), en los campos continuos de las variables independientes por separado tienen la gran limitante de no poderse encontrar tales valores al estar todos interrelacionados entre sí, por ejemplo, la humedad específica en el aire (q_v) está en función de la humedad relativa, de la presión y de la temperatura, por lo que cualquier variación en una de ellas por pequeña que sea, cambiará de inmediato el supuesto valor umbral. Sin embargo, desde el punto de vista conceptual, se puede plantear que “el conjunto de procesos que intervienen en la generación, desarrollo y disipación de un evento local severo, se pueden agrupar sólo en tres condiciones necesarias y una condición suficiente” (Carnesoltas *et al.*, 2013; Rojas y Carnesoltas, 2013). Con este enfoque, este autor ha venido planteando que “cada uno de los eventos podrá desarrollarse si, y sólo si, el conjunto de variables continuas que intervienen en cada condición necesaria, se encuentra de manera simultánea dentro de determinados rangos de valores”. De esta forma, concentrándose en la solución de la cadena causa-efecto de los procesos, puede permitirse que las variables independientes varíen libremente dentro de un determinado rango, tal como sucede en la atmósfera real.

El conjunto de procesos de cada condición necesaria se pueden expresar brevemente en la forma siguiente: la primera condición es el conjunto de procesos que garantizan el contenido de humedad necesario en la Capa Fronteriza Atmosférica (CFA) para formar una nube de tormenta; en la segunda se encuentran los encargados de crear las corrientes ascendentes en toda la tropósfera, incluyendo los diferentes cambios de fase del agua y las interacciones de energía con el entorno; mientras que, en la tercera condición se incluyen todos los procesos que

liberan en breve plazo la energía acumulada en los niveles medios dentro de la tormenta, que se manifestará en la superficie terrestre como un evento local severo. La condición suficiente es la simultaneidad espacio-temporal de las tres condiciones necesarias anteriores.

Los conocimientos actuales sobre los procesos que aquí se mencionan abarcan fundamentalmente los que corresponden a las condiciones primera y segunda, pero a pesar de todos los esfuerzos, hipótesis, experimentos teóricos y de laboratorios llevados a cabo para resolver y modelar los procesos de la tercera condición necesaria, aún no se ha logrado encontrar soluciones generales que permitan discriminar con total claridad la ocurrencia anticipada o no, de uno u otro tipo de evento, aunque se conozcan las condiciones generales favorables. Esta es la razón por la que todavía no se ha podido aplicar en los pronósticos operativos diarios. En dichos esfuerzos se han empleado numerosos métodos basados tanto en razonamientos inductivos como deductivos. La inducción científica (Rosental y Iudin, 1973), “representa una conclusión aplicable a toda una clase dada, inferida a partir sólo de una parte de los elementos de la clase. En este caso, el fundamento de la conclusión es el descubrimiento de conexiones esenciales entre los elementos de la clase, de manera que ellas van a condicionar necesariamente el rasgo dado a toda la clase”. Según Stull (2015), “el razonamiento inductivo se caracteriza por partir de ejemplos específicos hacia una teoría general (aunque esta puede ser probable pero no cierta). Es análogo a la extrapolación”. Entre los ejemplos de este razonamiento pueden mencionarse los métodos estadísticos que parten de la comparación entre los días con y sin reportes de eventos con determinados valores de las variables independientes. En otros casos, “empleo de relaciones empíricas entre las variables sin un fundamento físico que las sustente” y “confusiones en ciertos casos al no distinguir la diferencia entre índices, variables diagnóstico y variables pronóstico” (Doswell III y Schultz, 2006).

LAS BASES DE DATOS CON REPORTES DE EVENTOS LOCALES SEVEROS

En la aplicación de métodos basados en el razonamiento inductivo, los SMN de mayor desarrollo tienen organizadas bases de datos (BD) con reportes de los eventos locales severos, que se emplean fundamentalmente en las validaciones estadísticas de las hipótesis que elaboran los investigadores y especialistas. Las fuentes de estas BD son las propias observaciones y mediciones realizadas en sus redes de estaciones meteorológicas, y lo obtenido por los medios de detección remota disponibles, sin embargo, dadas las grandes distancias existentes entre los puntos de medición comparadas con las pequeñas dimensiones de estos eventos, también se incluyen los reportes de aficionados y de la población en general, a pesar de que no son tan detallados como de las fuentes profesionales. Estas BD tienen tres limitantes: la primera es que el evento puede ocurrir en zonas despobladas y nadie se percate de ello, o que, ocurriendo donde se encuentre una persona no lo informe; la segunda es que nada más se dispone de las magnitudes de las variables en los lugares donde están instalados los instrumentos; y la tercera es que sólo incluye el reporte de la ocurrencia del evento a nivel de la superficie donde vive el hombre (como es lógico), pero nunca podrá reflejar la existencia o no de las buscadas condiciones en los niveles medios que los provocan. Por suerte, sus ventajas y desventajas son conocidas por todos los especialistas y siempre las tienen en cuenta. El siguiente análisis es un ejemplo de la tercera limitación.

Si se considera que la “condición suficiente” para que ocurra alguno de los eventos discretos

severos es la coincidencia espacial y temporal de las tres condiciones necesarias, se puede construir un esquema simple de 0 (no se cumple la condición) y 1 (se cumple la condición), y analizarlos con respecto a los reportes que se reciben de los eventos reales ocurridos incluidos en la BD. Las combinaciones posibles entre el conjunto de procesos independientes con las tres condiciones necesarias y la ocurrencia del evento, se muestra en el esquema de la [figura 1](#), en el cual la suma total de 0 y 1 para cada condición representa el total de los días del año.

Se puede apreciar que, desde el punto de vista elemental de las probabilidades, el 50% de los días del año no se debe cumplir la segunda condición necesaria, pero pudiera estar presente la tercera condición en los niveles medios. Con similar enfoque, podrán estar presentes las nubes de tormentas en los restantes 50% de los días del año, pero no existir los procesos favorables de la tercera condición. En el primer caso es imposible que ocurra el evento sin una nube de tormenta, y en el segundo caso, a pesar de existir la nube de tormenta, tampoco podrá haber ninguna manifestación de severidad local ya que las condiciones en los niveles medios se encargarán de disipar la energía acumulada de manera gradual.

En el trópico insular las causas de la presencia de nubes de tormentas en el periodo poco lluvioso del año se debe a la llegada de los sistemas en movimiento a mayor escala ([Aguilar et al., 2009](#)), señalados en el esquema con la cifra (1). En este caso, un sistema que transporta una tormenta podrá también trasladar el contenido de humedad en los niveles bajos de manera que la nube no se disipa, sin importar que inicialmente en el lugar no se cumplía la primera condición necesaria. Durante el periodo, lluvioso la presencia de estas nubes tienen principalmente un

Condiciones Necesarias	Sistemas del flujo del W, más frecuentes en el p. lluvioso		Bajas frías superiores, más frecuentes en el p. lluvioso	
PRIMERA	0 (1)		1	
SEGUNDA	0	1	0	1
TERCERA	0	1	0	1
Reporte del Evento	0	0	0	1

Figura 1. Esquema que muestra las combinaciones posibles entre el conjunto de procesos independientes con las tres condiciones necesarias y la ocurrencia del evento.

origen convectivo a β -meso escala ([Carnesoltas y Aguilar, 2011](#)).

Este análisis teórico de las combinaciones posibles puede servir como “nivel de referencia”, tanto para evaluar la cantidad y calidad de los reportes que se reciban, como para fundamentar la necesidad de concentrar los esfuerzos en encontrar las soluciones para la tercera condición necesaria; ya que a pesar que pudiera estar presente dicha condición en el 50% de los días del año, la BD de los reportes de los eventos en superficie, sólo reflejará su presencia como máximo en el 25% de los días del año. Esto es un aspecto fundamental que se debe conocer de antemano cuando se pretenda resolver el problema aplicando cualquier razonamiento inductivo mediante métodos estadísticos.

Bajo esta problemática, de inmediato surge una interrogante ¿cómo verificar el cumplimiento o no de la tercera condición necesaria en los niveles medios en los otros 25% de los días restantes del año? Aunque se pueden proponer muchas soluciones posibles, de inmediato se puede comenzar por tres:

a) Verificar las correlaciones estadísticas que se obtengan con la mayor cantidad posible de días con y sin reportes, con la presencia de nubes de tormentas en el área mediante imágenes obtenidas desde satélites y observaciones por radar;

Para ello, además del trabajo tedioso que conlleva su ejecución cuando se dispone de cientos de reportes, hay que tener en cuenta que la presencia de una nube de tormenta en el área, no asegura que se cumpla la tercera condición en los niveles medios, ya que puede tratarse de una tormenta eléctrica simple sin ninguna manifestación de severidad.

b) Comparar los resultados obtenidos estadísticamente con corridas de un modelo numérico de alta resolución;

Aunque esta solución no es tan tediosa como la anterior por la posibilidad de realizarla digitalmente, la dificultad que se presenta con ella es que, hasta el momento, ningún modelo numérico es capaz por sí solo, de pronosticar la ocurrencia certera de un evento discreto considerado severo. Sería necesario además crear un programa que verifique las condiciones en los

niveles medios, tanto los días con como sin reportes.

Como podrá apreciarse, estas dos soluciones corresponden a razonamientos inductivos. Por otra parte, el razonamiento deductivo ([Rosental y Iudin, 1973](#)), consiste en “demostrar una consecuencia partiendo de una o varias premisas, aplicando leyes de la lógica que poseen un carácter fidedigno”. “El método deductivo se emplea por lo general, cuando ya se han acumulado e interpretado teóricamente los hechos y datos de carácter empírico. Se intenta entonces sistematizar el material empírico”. [Stull \(2015\)](#), planteó que el razonamiento deductivo “se caracteriza porque parte de la aplicación de una regla general a una aplicación específica. Es análogo a la interpolación”.

Aunque en realidad inducción y deducción se hallan indisolublemente relacionados entre sí, con este último ahora la tercera posible solución podrá consistir en:

c) Encontrar e incluir términos en expresiones analíticas que representen los procesos físicos de manera tal, que discriminen la tercera condición necesaria de forma segura e independiente a los reportes;

Esta solución implica que necesariamente las expresiones matemáticas que representan el conjunto de los procesos físicos que permiten la ocurrencia de cada uno de los eventos severos, contengan en sus términos todas las variables independientes con sus correspondientes interacciones, que son en definitiva, las que tienen lugar realmente en la atmósfera. No parte de los reportes de la BD, sino que después de aplicarlo a todos los días de los años seleccionados, emplea los reportes al final para validar la hipótesis con las ocurrencias reales. No cabe dudas que es la solución más compleja y difícil de las tres, pero a diferencia de las dos anteriores, ella parte de leyes físicas ya probadas, con razonamientos y fundamentaciones mucho más sólidas.

A continuación se expone una explicación algo más detallada de cada una de las condiciones necesarias anteriormente mencionadas, y en la [figura 2](#) se muestra un esquema muy simplificado de la cadena de procesos causa - efecto, en una escala horizontal arbitraria y una vertical aproximada.

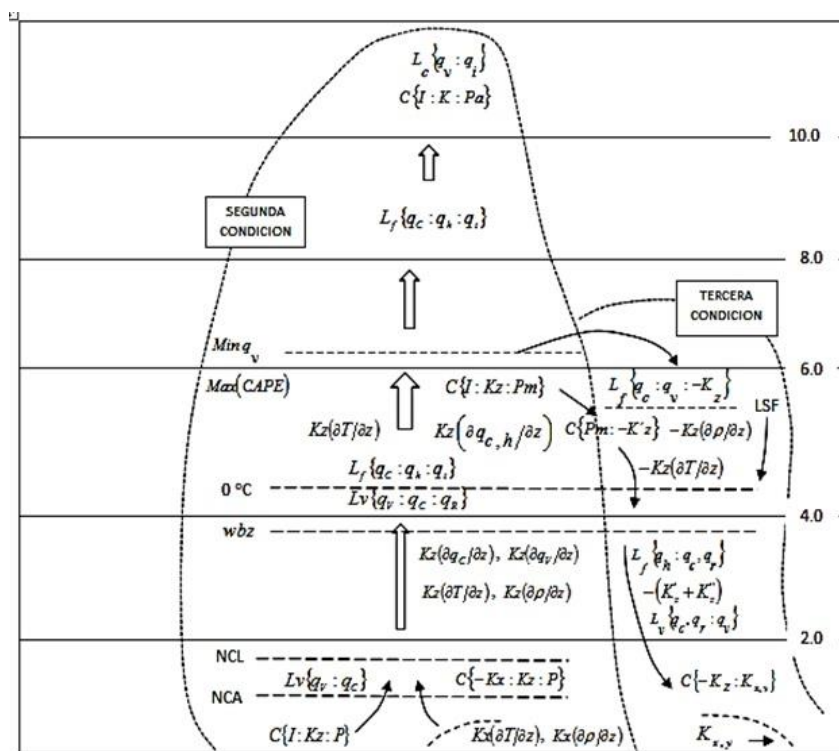


Figura 2. Esquema de los procesos de las condiciones necesarias segunda y tercera.

LAS CONDICIONES NECESARIAS

La **primera** condición necesaria es que “el conjunto de procesos que tiene lugar en la CFA, logre alcanzar un contenido de humedad y una distribución espacial dentro de un determinado rango de valores, tales que ambos, resulten suficientes para formar una nube de gran tamaño y mantener la capa lo más inestable posible”. Alcanzar mediante un conjunto de procesos un contenido de humedad dentro de un determinado rango de valores, significa que la humedad específica requerida (q_v^*), no puede tener cualquier valor, sino deberá encontrarse en un rango de valores dados

$$0 \leq q_v \leq q_v^* \leq q_{vs}$$

donde el asterisco representa el rango de los valores requeridos y el subíndice “vs” es su valor saturado a una presión y temperatura dada. Con “una distribución espacial” significa que se cumpla

$$0 \leq \nabla^2 q_v \leq \nabla^2 q_v^* \leq \max(\nabla^2 q_{vs})$$

de manera que, tanto el contenido como su distribución resulten suficientes para formar una nube de gran tamaño. Esto implica que durante el proceso el Laplaciano del contenido de la humedad necesaria debe mantenerse diferente de cero:

$$\nabla^2 q_v^* \neq 0$$

Esto garantiza la generación de las celdas convectivas desde la Capa Superficial de la atmósfera por la desigual distribución no lineal de los núcleos húmedos. Esta primera condición es la indispensable para el inicio de la convección y el posible desarrollo de una nube de tormenta. “Mantener la capa lo más inestable posible” se logra con la advección horizontal de humedad específica de los alrededores ($V \cdot \nabla q_v$) y la permanente evaporación con un balance positivo de conversión de agua líquida en vapor $Lv\{q_{liq}; q_v\}$, con la consecuente absorción de calor del aire y de la superficie terrestre.

La **segunda** condición necesaria la constituye otro “grupo de procesos en la CFA que transforman la energía interna en energía cinética convectiva, y ésta a su vez a energía potencial, formando estructuras coherentes, y superficies de discontinuidad térmicas y dinámicas; sus interacciones darán inicio a la convección, y posteriormente crearán nubes de gran desarrollo vertical en el resto de la tropósfera”. La fuente principal e inicial de energía interna (I) de esta condición es la radiación terrestre de onda larga, la cual de manera selectiva, calienta la Capa Superficial donde se transforma en energía cinética convectiva y potencial $C\{I: Kz': P\}$. La

corriente ascendente así creada vencerá la gravedad y las fuerzas viscosas, produciendo dichas estructuras coherentes y superficies de discontinuidad. Por su parte, las superficies de discontinuidad que se desarrollen en la CFA, en su movimiento horizontal con respecto a las corrientes ascendentes ya creadas, transforman parte de su energía cinética horizontal en energía cinética vertical y potencial $C\{K_x, y: K_z : P\}$. Las comillas dobles son para diferenciar el aporte de la pendiente de la superficie de discontinuidad a la velocidad vertical, de la producida por los mecanismos de la convección K_z . Aunque la convección y las superficies de discontinuidad crean corrientes ascendentes, ninguna por sí sola es capaz de lograr una corriente que alcance los niveles medios. Según [Stull \(2015\)](#), “cualquier proceso externo que obligue a las parcelas de aire de la CFA a ascender a través de la capa estáticamente estable, puede ser considerado un mecanismo para la convección profunda”. En este caso, ambos procesos deberán actuar de manera simultánea.

Las corrientes ascendentes transportan además el contenido de humedad concentrada por la primera condición $(K_z + K_z'')(\partial q_v / \partial z)$, la cual a partir del Nivel de Condensación por Ascenso (NCA) cambia de fase $L_v\{q_v : q_c\}$, liberando gradualmente calor latente y formando gotas de nube (q_c). Luego, la energía necesaria hasta el NCA será, por una parte la propia energía interna de las porciones del fluido que ascienden adiabáticamente por la convección, y por otra la energía mecánica aportada por las superficies de discontinuidad. La continuidad del ascenso lleva a las parcelas de aire a los niveles por encima del Nivel de Convección Libre (NCL), acelerándose cada vez más por la Energía Potencial Disponible para la Convección que se genera (CAPE por sus siglas en inglés). Aquí la corriente ascendente transporta gotas de nube (q_c), vapor de agua (q_v), calor y masa de aire, esto es $K_z(\partial q_v / \partial z)$, $K_z(\partial q_c / \partial z)$, $K_z(\partial T / \partial z)$ y $K_z(\partial \rho / \partial z)$. A estos niveles la tasa de enfriamiento será menor, ya que la continuación del proceso libera calor latente de condensación $L_f\{q_v : q_c : q_r\}$, a su vez que hacen crecer las gotas de nube (q_c) y aparecen pequeñas gotas de lluvia (q_r) que permanecen

suspendidas por la propia corriente ascendente, e incluso pueden cambiar de altura una y otra vez.

A partir del nivel de congelación (que en realidad, debido a la disminución de la presión, se encontrará por encima de la isoterma 0 °C), comenzará el proceso de conversión gradual de agua líquida en sólida, primero como granizos (q_h) por engelamiento de las gotas de nube y de lluvia, y a alturas mayores a hielo (q_i), esto es $L_f\{q_c, q_r : q_h, q_i\}$, liberándose aún más calor latente. Durante este proceso, las parcelas de fluido permanecerán a temperatura constante (0 °C o menor), en una capa estrecha de unos 20 - 30 hPa de espesor. El proceso de ascenso es adiabático saturado, o sea, es irreversible. A estas alturas de los niveles medios la corriente convectiva ascendente alcanza su intensidad máxima, puesto que la CAPE por lo general aquí es máxima, por lo tanto se mantiene el transporte de calor y agua total $K_z(\partial T / \partial z)$, $K_z(\partial q_T / \partial z)$, así como la conversión de energía interna en cinética y potencial $C\{I : K_z : P\}$. Esta segunda condición necesaria determina el lugar de origen y el momento de formación de la nube de tormenta. Aunque dentro de la nube el ascenso continuará hasta los niveles altos de la tropósfera, aquí no se explicarán los procesos que allí ocurren, sino que se pasará al análisis de los que ocurren en los niveles medios que provocan que la nube pase de la etapa de “madurez” a la etapa de “disipación” con el inicio de las corrientes descendentes, precisamente lo que va a corresponder a la tercera condición necesaria.

La **tercera** condición necesaria consiste en que el “conjunto de procesos que ocurren en los niveles medios, sean capaces de generar fuertes corrientes descendentes, o permitir que los granizos lleguen a la superficie, o que las grandes gotas de lluvia junto a las gotas de nube, alcancen la superficie terrestre como lluvia localmente intensa de corta duración”. Esto quiere decir que estos tres eventos locales severos se deben, en principio, a una determinada combinación de las variables independientes en los niveles medios que provocan que, el conjunto de procesos se desarrollen de una manera diferente para cada uno de los eventos. El análisis de gran cantidad de casos ocurridos muestra que se pueden presentar fuertes ráfagas descendentes acompañadas de caída de granizos desde una misma tormenta, o caída de granizos con precipitación ligera a moderada, o lluvia localmente intensa de corta duración sin granizos,

con el viento prácticamente en calma, y muy débil cizalladura vertical.

En ocasiones, entre los niveles de 450 - 550 hPa, aparece una extensa capa seca (a β -macro y α -meso escalas), donde el contenido de humedad del entorno alcanza valores menores a 5% de humedad relativa. Parte del agua total que asciende por el interior de la nube, experimentará entonces un proceso de evaporación $L_f \{q_c : q_h : q_v\}$, que tomando la energía necesaria del aire del entorno, se enfría y aumenta con ello su peso específico con respecto a sus alrededores. Este proceso de enfriamiento evaporativo es capaz de generar corrientes descendentes a un lado del eje de la corriente ascendente $L_f \{q_c, q_h : q_v : -K_z\}$, y “favorecer los eventos locales severos” (Aguilar *et al.*, 2007).

El nivel a partir del cual comienza la corriente descendente que tiene por origen el enfriamiento evaporativo, se conoce como “nivel de descenso libre” (LSF por sus siglas en inglés). En el esquema de la [figura 2](#), se representa como una línea horizontal y como la advección de masa (ρ) y de temperatura (T), dirigida hacia la superficie terrestre $-Kz(\partial\rho/\partial z)$ y $-Kz(\partial T/\partial z)$. La intensidad de esta corriente descendente estará condicionada por las diferencias de temperatura y contenido de humedad que exista entre el interior de la nube y su entorno a esos niveles. En el trabajo operativo la magnitud de la corriente descendente se determina por la Energía Potencial Disponible para el Descenso (conocida como DCAPE por sus siglas en inglés). Otro proceso que ocurre en los niveles medios que también genera corrientes descendentes es la ganancia de energía potencial tanto de la masa de aire que asciende, como del agua líquida y los granizos que la acompañan. Mientras sus centros de gravedad coincidan con el eje vertical de la corriente ascendente, flotarán o podrán seguir su ascenso, pero si por el flujo horizontal del entorno a estos niveles, parte de la masa de aire y de esta agua son desplazadas del eje vertical de la corriente ascendente, ocurrirá una conversión de energía potencial en cinética $C\{P_m : -K_z\}$. De esta forma, se crea una corriente descendente casi paralela a la ascendente, que contribuirá aún más a la caída libre por efecto de la gravedad del agua líquida y los granizos. En el caso de los granizos que permanecían en equilibrio con la tensión del vapor de agua a temperaturas inferiores a 0 °C del bulbo húmedo, o sea, cuando se encontraban por encima de la isoterma de 0 °C del bulbo húmedo

(wbz), ahora en su descenso al atravesar este nivel, comenzará un gradual cambio de fase con la energía del entorno $L_f \{q_h : q_c : q_r\}$, hacia gotas de nube y de lluvia. Simultáneamente, el agua líquida sufrirá durante la caída otro cambio de fase hacia vapor de agua $L_v \{q_c, q_r : q_v\}$. Entre más cerca de la superficie se encuentre wbz , mayor probabilidad existirá que los granizos alcancen la superficie de la tierra sin haberse derretido aún totalmente. De igual forma, entre mayor cantidad de gotas de agua líquida con mayores diámetros contenga la corriente descendente, mayor cantidad de lluvia llegará a la superficie aún sin evaporarse. En el caso especial de la lluvia localmente intensa de corta duración (con muy baja frecuencia de ocurrencia con respecto a los otros eventos severos), el proceso de formación de la corriente descendente parece ser algo diferente. En vez de organizar la corriente descendente a un lado de la ascendente, deberá ocurrir sobre la misma ascendente, ya sea por el debilitamiento de la que asciende, o por un incremento excesivo de la masa de agua, de los granizos y del hielo dentro de la nube, o ambas causas a la vez. Si ocurren los procesos de enfriamiento evaporativo con diferentes intensidades, y simultáneamente actúa el simple efecto de la gravedad por debajo de wbz , actuarán ambas velocidades descendentes provocando una advección mayor de gotas de lluvia (q_r), o de granizos (q_h), o de masa de aire frío (ρ), aunque nunca las tres desde la misma nube como ya se explicó anteriormente. En el esquema de la [figura 2](#) se representa por $-(Kz'+Kz)$.

La velocidad del aire frío de la corriente descendente podrá tener diferentes magnitudes, pero si se mantiene o aumenta durante el descenso y alcanza la superficie terrestre, se dice que ha ocurrido una “ráfaga descendente” (aeroavalancha en el SMN de Cuba, según Alfonso, 1994). Esta masa de aire frío en su expansión horizontal sobre la superficie terrestre, genera en sus bordes una superficie de discontinuidad térmica que puede desplazarse a 25 m/s ó más de velocidad, considerado entonces como un evento severo. En el esquema de la [figura 2](#) se representa como $C\{-K_z : K_{x,y}\}$ y $K_{x,y}$.

Como puede apreciarse, la tercera condición necesaria es la que determina el comienzo de la “etapa de disipación de la celda convectiva” (de acuerdo a las etapas planteadas por Byers y Braham en 1949, o de la etapa de disipación de la “madurez severa”, como la denominó Browning

en 1965). También determina la intensidad de los eventos severos, los lugares y los momentos de su ocurrencia. Esta condición refleja además, la tendencia del sistema “convección - entorno” para lograr restablecer la uniformidad y el equilibrio perdido de los campos de densidad, energía y contenido de agua total en los niveles medios, o sea, eliminar los efectos provocados por las condiciones necesarias primera y segunda.

Por lo expuesto, se recomienda que en las investigaciones sobre las causas de las Tormentas Locales Severas, se utilice el enfoque por conjuntos de procesos agrupados solamente en tres condiciones necesarias y una suficiente, por resultar más ventajoso que los intentos por encontrar valores umbrales en las variables independientes. También, que se empleen métodos basados tanto en razonamientos inductivos como deductivos, partiendo de los reportes, pero luego aplicar principios y leyes físicas ya probadas que brindan resultados más confiables y seguros, a pesar de ser más complejos y difíciles. Finalmente validar los resultados con los reportes.

El autor desea reconocer los útiles consejos y sugerencias brindadas por el Dr. Daniel Martínez, la MSc. Alis Varela, la Lic. Rocío García y el Lic. Israel Borrajero, todos del Instituto de Meteorología.

REFERENCIAS

- Aguilar, G., L. Naranjo y M. Carnesoltas, 2007: La intrusión seca en niveles medios y las aeroavalanchas en Cuba. IV Congreso Cubano de Meteorología.
- Aguilar, G., L. Naranjo y M. Carnesoltas, 2009: Condiciones a escala sinóptica favorables para la aparición de Tormentas Locales Severas en Cuba. Parte I: Período poco lluvioso. *Rev. Cubana de Meteor.*, 15, 1, 85-108.
- Alfonso, A., 1994: Climatología de las tormentas locales severas. Ed. Academia. La Habana, 85 pp.
- Browning, K. A., 1965: The evolution of tornadic storm. *J. Atm. Sci.*, 22(6): 664 - 668.
- Byers, H. R., y R. R. Braham, Jr. 1949: Thunderstorm structure and Circulation. *J. Meteorol.*, 71 - 86.
- Carnesoltas, M., y G. Aguilar, 2011: Condiciones sinópticas favorables para la aparición de tormentas locales severas en Cuba. Período lluvioso. *Rev. Cubana de Meteor.*, 17, 1, 13 - 31.
- 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. INSMET, 65 pp.
- Doswell III, C. y D. Schultz, 2006: On the Use of Indices and Parameters in Forecasting Severe Storms. *Electronic J. Severe Storms Meteor.*, 1(3), 1-22.
- Rojas, Y. y M. Carnesoltas, 2013: Configuraciones típicas que adoptan los campos de viento y temperatura a meso escala en la región oriental bajo la influencia de los patrones a escala sinóptica favorables para las tormentas locales severas. Informe de Resultado. INSMET, 116 pp.
- Roland Stull, R., 2015: Practical Meteorology: An Algebra-based Survey of Atmospheric Science. Dept. of Earth, Ocean & Atmospheric Sciences, University of British Columbia, 939 pp.
- Rosental, M. y P. Iudin, 1973: Diccionario Filosófico. Ed. Universo, Argentina. 498 pp.
- Varela, A., 2017: Formación de tornados no asociados a superceldas en la región occidental de Cuba. Tesis de Maestría en Ciencias Meteorológicas. Universidad de La Habana. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. Instituto de Meteorología de Cuba. 95 pp.

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/)