

Análisis de días con tormentas eléctricas, mediante índices termodinámicos e índice derivado



<https://cu-id.com/2377/v29n1e06>

Analysis of days with thunderstorms, using thermodynamic indices and derived index

✉ Yesenia Arias Mulet^{1*}, ✉ Pedro Manuel González Jardines², ✉ Lourdes Álvarez Escudero²

¹Aeropuerto Internacional José Martí, Boyeros Ave, Havana, Cuba., Ave. Panamericana y Final, Edificio ATC. Boyeros, La Habana, Cuba.

²Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología de Cuba, Carretera del Asilo S/N. Casa Blanca, Regla, La Habana, Cuba

RESUMEN: En la investigación se hace un análisis de los índices termodinámicos tradicionales, en diferentes situaciones sinópticas propias de los periodos poco lluvioso y lluvioso en Cuba en los años 2008 y 2019, en las que ocurrieron Tormentas Eléctricas. El objetivo fundamental es determinar cuál o cuáles de esos índices, se ajusta mejor a diferentes configuraciones sinópticas, así como determinar un índice derivado que mejore la predicción de las tormentas eléctricas en la región occidental de Cuba. Se utilizaron datos del Global Forecast System (GFS) para alimentar el modelo mesoescalar Weather Research Forecast /Advanced Research (WRF-ARW), con una resolución espacial de 4 kilómetros, que abarca la región occidental de Cuba; la cronología de los frentes fríos y la de las tormentas eléctricas para la selección de los casos de estudios. Las correlaciones determinaron que los índices K, TT y GDI, fueron los que mostraron las mayores correlaciones siendo superiores a los 0.5. Con estos resultados se determinó el índice derivado, con el que se obtuvo una detección de los procesos convectivos en el área de estudio del 73 y 75 % para el periodo poco lluvioso y el lluvioso respectivamente.

Palabras claves: tormentas eléctricas, índices termodinámicos.

ABSTRACT: In the research, an analysis of the traditional thermodynamic indices is made, in different synoptic situations typical of the dry and rainy periods in Cuba in the years 2008 and 2019, in which Electrical Storms occurred. The fundamental objective is to determine which one or which of these indices best adjusts to different synoptic configurations, as well as to determine a derived index that improves the prediction of electrical storms in the western region of Cuba. Data from the Global Forecast System (GFS) were used to feed the Weather Research Forecast / Advanced Research (WRF-ARW) mesoscale model, with a spatial resolution of 4 kilometers, covering the western region of Cuba; the chronology of cold fronts and that of electrical storms for the selection of case studies. The correlations determined that the K, TT and GDI indices were the ones that showed the highest correlations, being greater than 0.5. With these results, the derived index was determined, with which a detection of convective processes in the study area of 73 and 75 % was obtained for the dry and rainy periods, respectively.

Keys Words: thunderstorm, thermodynamic indices.

INTRODUCCIÓN

Las tormentas eléctricas (TE), juegan un rol importante en la energética de nuestro planeta, sobre todo en la zona tropical donde con mayor frecuencia se producen. Son las causantes de una parte considerable de los vientos y las lluvias fuertes que se registran en Cuba, especialmente en localidades del interior durante el periodo lluvioso del año, que se extiende desde mayo a octubre y hacia zonas de la costa norte, en el periodo poco lluvioso que se extiende desde noviembre- abril.

El pronóstico de la actividad eléctrica es muy importante y tiene una incidencia económica-social ne-

gativa, principalmente por la afectación que provoca en la generación y distribución de la electricidad y en las redes telefónicas, además las muertes por descargas eléctricas constituyen la principal causa de fallecimiento por fenómenos meteorológicos en Cuba, [Figueredo et al \(2019\)](#).

Varios autores han dirigido sus estudios a determinar la probabilidad de ocurrencia de TE (PTE), dentro de los cuales destacan los estudios realizados por [Neumann \(1971\)](#), [Stern et. al. \(2002\)](#) y [Cárdenas et al. \(2004\)](#); que incluyen herramientas con variedad de procedimientos estadísticos, como probabilidades condicionadas, probabilidades del periodo de exposición y

*Autor para correspondencia: Yesenia Arias Mulet. E-mail: yesi19890324@gmail.com

Recibido: 15/05/2021

Aceptado: 23/12/2022

sistemas de ecuaciones de predicción múltiple basado en ecuaciones lineales y no lineales. En el caso de Cuba, existen un gran número de trabajos que mediante el uso de los reportes de las estaciones meteorológicas han determinado distribución y hora de ocurrencia por solo citar dos ejemplos, dentro de los autores se pueden mencionar Alfonso (1985), Fernández (1979), Gancedo (1981), Lecha et al 1994, Escudero et al 2006, 2016 y Álvarez et al, (2012) determinando en sus investigaciones que para Cuba las horas de formación más probables son las comprendidas desde las 13:00 a las 20:00 horas local, y es muy raro escuchar truenos durante la madrugada y primeras horas de la mañana, excepto en las costas donde la actividad marítima es perceptible en ocasiones.

En el periodo poco lluvioso, la actividad eléctrica tiene una relación directa con la influencia de los frentes fríos y las Líneas de Tormentas Eléctricas Prefrontales, estos sistemas afectan con su máxima intensidad a las provincias occidentales de Cuba y su gran importancia es que producen más del 50% de la lluvia que precipita en este periodo. Pero a su vez la actividad depende del grado de inestabilidad que presente la atmósfera en el momento del fenómeno.

La comprensión de los procesos en la atmósfera durante la ocurrencia de las TE han llevado a los meteorólogos a desarrollar un grupo de parámetros e índices que reflejan, con una buena aproximación, las condiciones favorables o no para su desarrollo. Estos parámetros según Tajbakhsh (2012), describen, por un lado, la inestabilidad existente en la atmósfera, mientras que por otro indican la probabilidad de que la convección sea suficiente para el desarrollo de una TE. Entre ellos, se mencionan los índices termodinámicos como el

Índice de Levantamiento (LI), ecuación 1

$$LI = T_{500} - T_{P500} \quad (1)$$

Donde T_{500} es la temperatura ambiente (°C) en el nivel de los 500 hPa, T_{P500} es la temperatura (°C) en el nivel de 500 hPa que una burbuja de aire alcanzaría, en un diagrama adiabático, si es elevada por la adiabatada no saturada (o adiabatada seca) desde la superficie hasta el nivel de condensación (por levantamiento) y desde su ascenso hasta los 500 hPa por la adiabatada saturada, (o adiabatada húmeda) (Knutsvig, 1996).

Índice Showalter (SI), ecuación 2

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

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 adiabatada no saturada desde 850 hPa hasta el nivel de condensación y después continúa elevándose por la adiabatada saturada hasta los 500 hPa.

Índice Total de totales (TT), ecuación 3

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

Donde, T_{d850} es la temperatura del punto de rocío (°C) en los 850 hPa, T_{850} es la temperatura (°C) en el nivel de 850 hPa y T_{500} es la temperatura (°C) en los 500 hPa.

Índice K (K), ecuación 4

$$K = T_{850} - T_{500} + T_{500} + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700}) \quad (4)$$

Donde T_{850} es la temperatura (°C) en los 850 hPa, T_{500} es la temperatura (°C) en los 500 hPa, T_{d850} es el punto de rocío en los 850 hPa, T_{700} es la temperatura (°C) en los 700 hPa y T_{d700} es la temperatura del punto de rocío (°C) en el nivel de 700 hPa.

Un parámetro esencial para medir las condiciones de inestabilidad lo constituye la

Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE), ecuación 5.

$$CAPE = R \int_{pLFC}^{pEL} \frac{T(p) - T_a(p)}{p} dp \text{ (J/kg)} \quad (5)$$

Donde R, es la constante universal de los gases, pLFC es la presión en el nivel de condensación por levantamiento, pEL es la presión en el nivel de equilibrio, T es la temperatura de la burbuja de aire que se eleva, T_a es la temperatura ambiente y p es la presión en el nivel que se está evaluando, (Bluestein, 1993).

Índice de Gálvez-Davison (GDI)

Por otra parte, el GDI es un índice de estabilidad generado para mejorar el pronóstico de convección en el Caribe. Se ha validado para zonas extra tropicales y en el sudeste de Sudamérica. La creación del GDI surge con la motivación de encontrar un índice de estabilidad para el pronóstico de convección en regiones tropicales, ya que los índices tradicionales funcionan mejor en zonas extra tropicales debido ya que para ello han sido diseñados.

El GDI usa 4 niveles de la atmósfera desde los ~500m hasta ~5km para estimar un índice de contenido de calor y humedad en esta capa, un índice de estabilidad en la tropósfera media (~5km), y un índice que refleja los efectos de la intensidad/altitud de la inversión de los Alisios en el desarrollo de nubes convectivas con lluvias.

El GDI considera tres procesos físicos que modulan la convección tropical: (1) la disponibilidad simultánea de calor y humedad en media y baja la tropósfera, (2) Los efectos estabilizantes / desestabilizadores de niveles medios y altos provocados por las dorsales y vagadas, y (3) el arrastre de aire seco y estabilización relacionada con inversiones Davison et al, (2016) .

Este índice esta dado por la siguiente ecuación 6:

$$GDIc = ECI + MWI + II \quad (6)$$

Donde:

ECI: Índice de estabilidad

MWI Índice calor en niveles medios de la atmosfera

II Índice de Inversión

Los primeros índices descritos tienen como limitante, que están desarrollados para grandes cambios de temperatura y humedad, características que en la zona tropical no se manifiestan con claridad, de ahí que en muchos casos no son útiles para las condiciones atmosféricas del archipiélago cubano con vista al pronóstico. Sin embargo, en la presente investigación, se analizan días con tormentas utilizando una mayor resolución con el fin de discriminar si esta es una limitante para el uso de estos índices y tiene como objetivo determinar un nuevo índice para el pronóstico de las tormentas eléctricas en Cuba.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de la región de estudio

Para la elaboración y desarrollo de la investigación se tomó como región de estudio el occidente de Cuba excluyendo el municipio especial Isla de la Juventud, por lo que la zona de estudio comprende las provincias Pinar del Río, Artemisa, La Habana, Mayabeque y Matanzas (Figura 1). La región limita al norte con el estrecho de la Florida y el golfo de México, al este con las provincias de Villa Clara y Cienfuegos, al sur con el mar Caribe y al oeste con el canal de Yucatán. La misma fue seleccionada por la influencia que tienen las líneas de tormentas eléctricas prefrontales, fundamentalmente en el periodo poco lluvioso del año, así como presentar máximos de actividad eléctrica durante el periodo lluvioso.

Análisis de los datos

El período de estudio comprende los años 2008 y 2019, de los cuales fueron seleccionados casos de estudios representativos del periodo poco lluvioso y lluvioso. Para identificar la cantidad de TE en las estaciones de la región de estudio se utilizaron los códigos relativos a tormentas que aparecen en la clave FM-12 (OMM, 1988), (17, 29, 91, 92, 95, 96, 97, 99) a la hora de la observación y que fueron utilizados por Álvarez (2006(b)) para realizar la distribución espacial de este fenómeno en Cuba.

Se identificaron en la cronología de frentes fríos, un total de 9 frentes fríos que influyeron en el occidente de Cuba en el año 2008 y 2019, estos sistemas fueron clasificados entre débiles y moderados, además se tuvo en cuenta que presentaran o no actividad prefrontal asociada. Por otra parte, correspondiente al periodo lluvioso, se analizaron 10 casos en los que estuvo presente la actividad convectiva, propia de esta época del año, relacionada con diferentes situaciones sinópticas.



Figura 1. Región de estudio (Región occidental de Cuba).

Para el análisis de las condiciones a mesoescala y cálculo de los índices termodinámicos se obtuvieron los valores de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, temperatura de punto de rocío, velocidad vertical, componente zonal y meridional del viento) a diferentes niveles en la troposfera correspondientes a una hora antes de la formación de las TE.

Entre los modelos dinámicos utilizados se encuentra el Sistema de Pronóstico Global (GFS) es un modelo de pronóstico del tiempo desarrollado por los Centros Nacionales para la Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés). El GFS es un modelo acoplado, compuesto por cuatro modelos (un modelo atmosférico, un modelo oceánico, un modelo de suelo / tierra y un modelo de hielo marino), que trabajan juntos para proporcionar una imagen precisa de las condiciones climáticas. Docenas de variables atmosféricas y de suelo tierra están disponibles a través de este conjunto de datos, desde temperaturas, vientos y precipitaciones hasta humedad del suelo.

Actualmente el modelo mesoescalar de referencia en Estados Unidos y el más utilizado en el mundo es el WRF. Este sistema de predicción numérica del tiempo y simulación atmosférica está diseñado para la investigación y las aplicaciones operacionales (Skamarock et al., 2008). Fue desarrollado por la división de Meteorología de Microescala y Mesoescala de la NCAR. Tiene dos núcleos dinámicos, el NNM y el ARW (Advanced Research WRF). Este último será el utilizado en esta investigación en su versión 3.9.

Diseño de los experimentos

Para el cálculo del índice GDI fueron utilizados los valores de temperatura y razón de mezcla obtenidos a partir de las salidas del modelo WRF-ARW.

Para las simulaciones fueron utilizadas dos mallas anidadas. El dominio externo fue construido con una resolución horizontal de 12 km e intervalos temporales de 3 horas, mientras que el dominio anidado fue diseñado con una resolución horizontal de 4 km e intervalo temporal de una hora. Sin embargo, para el desarrollo de la investigación fue utilizado el dominio de mayor resolución para poder realizar un estudio más detallado de los fenómenos mesoescalares seleccionados en los casos de estudio.

Para las condiciones iniciales y de frontera fueron empleados datos de pronóstico del modelo GFS, con resolución horizontal de 0.5 o el intervalo temporal de 6 horas, a partir del horario de las 00:00 UTC, con 54 horas de pronóstico extraídos de <https://nomads.ncdc.noaa.gov/data/gfs4>.

Configuración del WRF-ARW utilizada:

- Esquema de microfísica: WRF Single-Moment-5-class
- Parametrización de cúmulos: Grell-Freitas
- Esquema para la capa límite: Mellor-Yamada-Janj

Por otra parte, en la investigación se calculó el coeficiente de correlación de Pearson (r) entre los índices, así como entre los índices y la reflectividad (RF) a través de un código hecho en python, a partir de la siguiente ecuación 7:

$$r = \frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2 - (\sum x)^2/n)} \sqrt{n(\sum y^2 - (\sum y)^2/n)}} \quad (7)$$

Donde x corresponde a los valores de reflectividad, y a los valores de los índices y n es el tamaño de la muestra de datos.

Además, para la verificación del pronóstico se utilizaron los 4 índices de verificación que sugieren Jolliffe and Stephenson (2012) para analizar la calidad de los pronósticos determinísticos. Para calcular los índices de interés se requiere organizar la información pronosticada y observada mediante frecuencias absolutas agrupadas en forma de Tabla de contingencia como se muestra en la tabla 1.

En donde:

- a: es un evento observado y pronosticado, también conocido como “aciertos”.
- b: es un evento no observado pero pronosticado o un evento tipo “falsa alarma”.
- c: es un evento observado pero no pronosticado, es decir un evento “perdido”o error.
- d: es un evento no observado y no pronosticado o un evento “negativo correcto”.

Los estadígrafos utilizados para las tablas de contingencia con como la Probabilidad de Detección del Evento de Interés, la Falsa Alarma, el Sesgo, y el Índice Crítico de Éxito (POD, FAR, FBIAS y CSI, por sus siglas en inglés).

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Como se muestra en la tabla 2, las mayores correlaciones, presentaron valores en el entorno de los 0.6,

durante el PPLL, y estuvieron entre los índices GDI-KI, GDI-TT y TT-KI, siendo estos los índices que mejor reflejaron las situaciones sinópticas que componían la muestra objeto de estudio.

Por otra parte, en el PLL del año, las mayores correlaciones con valores ligeramente superiores a los 0.6, estuvieron entre los índices TT-LI y el CAPE-LI. Es bueno decir que estas relaciones al igual que sucede en el PPLL, se manifestaron con mayor claridad en las estaciones meteorológicas ubicadas hacia el interior de la región de estudio, alejado de las costas.

Ante estos resultados, es bueno hacer algunas consideraciones válidas para entender este tipo de análisis. En primer lugar, el coeficiente de correlación lineal es una medida resumen que no implica causalidad, ya que para establecer una relación causa-efecto es preciso contar con más elementos. Por consiguiente, si nos encontramos con un coeficiente de correlación alto, esto no significa necesariamente que exista una dependencia directa entre ambas variables, sino que ambas pueden ajustarse a través de una recta, si por el contrario se detecta un coeficiente bajo no significa que no exista relación entre ambas variables, de lo único que nos informa es que la relación que pudiera existir entre ellas no es lineal.

En general las correlaciones calculadas entre los diferentes índices para ambos períodos fueron bajas o negativas, con lo cual es posible afirmar que en sentido general no existe una relación lineal entre ellos y de existir tiende a ser inversa. Esto puede estar motivado por dos factores en particular, primero por el carácter empírico de dichos índices y en segundo lugar que, salvo el GDI, el resto fue validado para las condiciones que imperan en las latitudes medias. Esto último tiene un gran peso, puesto que las condiciones en las regiones tropicales difieren en muchos sentidos con las de latitudes medias, por solo citar un par de ejemplos, los movimientos verticales suelen ser más significativos en las latitudes medias al igual que los gradientes de temperatura y presión.

Los elementos anteriormente expresados no son absolutos. De acuerdo con el análisis de correlación hecho para el período PPLL tanto el TT como el índice K, mostraron una correlación positiva con el GDI, con valores que oscilaron en el entorno de 0.5. A su vez ambos, TT y K, exhibieron valores en la vecindad de 0.6. Estos resultados se pueden catalogar de positivos a pesar de que las correlaciones no hayan sido muy altas porque fueron precisamente estos tres índices los que mejor reflejaron el comportamiento de las tor-

Tabla 1. Tabla de Contingencia

		OBSERVADO		Total
		Si	No	
PRONOSTICADO	si	A	b	a+b
	no	C	d	c+d
		a+c	b+d	n=a+b+c+d

Tabla 2. Correlaciones entre índices termodinámicos estudiados

PPLL		PLL	
Índices	Correlación	Índices	Correlación
GDI-CAPE	0,0	GDI-CAPE	0,2
GDI-TT	0,5	GDI-TT	0,4
GDI-KI	0,5	GDI-KI	0,3
GDI-LI	0,2	GDI-LI	0,3
GDI-SI	-0,3	GDI-SI	-0,2
CAPE-TT	0,1	CAPE-TT	0,4
CAPE-KI	0,0	CAPE-KI	0
CAPE-LI	0,2	CAPE-LI	0,6
CAPE-SI	0,1	CAPE-SI	-0,2
TT-KI	0,6	TT-KI	0,2
TT-LI	0,4	TT-LI	0,6
TT-SI	-0,6	TT-SI	-0,6
KI-LI	0,1	KI-LI	-0,2
KI-SI	-0,3	KI-SI	0,3
LI-SI	-0,6	LI-SI	-0,6

mentas analizadas en la presente investigación. Este resultado demuestra que los campos que representan estos índices sufren perturbaciones significativas en las áreas donde se desarrolla la convección, constituyendo por tanto un buen indicador de la presencia de las tormentas eléctricas.

En el PLL, donde predominó la confluencia del flujo a mesoescala, se apreciaron resultados diferentes. Al igual que en el PPLL tres de estos índices mostraron buena correlación lineal, esta vez repitió el TT, pero junto al LI, al igual que el CAPE que se correlacionó bien con el propio LI. En este caso hay que hacer algunas observaciones para realizar correctamente el análisis de correlación. En este período del año los índices que mejor reflejaron, tanto cualitativa como cuantitativamente, la evolución de las tormentas asociadas a la confluencia del flujo a mesoescala fueron el GDI, el índice K y el TT, aunque en menor medida. El resto, aunque sufrió ciertas perturbaciones en sus campos no fue capaz de reflejar el desarrollo del fenómeno, mostrando variaciones poco significativas de sus campos. Dichas variaciones fueron realmente significativas en algunos puntos solamente, donde, podríamos inferir, que la tormenta asociada alcanzó mayores proporciones. Es por ello que el hecho de que el CAPE y el LI hayan tenido correlaciones buenas y positivas, en este caso, no resulta trascendental, ya que ninguno de los dos fue capaz de reflejar adecuadamente el fenómeno. Por otro lado, puede ser un indicador de que ambos identificaron áreas de máximas fluctuaciones análogas, que bien pueden coincidir con aquellas donde más fuertes hayan sido los movimientos verticales.

El caso de la correlación (0.6) entre el LI y el TT también tiene una explicación. El coeficiente de correlación en este caso lo que nos dice es que, en las áreas de tormenta, ambos índices perturban sus valores siguiendo una proporción directa. Sin embargo, los

incrementos de los valores en el TT, en las áreas de tormenta, son más significativos y se ajustan mejor a lo que sucede en la realidad. Mientras que los del LI son mucho más suavizados y sólo sirven para identificar máximos, o sea, zonas donde la tormenta puede ser más fuerte, pero insuficientes para identificar un sistema sinóptico o de mesoescala. En este punto resulta indispensable recordar que los valores obtenidos para el LI no reflejan condiciones de inestabilidad, ya que fueron positivos en todo momento, por tanto, carecen de sentido físico, al menos para la muestra analizada y precisan de un ajuste para su adecuada representación.

Correlaciones entre los diferentes índices termodinámicos y la predicción de reflectividad pronosticados.

La reflectividad predicha por el modelo numérico constituye un elemento con un alto grado de confiabilidad a la hora de hacer el pronóstico del tiempo y una herramienta necesaria en la predicción de tormentas convectivas. Numerosas investigaciones en todo el orbe han usado la reflectividad en el estudio de este tipo de fenómenos, de ahí que, si se logra establecer una relación entre los índices pronosticados y los valores de esta variable para la región objeto de estudio, esta constituye un factor discriminante a la hora de la utilización de dichos índices.

Como se puede apreciar en la [tabla 3](#), los índices que exhibieron mejores correlaciones fueron, nuevamente, el GDI y el KI, con valores que oscilaron en el entorno de 0.5 para ambos periodos analizados. No ocurrió lo mismo para el TT que exhibió valores de correlación lineal positivos, pero poco significativos. El resto de los índices, CAPE, SI y LI mostraron correlaciones negativas y cercanas a cero, lo cual nos deja claro que la correlación lineal de estos índices con la reflectividad pronosticada es prácticamente nula.

A pesar de que se reitera una vez más que el coeficiente de correlación lineal no es una medida que implique necesariamente relación causa-efecto va quedando demostrado que el GDI, seguido por el índice K son los más estables a la hora de efectuar el pronóstico de actividad convectiva sobre el área de estudio independientemente de la época del año, con destaque para el primero. El TT también ofrece resultados interesantes, aunque suele ser limitado a la hora de representar determinados regímenes de convección.

A modo de concluir con el análisis de correlación, se puede afirmar que, durante el PPLL del año, el análisis combinado de los campos de GDI, KI y TT resulta muy útil desde el punto de vista operativo. Estos índices permiten identificar posibles áreas de formación de tormentas, pues se correlacionan positivamente y todos reflejan adecuadamente la evolución espacial de las tormentas e identifican mediante la aparición de máximos, las áreas donde estas pueden ser más fuertes. Durante el PLL del año como se ha podido apreciar el GDI, el KI y el TT resultaron mucho más eficientes, aunque el TT presentó problemas al sugerir en la mayoría de los casos áreas sobreestimadas donde existía probabilidad baja de ocurrencia de tormentas. La relación (al menos lineal) entre los índices no suele ser buena y cuando esta existe, no es significativa.

Índice Derivado

Después de haber analizado el comportamiento de los índices termodinámicos tradicionales para un grupo de situaciones sinópticas, se eligieron los índices que mostraron los valores más significativos. Esto permitió determinar un índice derivado (**ID**) atendiendo a los resultados anteriores y el cual combinaría mediante una suma el índice K, GDI y el TT, dado por la siguiente fórmula:

$$ID = K + GDI + TT$$

Este procedimiento se realizó para ambos períodos, es decir para el poco lluvioso y el lluvioso, determi-

nándose también valores límites para ID que se muestran en la siguiente [tabla 4](#).

Análisis de casos con el ID para el período poco lluvioso

Los resultados para el 27 de febrero del 2008 a las 1800 UTC, muestran una línea orientada de NE-SW sobre las provincias de Pinar del Río, Artemisa y la Habana con valores entre 100-110, lo que estaba sugiriendo la posibilidad de convección moderada y núcleos aislados que estaban embebidos en la línea que superaban los 120, valorando la posibilidad de una fuerte convección en la porción norte de Artemisa y el cabo de San Antonio, [figura 2](#). Los valores como están relacionados con las salidas del modelo, muestran un retardo en la llegada de la línea, según se pudo observar en las imágenes del satélite a esta hora se encontraba sobre la provincia de Mayabeque la mayor actividad convectiva.

En este caso resalta una mayor influencia del GDI en la identificación del sistema. La coincidencia espacial entre los mayores valores de los índices implicados en cálculo de este índice derivado, hace que sea muy certera la identificación de las zonas donde es más probable que se desarrolle la convección profunda.

El 1ero de abril del 2008 a las 21:00 UTC, muestra valores entre 100 y 110 con máximos embebidos de 115 sugiriendo de una moderada a fuerte convección y orientados en forma de una línea sobre las provincias de Matanzas y Mayabeque. Es notorio decir que los valores fueron más consecuentes con la que en realidad ocurrió, haciendo más evidente la formación de la línea convectiva.

Como se puede observar, nuevamente predomina la configuración resultante del GDI, lo cual sugiere que este índice es el que más influye en la distribución espacial del fenómeno, aunque el ID resalta mejor las áreas donde se puede localizar la convección profunda.

Tabla 3. Correlaciones entre índices y valores de reflectividad pronosticados

PPLL		PLL	
Índices	Correlación	Índices	Correlación
GDI- dbz	0.56	GDI- dbz	0.54
CAPE-dbz	-0.06	CAPE-dbz	-0.27
KI-dbz	0.52	KI-dbz	0.54
LI-dbz	-0.27	LI-dbz	0
SI-dbz	-0.03	SI-dbz	0.23
TT-dbz	0.25	TT-dbz	0.28

Tabla 4. Valores para el índice derivado ID

ID	Clasificación
80-100	Débil convección-Aisladas tormentas
100-120	Moderada convección-Algunas tormentas
Mayor 120	Fuerte convección- Numerosas tormentas

En el mapa pronóstico del 1ero de diciembre del 2008 a las 12:00 UTC se observan valores entre 80-100, en forma de una línea que se extiende desde el estrecho de la Florida hacia el SW sobre la provincia de la Habana y Mayabeque, lo que se corresponde, según la clasificación utilizada, con una convección débil y máximos embebidos superiores a 120, lo que corresponde con fuerte convección, pero estas zonas avanzaron por el norte sobre el estrecho de la Florida. Estos resultados se aproximaron a lo que en realidad ocurrió y que se pudo corroborar con las imágenes visibles del satélite meteorológico. En realidad, se observa poca diferencia entre el pronóstico que hace el GDI por sí solo [figura 4b](#), al obtenido en el ID, [figura 4a](#), aunque cabe mencionar que en este último también incluye a K y al TT, que resultaron ser muy buenos predictores para este período, lo cual deriva en un análisis más integral.

En el caso del 28 de enero el ID, mostró la línea de inestabilidad sobre el sudeste del golfo de México, próxima al occidente de Cuba [figura 5](#), con zonas aisladas de inestabilidad sobre Pinar del Río y la costa norte de Artemisa, Mayabeque y la Habana, con valores de 110-115, sugiriendo la posibilidad de convección moderada, en estas pequeñas zonas.

En correspondencia también con lo observado para el caso del 26 de abril de 2019 el ID [figura 6](#), reflejo la formación de la línea de confluencia, mejor estructurada hacia el interior de Pinar del Río y Artemisa, así como hacia zonas de la costa norte de la Habana, los valores indicaban 95-100 correspondiéndose con una convección entre débil y moderada. Es bueno decir que en esta época del año es común observar una convección débil pero asociada a procesos muy eficientes a la precipitación, tal y como ocurrió en la realidad, e incluso se pudo comprobar que el tope de las nubes estaba entre 7 y 8 km.

Análisis de casos con el ID para el período lluvioso

El 8 de junio del 2008, los valores pronósticos del ID a las 18:00 UTC mostraban valores desorganizados entre 100-110, con aislados de 115 sugiriendo fuerte convección en el interior de Matanzas y Mayabeque, así como en el norte de Pinar del Río [figura 7](#).

En esta ocasión el ID maximiza las áreas con potencial para la ocurrencia de tormentas. El pronóstico hecho por el GDI, que ya fue descrito anteriormente, fue mucho más consecuente con lo que se observa en la imagen de satélite.

Para el 31 de agosto del 2008 [figura 8](#), los valores pronósticos a las 1200 UTC mostraban valores organizados de N-S, respondiendo a un flujo del sur con valores 80-95 y aislados 100 y 105, sugiriendo convección moderada en forma de bandas sobre las provincias de Mayabeque y Matanzas. Los resultados que se pudieron corroborar con las imágenes del satélite meteorológico de las 1245 UTC. En esta ocasión el

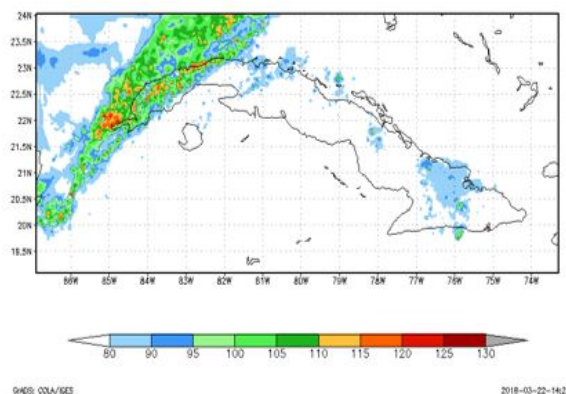


Figura 2. Pronóstico del índice derivado ID para el 27 de febrero del 2008, válido para las 18:00 UTC.

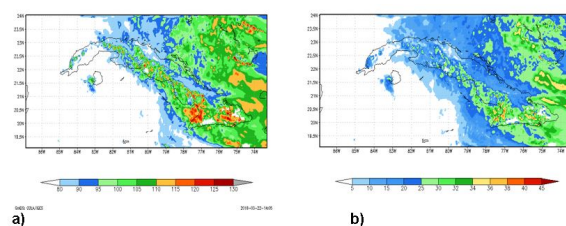


Figura 3. Pronóstico del índice derivado ID (a) y el GDI (b) para el 1ro de abril del 2008, válido para las 21:00 UTC.

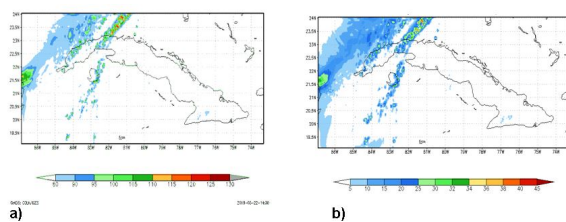


Figura 4. Pronóstico del índice derivado ID (a) y GDI (b) para el 1ro de diciembre del 2008, válido para las 12:00 UTC.

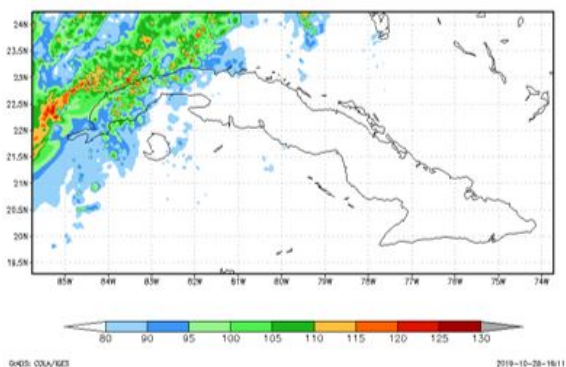


Figura 5. Pronóstico del índice derivado ID para el 28 de enero 2019, válido para las 00:00 UTC.

ID describe adecuadamente la situación, brindando un análisis completo y acertado de la situación imperante.

En el caso del 27 de octubre del 2008, los pronósticos a las 18:00 UTC [figura 9](#), mostraba valores en forma de una línea orientada de NE-SW sobre las provincias de Pinar del Río, Artemisa, Habana y Mayabeque, con valores entre 100-110 y aislados embebidos

de 120, sugiriendo la posibilidad de convección moderada a fuerte. Las condiciones fueron consecuentes con lo observado en las imágenes del satélite meteorológico. Como se ha podido apreciar a lo largo de esta investigación, los índices empleados en la confección del ID, representan muy bien sistemas sinópticos tales como frentes fríos y líneas de tormenta, lo cual hace que este nuevo índice sea de gran utilidad para identificar las tormentas asociadas a este tipo de sistema. En el PLL del año también funciona muy bien, aunque puede tener tendencia a sobreestimar las áreas donde se desarrolla la convección, debido a que esta es una dificultad que presenta el índice K en esta época del año. Aquí sería más consecuente apoyar el análisis con los mapas pronóstico del GDI, que ha demostrado ser muy eficiente en la detección de la convección para la zona tropical.

Para el caso del 4 de mayo de 2019 los resultados del ID, fueron consecuentes con lo observado e incluso en correspondencia con lo sugerido por el índice GDI, figura 10. Para esta hora de pronóstico este índice sugería la formación de la línea de inestabilidad con valores de 100 a 110 indicando la posibilidad de una convección moderada y pequeñas zonas embebidas superiores a los 120, con posibilidad de una convección fuerte.

Verificación del pronóstico para el periodo lluvioso

Aunque la verificación del pronóstico se hizo para los dos periodos climáticos identificados en Cuba, los resultados fueron similares, para ambos. En el caso del periodo lluvioso tabla 5, los estadígrafos analizados arrojaron que los índices SI y LI, indican que la habilidad para determinar las condiciones de tormentas eléctricas es muy baja. Sin embargo, los índices con mejores habilidades para el pronóstico de tormentas eléctricas fueron el GDI y el creado por la autora de este trabajo, el ID. Es bueno decir que para ambos casos los resultados fueron de una sobreestimación (FBIAS mayor que 1) con respecto los valores observados en los días de tormentas.

En la tabla 6, se muestran los resultados de la verificación realizada para el periodo poco lluvioso. En este caso los resultados fueron similares a los observados en el periodo lluvioso, alcanzándose una habilidad muy mala para los índices SI y LI. Mientras que los índices GDI e ID mostraron los valores más altos de habilidad en el pronóstico de las tormentas con una probabilidad de detección del 0.8 y 0.7 respectivamente y un CSI de 0.5 y 0.4 respectivamente. Mientras que para ambos casos ocurrió una sobre estimación de los valores (FBIAS mayor que 1) e incluso mayor que para el periodo climático anterior.

Estas condiciones de sobreestimación en el pronóstico de los índices que mejor habilidad mostraron, está relacionado por el pronóstico propio del modelo, en el que se observa un desplazamiento o en algunos casos

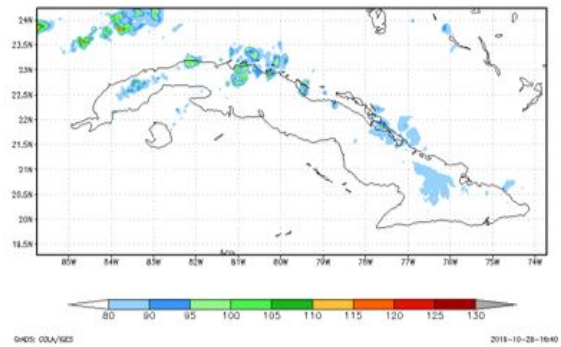


Figura 6. Pronóstico del índice derivado ID para el 26 de abril del 2019, válido para las 21:00 UTC.

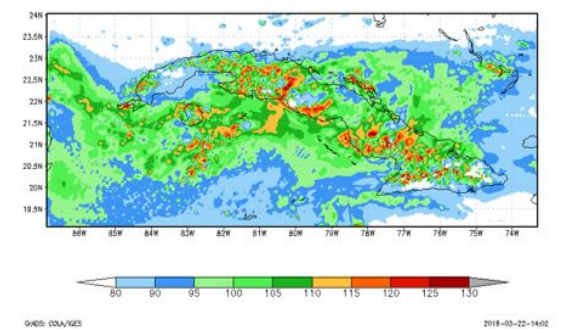


Figura 7. Pronóstico del índice derivado ID para el 8 de junio del 2008, válido para las 18:00 UTC.

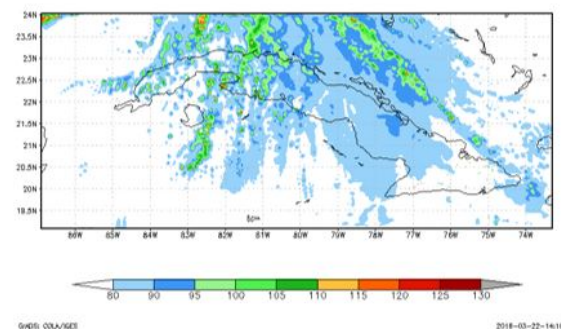


Figura 8. Pronóstico del índice derivado ID para el 31 de agosto del 2008, válido para las 12:00 UTC.

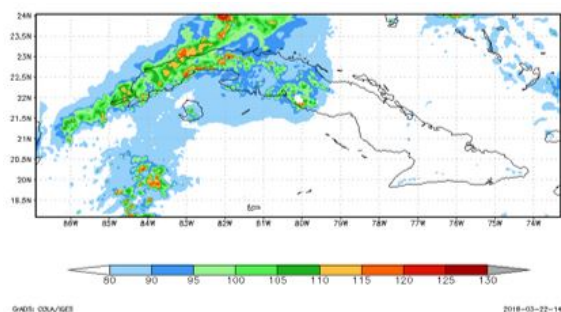


Figura 9. Pronóstico del índice derivado ID para el 27 de octubre del 2008, válido para las 18:00 UTC.

de estudio y en otros una ampliación en el tiempo de afectación por tormentas eléctricas. Resultados estos que son propios de la modelación numérica, pero que, desde el punto de vista práctico del pronóstico, se considera que es más consecuente una sobre estimación que no una subestimación de los diferentes procesos atmosféricos.

CONCLUSIONES

- Los índices termodinámicos tradicionales que mostraron los valores más significativos para la detección de tormentas eléctricas en el occidente cubano fueron el K y el TT.
- El índice GDI demostró una alta habilidad en la detección de tormentas eléctricas para la zona tropical seleccionada de estudio.
- Con los valores obtenidos de la CAPE, LI y SI, no fue posible discriminar la ocurrencia de tormentas en la región occidental de Cuba.
- Para los casos de ocurrencia de tormenta eléctrica, el índice K mostró valores entre 35-40, el GDI superiores a 25 y el TT entre 45-50.
- Se determinó el índice derivado (ID) que fue representativo para los dos períodos analizados.
- El índice derivado (ID) resultó ser más significativo para la ocurrencia de tormentas eléctricas con valores entre 100-120, en particular en el período

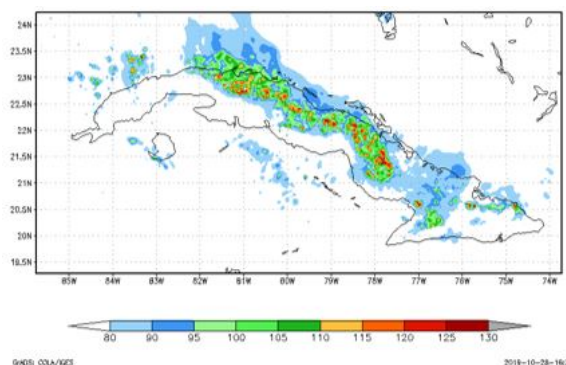


Figura 10. Pronóstico del índice derivado ID para el 4 de mayo del 2019, válido para las 21:00 UTC.

poco lluvioso, representando mejor los sistemas meteorológicos analizados que los índices tradicionales.

RECOMENDACIONES

- Extender el estudio al resto de las regiones (central y oriental) cubanas.
- Se recomienda que este nuevo índice sea utilizado en el pronóstico operativo de las TE, así como en los estudios climáticos y de caracterización de la inestabilidad atmosférica, en la región occidental de Cuba.

Tabla 5. Verificación del pronóstico para el periodo lluvioso.

Índices	Estadígrafos de verificación del pronóstico			
	H	FAR	CSI	FBI
SI	0	0	0	0
LI	0	0	0	0
KI	0,57	0,18	0,38	1,06
TT	0,35	0,09	0,29	0,55
CAPE	0,38	0,14	0,28	0,77
GDI	0,81	0,16	0,55	1,3
ID	0,75	0,16	0,51	1,23

Tabla 6. Verificación del pronóstico para el periodo poco lluvioso

Índices	Estadígrafos de verificación del pronóstico			
	H	FAR	CSI	FBI
SI	0.00	0.00	0.00	0.00
LI	0.00	0.00	0.00	0.00
KI	0.56	0.21	0.34	1.22
TT	0.40	0.12	0.29	0.69
CAPE	0.23	0.10	0.19	0.55
GDI	0.80	0.18	0.50	1.40
ID	0.73	0.18	0.46	1.32

REFERENCIAS

- Alfonso, A., M. Elizalde, and O. Solano. (1985): El mesoclima de la Península de Zapata. Reporte de Investigación del Instituto de Meteorología, (12): 35 p.
- Álvarez L., Borrajero I., Álvarez R., Aenlle L., Rivero I., Iraola C., Rojas Y., Hernández M., (2012 a) Estudio de la marcha interanual de la frecuencia de ocurrencia de observaciones con tormenta para el territorio cubano. Rev. de Climatología 12 pp1-21, 1578-8768.
<http://webs.ono.com/reclim/reclim12a.pdf>
- Bluestein, H. B. (1992). *Synoptic-dynamic Meteorology in Midlatitudes: Observations and theory of weather systems* (Vol. 2). Taylor & Francis.
- Cardenas Posso, Y., Pabon Caicedo, J. D., & Montoya Gaviria, G. D. J. (2004). Statistical thunderstorm short time forecast for the Barranquilla airport. *Meteorologia Colombiana*, 79-87.
- Davison, M., & Gálvez, J. (2016). WPC International Desks. *Índices de Estabilidad*, 1-104.
- Escudero, L. Á., Montejo, I. F., & Morales, R. Á. (2006). Análisis de la tendencia de las series de frecuencia de ocurrencia de observaciones con tormentas, de tormentas con lluvia y de días con tormenta para el territorio Cubano. *Revista Cubana de Meteorología*, 13(1).
- Escudero, L. Á., Montejo, I. B., Morales, R. Á., Ferro, L. A., & Castro, M. B. (2012). Actualización de la distribución espacial de las tormentas eléctricas en Cuba. *Revista Cubana de Meteorología*, 18(1), 83-99.
- Escudero, L. Á., & Montejo, I. B. (2016). Caracterización de la marcha anual de fenómenos meteorológicos en Cuba, clasificados según el código de tiempo presente. *Revista Cubana de Meteorología*, 22(1), 3-25.
- Figueredo, N. V., & Valdés, E. A. G. Comportamiento De Las Muertes Por Fulguración Ocurridas En Cuba Durante El Periodo 1987-2012.
- Galway, J. G. (1956). The lifted index as a predictor of latent instability. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 37(10), 528-529.
- Gancedo, O. (1981). Horarios de formación de las tormentas en Santa Clara y su distribución. *Santa Clara*.
- Jolliffe, I. T., & Stephenson, D. B. (Eds.). (2012). Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science. John Wiley & Sons.
- Lecha, L., Paz, L., & Lapinel, B. (1994). El clima de Cuba. Editorial Academia, La Habana, 186.
- Neumann, C. J. (1971). The thunderstorm forecasting system at the Kennedy Space Center. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 10(5), 921-936.
- Skamarock, W. C., & Klemp, J. B. (2008). A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of computational physics*, 227(7), 3465-3485.
- Stern, H. (2002, January). A knowledge-based system to generate internet weather forecasts. In 18th Conference on Interactive Information and Processing Systems.
- Tajbakhsh, S., Ghafarian, P., & Sahraian, F. (2012). Instability indices and forecasting thunderstorms: the case of 30 April 2009. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(2), 403-413.

Conflicto de interés. Declaramos, no tener ningún conflicto de interés

Contribución de los autores: Concepción de la idea: Yesenia Arias Mulet Pedro Manuel González jardines.

Manejo de los datos: Lourdes Álvarez-Escudero, Yesenia Arias Mulet, Pedro Manuel González jardines.

Análisis de los datos: Lourdes Álvarez-Escudero, Yesenia Arias Mulet, Pedro Manuel González jardines.

Investigación: Yesenia Arias Mulet. **Metodología:** Yesenia Arias Mulet, Pedro Manuel González jardines.

Supervisión: Lourdes Álvarez-Escudero. **Validación de los resultados:** Lourdes Álvarez-Escudero.

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/)