

Pronóstico de conglomerados de nubes verticales en la Región de Información de Vuelos de Cuba

Forecast of vertical clouds clusters in the Flight Information Region of Cuba

Juan Ayón Alfonso^{I*}, Jesús Salomón Llanes^I, Maibys Sierra Lorenzo^{II}

^IInstituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana, Cuba

^{II}Instituto de Meteorología, Cuba

*Autor de correspondencia: jayón@instec.cu

Recibido: 2 de enero de 2023

Aprobado: 15 de febrero de 2023

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

RESUMEN/ ABSTRACT

La aviación requiere información meteorológica actualizada y disponible en un corto espacio de tiempo para garantizar la seguridad operacional y su eficiencia. Cada estado tiene asignada una región para el control de los vuelos y para la vigilancia meteorológica. Ante la presencia o el pronóstico de posible ocurrencia de conglomerados de nubes de grandes desarrollos verticales que impidan el normal desplazamiento de las aeronaves, estas oficinas deberán emitir las alertas correspondientes. La alerta temprana por la posible ocurrencia de esta condición contribuye a la seguridad y eficiencia de los vuelos. Tomando en cuenta que, para condiciones atmosféricas tropicales, fue desarrollado un índice que indica su grado de inestabilidad atmosférica, se propone su aplicación para dichas condiciones tropicales, utilizando como base de cálculo, el sistema de predicción numérico a corto plazo (SisPi) desarrollado por el Instituto de Meteorología de Cuba, obteniéndose resultados satisfactorios.

Palabras clave: aeronave; conglomerados de nubes de desarrollo vertical; pronósticos; modelos numéricos.

The aviation requires actualized and available meteorological information in a very short period of time, in order to guarantee the flight safety. Each state has assigned a region for the control of the flights and for the surveillance of the weather conditions. When it is present or is forecasted the possibility of the occurrence of great vertical developed clouds clusters that could affect the normal flight of the aircrafts, those meteorological watch offices shall transmits the appropriated alerts. Taking into consideration that, for tropical atmospheric conditions, it was developed an index that shows the degree of atmospheric instability, it is proposed the application of this forecast method for such tropical conditions and supporting the calculations by the numerical prediction system of short period of time (SisPi) developed by the Cuban Meteorological Institute, obtaining satisfactory results.

Key words: aircraft; vertical developed cloud clusters; forecasts; numerical models.

INTRODUCCIÓN

Diariamente los hombres afrontan diferentes condiciones que se producen en la atmósfera, las que acostumbran a denominar estado del tiempo atmosférico o meteorológico, que no es más que el estado físico de la atmósfera en un territorio dado durante un determinado plazo de tiempo. En la era moderna, la aviación forma parte fundamental de la vida y la sociedad mundial y en la medida que ésta se desarrolla, se incrementa la cantidad de vuelos.

Cómo citar este artículo:

Juan Ayón Alfonso, Jesús Salomón Llanes y Maibys Sierra Lorenzo. Pronóstico de conglomerados de nubes verticales en la Región de Información de Vuelos de Cuba. Ingeniería Energética. 2023. 44(1), enero/abril. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

Las aeronaves comienzan a volar a mayor distancia y a mayores altitudes y las tripulaciones de vuelo y personal de operaciones necesitaban conocer mucho más del comportamiento real y previsto de la atmósfera que les permitieran llevar a cabo su planificación segura. Aparecieron nuevos espacios dónde desarrollar estos vuelos, pero también, nuevas situaciones meteorológicas no conocidas. La mejora de los métodos de pronósticos es fuente de investigación y desarrollo, basada en los análisis de la meso y la microescala utilizando computadores más potentes capaces de realizar millones de operaciones en un corto período de tiempo para el procesamiento de los datos meteorológicos procedentes de las diversas fuentes. Se desarrolló el pronóstico numérico del tiempo (PNT) el cual es un método de pronóstico que emplea un conjunto de ecuaciones matemáticas que modela y describe el comportamiento de los fluidos.

Estas ecuaciones son trasladadas a un código de computación utilizando ecuaciones de gobierno, métodos numéricos, parametrizaciones de otros procesos físicos, y combinadas con condiciones de inicio y de límites antes de ser corridas sobre un dominio o área geográfica. Cada uno de los pasos que se llevan a cabo en los PNT incluye omisiones, estimaciones, aproximaciones y compromisos. Mediante acuerdos regionales de navegación aérea, a cada estado se le asigna una Región de Información de Vuelos (FIR por sus siglas en inglés) para llevar a cabo el control del movimiento de las aeronaves en dicho espacio aéreo, actividad que realizan los Centros de Control de Tránsito Aéreo (CCTA) [1]. En Cuba, esta FIR se denomina FIR Habana (figura 1). Las Oficinas de Vigilancia Meteorológica (MWO por sus siglas en inglés) se encuentran asociadas a estos CCTA, las cuales tienen la responsabilidad de mantener una vigilancia constante de las condiciones meteorológicas en dicho espacio aéreo[2].



Fig. 1. Región de Información de Vuelos de Cuba (FIR Habana). Preparado por el autor

En caso de detectar la presencia o prever la posibilidad de ocurrencia de alguna condición meteorológica que pueda poner en peligro la seguridad los vuelos que se encuentren en su área de responsabilidad, las MWO deberán emitir un aviso mediante mensajes de alerta denominados SIGMET y AIRMET (por sus siglas en inglés) [3], según el nivel de vuelo que pueda ser afectado, dirigido a los controladores de tránsito aéreo de los CCTA y éstos a su vez a los comandantes de las aeronaves que se encuentran bajo su control para coordinar las acciones a tomar a fin de evitar dichas condiciones peligrosas. Los SIGMETs se elaboran para la alerta meteorológica a los vuelos que se realizan mediante Reglas de Vuelos por Instrumentos (IFR por sus siglas en inglés) y AIRMET, para aquellos que se desarrollan por debajo de los 3000 metros de altitud. Igualmente, esta información es enviada a las MWO de las FIR adyacentes, para de esta forma mantener informados a todos los involucrados, de la presencia o del pronóstico de una condición meteorológica significativamente peligrosa.

Tomando en cuenta todas estas regulaciones, cada estado establece cómo suministrar dicha información meteorológica en su área de responsabilidad para satisfacer las necesidades de los vuelos y el cumplimiento de los acuerdos regionales de navegación aérea. Estos SIGMETs son enviados a las MWO de las FIR adyacentes, para de esta forma mantener informados a todos los involucrados, de la presencia o del pronóstico de una condición meteorológica significativamente peligrosa. Tomando en cuenta todas estas regulaciones, cada Estado establece cómo suministrar dicha información meteorológica en su área de responsabilidad para satisfacer las necesidades de los vuelos, así como para el cumplimiento de los acuerdos regionales de

navegación aérea. El periodo de validez de este tipo de mensaje no debe exceder de las cuatro horas, razón por la que se considera un pronóstico a muy corto plazo.

Los procedimientos de emisión de SIGMET/AIRMET no son novedosos, porque se basan en las Normas y Procedimientos Recomendados (conocidos como SARPs por sus siglas en idioma inglés), establecidos por la OACI. La identificación de condiciones meteorológicas complejas y el pronóstico de su comportamiento futuro dependen de la capacidad de los pronosticadores de la MWO para llevar a cabo este procedimiento. A pesar de la existencia de esta norma, aún se mantiene la ausencia de dicha información en momentos necesarios en muchas partes del mundo.

Conglomerados de nubes de gran desarrollo vertical

La presencia de conglomerados de nubes de desarrollo vertical afecta notablemente el normal desempeño de las aeronaves en sus rutas previstas, por la severidad de los daños que produce cuando no son detectadas o notificadas mediante mensajes de alerta. Cuando por determinadas causas, las mismas vuelan dentro de ellas, se produce severa turbulencia debido a las fuertes corrientes ascendentes y descendentes dentro de estas nubes, descargas eléctricas que pueden dañar los sistemas de navegación y las comunicaciones y fuertes granizadas que pueden dañar la estructura, antenas y parabrisas de las aeronaves (figura 2).

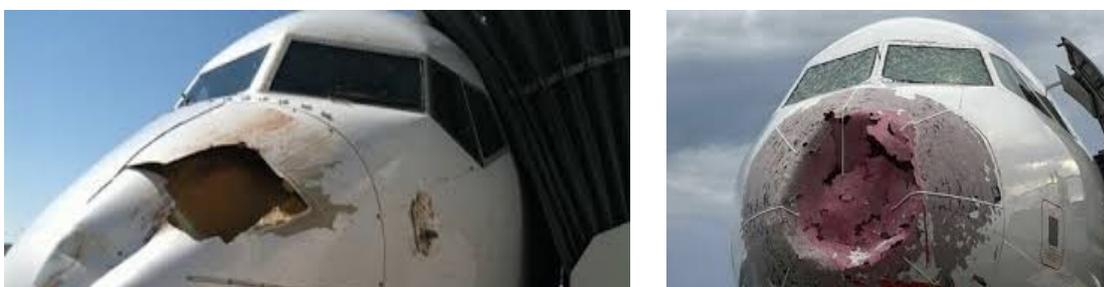


Fig.2. Vista de aeronaves dañadas por fuertes granizadas ocurridas dentro o en los alrededores de nubes cumulonimbus

La complejidad del pronóstico de nubes radica en que las mismas se desarrollan por múltiples causas físicas, dinámicas y térmicas, las cuales están muy estrechamente ligadas entre sí y en muchas ocasiones, difíciles de identificar o calcular. En la figura 3, se observa, desde un punto de vista físico, que cuando existe un flujo convergente en el plano horizontal, la masa A B se reduce en dicho plano, pero se produce un estiramiento de la misma en la vertical al ser obligada a ascender. En este proceso aparentemente sencillo, se produce un aumento de la temperatura por compresión de la masa de aire. Al aumentar su temperatura, se vuelve más ligera facilitando su ascenso.

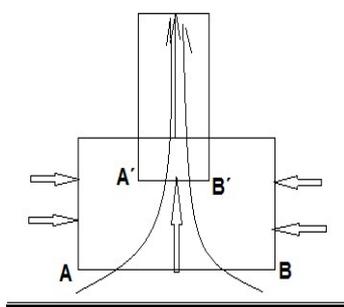


Fig. 3. Flujo convergente

Si se asume que dicha columna de aire se mantiene no saturada en la medida que asciende, el parámetro de estabilidad estará dado por $\partial\Phi/\partial z = \Delta\Phi/\Delta z$, donde $\Delta\Phi$ es la diferencia de temperatura potencial entre el tope y la base de la columna de aire y Δz es el espesor geométrico de la columna. Para un ascenso adiabático seco, $\Delta\Phi$ permanece constante. Si se asume que el área seccionada abajo no cambia, se producirá el estiramiento, como se muestra en la vertical que se muestra en la propia figura 3. Dependiendo de la condición

termodinámica de la atmósfera en ese momento, la masa de aire seguirá ascendiendo en mayor o menor grado. Al ascender se expande y se enfría, y en dependencia de su contenido de humedad, se producirá o no nubosidad.

Los conglomerados de nubes de gran desarrollo vertical se producen por fuerte ascenso del aire generado por varios factores, entre otros, masas de aire con altas temperaturas y una gran inestabilidad atmosférica; zonas frontales con masas de aire más densas que obligan al aire menos denso a ascender; o de obstáculos físicos como zonas montañosas que obligan el ascenso de estas corrientes de aire. En todos los casos, esas masas de aire ascendente deberán poseer un alto contenido de humedad. La mayoría de los pronósticos de nubosidad se basan en las salidas de los modelos numéricos y se utilizan en numerosas investigaciones y servicios meteorológicos. Es uno de los elementos meteorológicos que presenta mayores dificultades en el pronóstico de los modelos numéricos debido a lo complicado que resulta simular de forma adecuada los procesos que ocurren antes mencionados, durante la formación, el desarrollo y la disipación de las nubes. Las variaciones espacial y temporal que experimentan los campos nubosos dificultan el pronóstico de los modelos numéricos, para los cuales constituye un reto representar adecuadamente a las nubes en el tiempo y el lugar correctos [4].

Cuando se habla de estabilidad o inestabilidad atmosférica, se está señalando la capacidad que tiene un entorno atmosférico para modificar su estado en virtud de una fuerza exterior llamada forzamiento. Dependiendo de las características que presente el sistema, la respuesta a esta acción puede ser más o menos notable. En Principio, en un entorno inestable, la respuesta al forzamiento será más intensa que si la acción se ejerce sobre un entorno estable. Existe gran cantidad de variables que caracterizan una masa de aire entre las que se pueden citar, la razón de mezcla, la humedad relativa, la tensión del vapor, la temperatura potencial, el nivel de condensación convectivo, etc. y todos ellos pueden calcularse a partir de los datos de un sondeo atmosférico. Estos datos son accesibles no sólo a partir de los radiosondeos que se realizan en distintas localizaciones geográficas, sino también mediante modelos numéricos, con los cuales se pueden obtener datos previstos para estas variables en distintos puntos de una rejilla, con una red definida que no necesariamente corresponde con las estaciones de sondeo existentes.

En la FIR Habana se dispone de pocos y muy espaciados datos del sondeo atmosférico real, lo cual muestra uno de los inconvenientes para su utilización. La presencia de agua en la atmósfera ya sea de forma visible o no, es de gran importancia para los diferentes procesos que en ella se producen, siendo evidente que, a mayor contenido de humedad, mayor probabilidad de formación de nubes. Dependiendo del nivel de actuación de cada uno de estos factores, así será la magnitud del desarrollo del campo nuboso en determinadas áreas. Por lo tanto, es necesario conocer, con la mayor precisión posible, cómo interactúan entre sí estos elementos una vez identificada su presencia y sus magnitudes. Otro elemento a tener en cuenta son los impactos del cambio climático que incluye el incremento de la frecuencia de ocurrencia de fenómenos meteorológicos que pueden interferir el normal desenvolvimiento de la aviación, entre ellos, actividades de nubes de tormenta más severas [5, 6].

Conglomerados de nubes de gran desarrollo vertical

Los conglomerados de nubes de desarrollo vertical necesitan varios elementos que favorezcan su generación, tales como:

- la convergencia del flujo del aire en los niveles bajos de la atmósfera u otras causas físicas-geográficas que permitan un ascenso del mismo, que como consecuencias produzcan un enfriamiento por expansión de esa masa al encontrar menor presión y la subsiguiente condensación;
- un fuerte calentamiento de la superficie debido a la radiación solar;
- una adecuada humedad que mantenga al aire saturado durante su ascenso hasta grandes altitudes;
- inestabilidad atmosférica;
- el adentramiento que se pueda producir en la masa de aire que asciende y que pudiera variar sus características, principalmente en el contenido de humedad y en valores de temperatura; y
- una cizalladura vertical para organizar y sostener el ascenso de esta masa de aire.

De los elementos arriba mencionados que más inciden en las regiones tropicales se pueden mencionar: el gran calentamiento de las superficies debido a la alta insolación que existe en estas regiones; el alto contenido de humedad en una buena parte de la estructura vertical de la atmósfera, pero principalmente entre 925 hPa y 850 hPa; y el índice de inestabilidad atmosférica, pues se ha observado que los otros elementos tienen una baja presencia en los trópicos. En el libro “Atlantic Hurricanes” [7], los autores mencionan que investigaciones

científicas han mostrado que la energía interna que posee una nube cumulonimbus común de verano es equivalente con la detonación de 13 bombas atómicas del tipo Nagasaki. Por lo tanto, un conjunto de nubes cumulonimbus posee una capacidad destructiva de grandes magnitudes.

Se han desarrollado estudios para determinar cuan afecta el cambio que se está produciendo, en sentido general, en el clima y de qué forma podría afectar el desarrollo de conglomerados de nubes de gran desarrollo vertical [8]. En este mismo sentido, otros estudios llevados a cabo sobre el comportamiento de las nubes de gran desarrollo vertical y su influencia en la variación de la temperatura, debido a que impiden una cierta cantidad de radiación solar sobre la superficie, lo cual incide en un menor calentamiento que provoque el desarrollo nuboso [9]. Por otro lado, el servicio meteorológico de China ha desarrollado nuevos métodos para obtener de forma objetiva la temperatura vertical dentro de la nube, utilizando el primer satélite meteorológico geoestacionario chino de próxima generación [10]. Este elemento podría contribuir al pronóstico de desarrollo de conglomerados de nubes de gran desarrollo vertical, pero se requiere disponer de dicha información de forma regular.

Se han desarrollado gran variedad de índices termodinámicos que permiten determinar el grado de estabilidad o inestabilidad atmosférica, muchos de ellos utilizados de forma general para todas las latitudes, aunque fundamentalmente concebidos por investigadores de latitudes medias. Se conoce, que el índice Gálvez-Davison (GDI) [11], fue desarrollado para las latitudes tropicales y que fue concebido intencionalmente para obtener valores similares a los de temperatura del índice K, que tiende a funcionar mejor en las latitudes tropicales. En tal sentido se ha considerado apropiado para realizar los cálculos en el área de estudio utilizando mediante la utilización del GDI.

Por lo tanto, el análisis combinado de cada uno de estos valores que corresponden a la micro y mesoescala, y cuyos resultados pudieran permitir ser utilizados en modelos de pronósticos numéricos a corto plazo, permitiría predecir la posible ocurrencia de conglomerados de nubes de desarrollo vertical, asimilando datos provenientes de modelos regionales como el antes mencionado WRF.

En el Instituto de Meteorología (INSMET) se ha desarrollado de forma exitosa, un sistema de predicción a corto plazo, denominado SisPI, [12], que utiliza el acoplamiento de modelos de pronóstico numérico del tiempo como el Weather Research & Forecast (WRF) para el pronóstico a muy corto plazo y la asimilación de datos, que tributan al pronóstico de fenómenos locales. La determinación de esta configuración estuvo basada en estudios de sensibilidad de las combinaciones de tres parametrizaciones de microfísica y tres de cúmulos, variación de cantidad de niveles verticales y ajustes de las parametrizaciones de radiación de onda larga y onda corta, para dos dominios anidados bidireccionalmente de 27 y 9 km de resolución y un dominio de 3 Km anidado unidireccionalmente (figura 4).

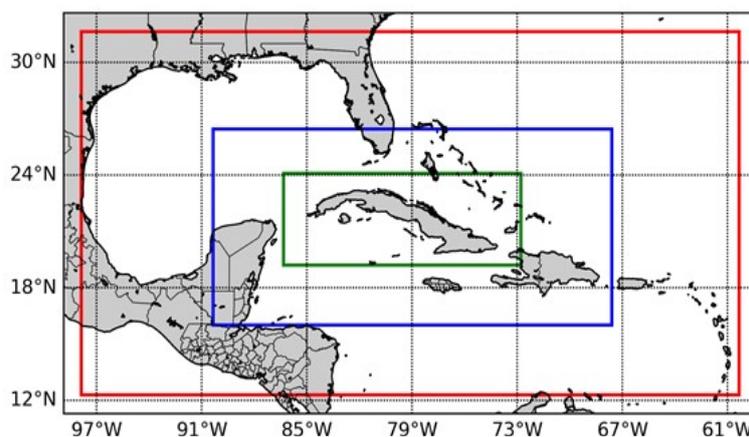


Fig. 4. Dominios de simulación del SisPI. Los cuadros rojo, azul y verde cuentan con resoluciones espaciales horizontales de 27, 9 y 3 km respectivamente. Fuente [14]

El SisPI cuenta con cuatro actualizaciones diarias inicializadas en los horarios 0000, 0600, 1200 y 1800 UTC con la información del Global Forecast System (GFS) [13] y sus propiedades permiten cumplir con el objetivo de realizar un pronóstico a corto plazo sobre la posible ocurrencia de nubes de desarrollo vertical. Para ello se

utilizará la combinación de los dominios de simulación con 9 y 3 Km de resolución espacial que permita cubrir la FIR de Cuba a partir del pronóstico de las variables meteorológicas requeridas.

Cálculo del GDI

El GDI consiste en una suma algebraica de tres subíndices poco dimensionales y un factor de corrección del terreno. Cada uno de estos índices describe un comportamiento troposférico relevante para la convección tropical.

La ecuación (1), del cálculo del GDI es:

$$GDI = CBI + MWI + II + TC, \quad (1)$$

donde CBI es el Índice de flotabilidad de la columna; MWI es el Índice de calentamiento de la tropósfera media; II es un Índice de Inversión; y TC es una corrección opcional del terreno.

El CBI describe la disponibilidad de calor y humedad en la columna. Es el único subíndice del GDI que produce valores positivos, por lo que puede considerarse como de incremento. Se hace grande cuando la capa C es reforzada por condiciones de altas temperaturas y humedad cerca de la capa A. Altos valores sugieren la presencia de una profunda capa húmeda potencialmente capaz de poseer convección profunda y potencialmente fuertes lluvias. Para calcular CBI, primero se calculan los factores de EPT (temperatura potencial equivalente) para la tropósfera media (ME) y baja (LE) y subsecuentemente son usadas para calcular el CBI con una ecuación condicional (2, 3, 4):

$$ME = EPTPC - \beta \quad (2)$$

$$LE = EPTPA - \beta \quad (3)$$

$$CBI = \begin{cases} \gamma \times LE \times ME, & LE > 0 \\ 0, & LE \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

donde $\beta = 303K$ es una constante empírica designada para establecer el límite más bajo para la disponibilidad de calor y humedad en la capa-límite. Esto es independiente de las masas de aire que son muy secas y/o frías, las cuales fijan el CBI a cero. La constante $\gamma = 6.5 \times 10^{-2} [K^{-1}]$ es una cantidad escalar empírica usada para alcanzar valores dimensionales en rangos similares a aquellos del índice K

El MWI es usado para la estabilización/desestabilización, en asociación con las cuñas calientes/vaguadas frías en la tropósfera media. Es un factor inhibitor que produce solamente valores negativos o cero. Los valores negativos ocurren cuando las temperaturas en el nivel de 500 hPa exceden el umbral $\tau = 263.15K$ o $-10^\circ C$. Temperaturas en 500 hPa por encima de este valor están relacionadas con una fuerte inhibición.

El MWI es calculado mediante la ecuación (5):

$$MWI = \begin{cases} \mu \times (T_{500} - \tau), & T_{500} - \tau > 0 \\ 0, & T_{500} - \tau \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

donde $\mu = -7 [K^{-1}]$ es una constante empírica designada a propósito para fijar valores negativos a MWI y para controlar el peso relativo de MWI en la ecuación GDI (1).

El Índice de Inversión II es también un factor de inhibición designado para captar los efectos de TWI. Considera dos procesos que inhiben la convección de los vientos alisios: estabilidad a través de la inversión y adentramiento de aire seco, una vez que penetren las células convectivas. Consiste en una suma algebraica de dos factores adimensionales: un factor de estabilidad S y un factor de sequedad D. La siguiente ecuación condicional es utilizada para fijar valores positivos de cero. Ver ecuación (6).

$$II = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \sigma_X(S+D) \end{array} \right. , \left. \begin{array}{l} S+D > 0 \\ S+D \leq 0 \end{array} \right\} \quad (6)$$

donde $\sigma = 1.5 [K^{-1}]$ es una constante empírica designada a propósito para controlar el peso de los efectos de TWI en la fórmula de GDI (1). D es un término de gradiente y es calculado mediante la simple diferencia de temperaturas en 950 hPa y 700 hPa (K). Ver ecuación (7).

$$S = T_{950} - T_{700} \quad (7)$$

A menor diferencia, mayor la estabilización debido a un incremento en la flotabilidad negativa. D es calculado utilizando la diferencia de los factores EPT de las capas A y B. Ver ecuación (8).

$$D = EPTPB - EPTPA \quad (8)$$

y justifica el efecto del adentramiento de aire seco a través de la inversión. A mayor disminución de EPT con la altura, más negativo se hace D, lo que significa un mayor adentramiento de aire seco y la inhibición de desarrollo convectivo.

Para realizar el cálculo del GDI aplicando la ecuación(1), se toman los valores de temperatura (T) y de razón de mezcla (r) en cada punto de rejilla de la superficie de 950 hPa, la cual se toma en vez de 925 hPa, para tener información cercana a la capa límite; en cada punto de rejilla de las superficies de 850 hPa y 700 hPa que son las capas que están cerca o sobre la inversión de la subsidencia; y en cada punto de rejilla de la superficie de 500 hPa que resume el rol de niveles medios (estabilización/desestabilización y contenido de humedad).

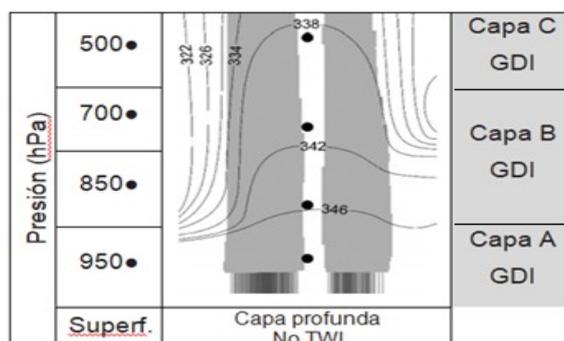


Fig. 5. Representación esquemática de la temperatura potencial equivalente

La figura 5, muestra una representación esquemática de la temperatura potencial equivalente (EPT por sus siglas en inglés) característica de los regímenes de vientos alisios. Las isolíneas muestran temperaturas en grados K.

Los puntos negros muestran los cálculos de GDI. La capa A representa las condiciones termodinámicas de la capa límite. La capa B captura la variabilidad asociada con la inversión del viento en los alisios (TWI por sus siglas en inglés). La capa C representa la tropósfera media considerando los datos de 500 hPa.

Para cada capa se calcula primero la temperatura potencial θ , y la razón de mezcla r mediante las ecuaciones (9-14):

Capa A

$$\theta_A = \theta_{950} = T_{950} (1000 / 950)^{2/7} \quad (9)$$

$$r_A = r_{950} \quad (10)$$

Capa B

$$\theta B = 0.5(\theta 850 + \theta 700) = 0.5[T850(1000/850)^{2/7} + T700(1000/700)^{2/7}] \quad (11)$$

$$rB = 0.5(r850 + r700) \quad (12)$$

Capa C

$$\theta C = \theta 500 = T500(1000/500)^{2/7} \quad (13)$$

$$rC = r500 \quad (14)$$

Al calcular estos elementos, se obtienen los valores correspondientes a cada punto de la rejilla de toda la FIR, los cuales indicarán las áreas donde podrían ocurrir conglomerados de nubes de desarrollo vertical. La tabla 1, muestra la potencialidad de la formación de los tipos de nube, a partir de los valores asignados.

Tabla 1. Desarrollo nuboso correspondiente con los valores de GDI

Valor de GDI	Potencialidad de formación de tipo de nubes
> +45	Dispersos hasta amplia dispersión de fuerte precipitación produciendo tormentas eléctricas
+35 hasta +45	Dispersas tormentas eléctricas, algunas capaces de producir fuertes precipitaciones
+25 hasta +35	Dispersas tormentas eléctricas o convección baja con aisladas tormentas eléctricas
+15 hasta +25	Pocas tormentas eléctricas aisladas, pero mayormente con baja convección
+05 hasta +15	Convección baja. Posibilidad muy aislada de tormentas eléctricas

Para una mejor visualización gráfica de estos resultados, cuando el valor GDI sea igual o superior a 45, se observará en el mapa meteorológico pronosticado un área en color rojo, lo cual resalta la peligrosidad de la misma. En la medida que este valor disminuye, los colores cambian, correspondiendo al color naranja a los valores de GDI obtenidos entre 35 y 45; para valores de GDI entre 25 y 35, el color asignado corresponde al amarillo; para GDI con valores entre 15 y 25, se le asigna el color verde; y para valores entre 5 y 15, se le asigna el color azul. De esta forma, los mapas muestran las diferentes intensidades en que pueden ocurrir o no, conglomerados de nubes de desarrollo vertical.

Para el pronóstico de ocurrencia de conglomerados de nubes de desarrollo vertical, utilizando la ecuación (1), para el cálculo del GDI, se tomarán, para cada punto de la rejilla establecida, los valores de temperatura (T) y de razón de mezcla (r) correspondientes a la capa de 950 hPa; los valores promedio de estos elementos entre las capas de 850 hPa y 700 hPa; y los valores de T y r para la capa de 500 hPa como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Cálculo para cada punto de rejilla Lat.N/Long.W

Capa isobárica	temperatura potencial θ	razón de mezcla r
(A) 950 hPa	$T_{950} (1000/950)^{2/7}$	r_{950}
(B) 850 hPa/700 hPa	$0.5[T_{850}(1000/850)^{2/7} + T_{700}(1000/700)^{2/7}]$	$0.5(r_{850} + r_{700})$
(C) 500 hPa	$T_{500}(1000/500)^{2/7}$	r_{500}

El resultado de estos cálculos indicará la disposición de la atmósfera de permitir o no, nubes de gran desarrollo vertical. Al obtenerse valores por encima de 45, existirá indicaciones de probable ocurrencia de nubes de gran desarrollo vertical en determinadas áreas.

Para realizar estos cálculos, se tomó la información del WRF correspondiente a los días 18 y 19 del mes de octubre del año 2022 y se realizaron las corridas mediante el sistema de predicción SisPi, obteniéndose los resultados que se muestran en la figura 6.

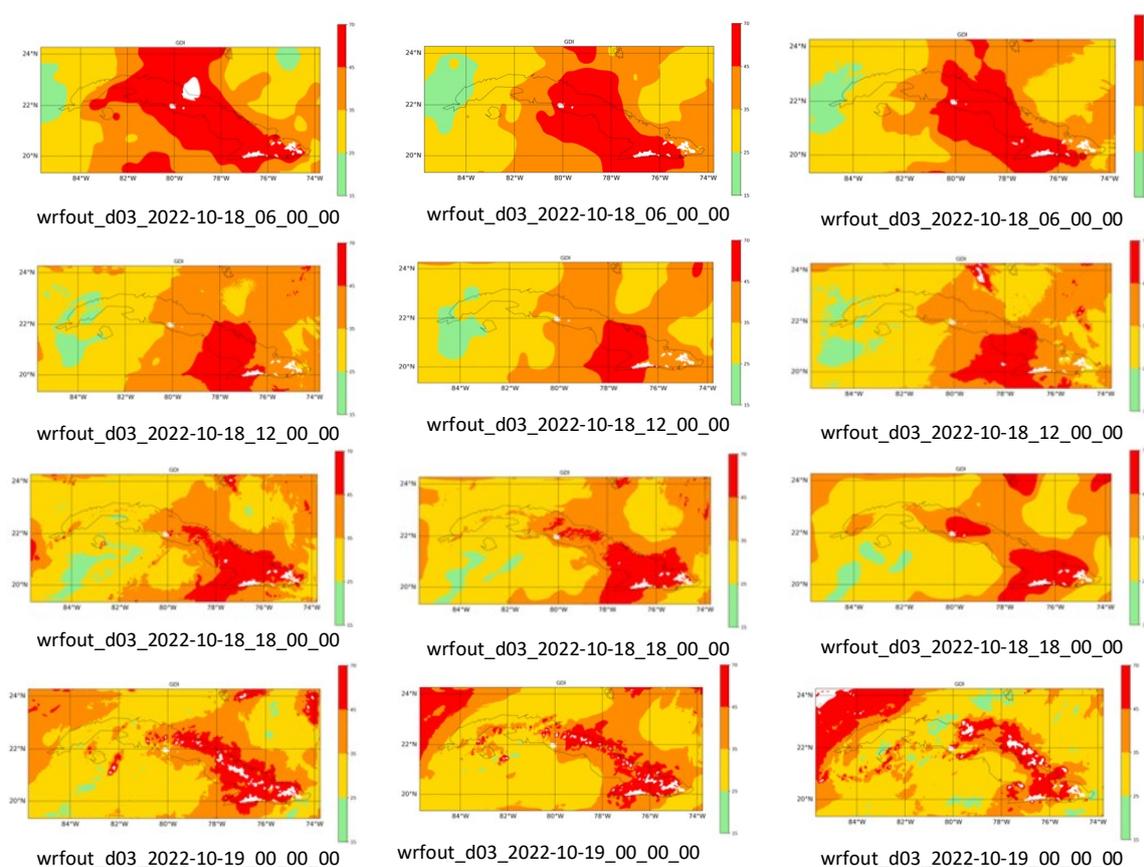


Fig. 6. Resultado de las corridas del SisPi los días 18 y 19 de octubre de 2022

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran las áreas donde se prevé, en las siguientes 6 horas, la formación de conglomerados de nubes de gran desarrollo vertical dentro del área de responsabilidad, lo cual constituye una herramienta importante para el meteorólogo de la MWO de La Habana para la emisión de alerta temprana de probabilidad de ocurrencia de esta situación meteorológica y que permita a todos los involucrados, tomar las medidas preventivas para garantizar, en primer lugar, la seguridad de los vuelos en dichas áreas, así como realizar los ajustes operacionales necesarios para una mejor distribución del tráfico aéreo en la zona y el consecuente ahorro económico.

Estudios complementarios a este trabajo son necesarios para la asimilación de datos satelitales y de radares meteorológicos que confirmarían los procedimientos desarrollados en el pronóstico de estos conglomerados de nubes de gran desarrollo vertical.

REFERENCIAS

- [1] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). "Plan de Navegación Aérea CAR/SAM". Montreal 2019. [Consultado el 15 de julio de 2022]. Disponible en: <https://www4.icao.int/ganpportal/>
- [2] Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). "Anexo 3 al Convenio de Chicago de la OACI, Servicio Meteorológico para la Navegación Aérea Internacional". Montreal 2020. [Consultado el 15 de julio de 2022]. Disponible en: <https://www.anac.gov.ar/anac/web/uploads/normativa/anexos-oaci/anexo-3.pdf>

- [3] World Meteorological Organization (WMO). “Technical Regulations (WMO-No. 49), Volume II – Meteorological Service for International Air Navigation”. Parts I and II. Ginebra 2020. [Consultada el 2 de agosto de 2022]. Disponible en: https://library.wmo.int/?lvl=notice_display&id=21806
- [4] World Meteorological Organization (WMO). “Methods of Interpreting Numerical Weather Prediction Output for Aeronautical Meteorology (WMO-No. 770)”. Technical Note No. 195. 1917. [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=5818
- [5] Puempel H and Williams P D 2016 “The impacts of climate change on aviation: scientific challenges and adaptation pathways”. ICAO Environmental Report 2016: OnBoard A Sustainable Future, pp. 205–07. [Consultada el 2 de agosto de 2022]. Disponible en: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2016/ENVReport2016_pg205-207.pdf
- [6] Ryley, T, *et al.* “Climate change influences on aviation: A literature review”. Transport Policy, 92. p. 55-64. ISSN 0967-070X. [Consultado el 15 de julio de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.04.010>
- [7] Gordon E. Dunn, Banner I Miller. “Atlantic Hurricanes”. p 133. Unidad productora 03. Instituto del Libro Edición 1969. [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: <https://www.amazon.com/Atlantic-Hurricanes-Gordon-Dunn/dp/B0006BM85S>
- [8] European Commission. “Cloud shapes and formations impact global warming – but we still don’t understand them”. Horizon, The EU Research & Innovation Magazine Sarah 2020. [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/en/horizon-magazine/cloud-shapes-and-formations-impact-global-warming-we-still-dont-understand-them>
- [9] Guorong Sun, Yuning Li and Lihang Liu. “Why is there a tilted cloud vertical structure associated with the northward advance of the East Asian summer monsoon”. Atmospheric Science Letters. 2 may 2019, vol. 20, n. 6. [Consultado el 15 de julio de 2022]. Disponible en: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/asl.903>
- [10] Yilun Chen, *et al.* “Retrieval of the vertical evolution of the cloud effective radius from the Chinese FY-4 (Feng Yun 4) next-generation geostationary satellites”. 2020. [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: <https://acp.copernicus.org/articles/20/1131/2020/acp-20-1131-2020-assets.html>
- [11] Gálvez J M, Davison M. “The Gálvez-Davison Index for Tropical Convection”. 2016. [Consultado el 15 de julio de 2022]. Disponible en: https://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/gdi/GDI_Manuscript_V20161021.pdf
- [12] Sierra-Lorenzo, M, *et al.* “Estudios de sensibilidad del SisPI a cambios de la PBL, la cantidad de niveles verticales y las parametrizaciones de microfísica y cúmulos a muy alta resolución”. Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba. 2017. [Consultado el 15 de julio de 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/325050959_Estudios_de_sensibilidad_del_SisPI_a_cambios_de_la_PBL_la_cantidad_de_niveles_verticales_y_las_parametrizaciones_de_microfisica_y_cumulos_a_muy_alta_resolucion
- [13] Skamarock, W. C. *et al.* “A Description of the Advance Research WRF Version 4”. NCAR Tech. Note. Boulder, Colorado, USA Jan 2019, p. 145. [Consultado el 25 de junio de 2022]. Disponible en: <https://opensky.ucar.edu/islandora/object/opensky:2898>

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Juan Ayón Alfonso: <https://orcid.org/0000-0001-5152-2675>

Diseño de la investigación, recolección de datos y procesamiento, simulación. participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo y en la aprobación final.

Maibys Sierra Lorenzo: <https://orcid.org/0000-0003-3848-1474>

Recolección de datos y procesamiento, simulación. participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo y en la aprobación final.

Jesús Salomón Llanes: <https://orcid.org/0000-0003-0273-0990>

Recolección de datos, simulación. participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo y en la aprobación final.