

Pronóstico de engelamiento de aeronaves en la región de información de vuelos de Cuba

Aircraft icing forecast in the flight information region of Cuba

Juan Ayón Alfonso^{1,*}, Jesús Salomón Llanes¹, Maibys Sierra Lorenzo¹¹

¹Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana, Cuba

¹¹Instituto de Meteorología, Cuba

*Autor correspondencia: jayón@istec.cu

Recibido: 4 de mayo de 2022

Aprobado: 1 de septiembre de 2022

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



RESUMEN/ ABSTRACT

El suministro de la información meteorológica para la aviación está vinculado con la seguridad operacional. Por acuerdos internacionales, cada Estado tiene asignada una Región de Información de Vuelos (FIR) para el control de los vuelos y las oficinas meteorológicas asociadas son responsables de la vigilancia de sus condiciones de tiempo, debiendo emitir las alertas correspondientes ante la presencia u ocurrencia prevista de fenómenos peligrosos. La formación de hielo sobre las superficies de las aeronaves, es uno de estos fenómenos que afecta no solo su seguridad, sino también la eficiencia del vuelo. Varios métodos se han desarrollado en latitudes medias y altas para su pronóstico, no así para latitudes tropicales. Este trabajo evalúa aplicación de algunos de estos métodos de pronóstico en condiciones tropicales, tomando como base de su aplicación, el sistema de predicción a corto plazo desarrollado por el Instituto de Meteorología de Cuba, obteniéndose resultados iniciales satisfactorios, factibles de ser mejorados.

Palabras clave: aeronave; engelamiento; pronósticos; modelos numéricos.

The supply of the meteorological information to aviation is related with the flight safety. Because of international agreements, each State has assigned a Flight Information Region (FIR) for the control of the flights and its associated meteorological offices are responsible for the surveillance of its weather conditions, emitting the corresponding alert, when dangerous weather conditions are presents or it is forecast to be produced. Icing over the aircrafts surfaces and other parts of it, is one of these phenomena that affect, not only the safety, but also the flight efficiency. Several methods of icing forecast have been developed in the medium and high latitudes, but not for the tropics. In this work it is analyzed the application of those different forecast methods in tropical environment, using the prediction system developed by the Cuban Meteorological Institute, obtaining satisfactory results, with the possibility to improve it.

Key words: aircraft; icing; forecasts; numerical models.

INTRODUCCIÓN

En la atmósfera se producen procesos físicos constantemente, principalmente de cambio de estado del agua contenida en la misma. Los diferentes movimientos de las masas de aire en la horizontal y en la vertical conllevan a la absorción o liberación de energía por las moléculas de agua contenida, conocida como calor latente. El engelamiento es el fenómeno meteorológico causado por la existencia de contenido de agua en estado líquido (LWC, Liquid Water Content) en capas de la atmósfera a temperaturas inferiores a 0° C, lo que da lugar a la congelación de las gotas subfundidas al ser impactadas por objetos sólidos [1]. La formación de hielo en las aeronaves, no es más que la acumulación de hielo en las superficies de las mismas, partes móviles importantes de estas y en determinadas áreas internas de los motores [1, 2].

Cómo citar este artículo:

Juan Ayón Alfonso, Jesús Salomón Llanes y Maibys Sierra Lorenzo. Pronóstico de engelamiento de aeronaves en la región de información de vuelos de Cuba. 2022. 43(3), septiembre/diciembre. ISSN: 1815-5901.

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

Esto produce una deformación de su perfil aerodinámico, principalmente de las alas o de las hélices, daños en los álabes y compresores de los motores, y bloqueo de partes móviles exteriores diseñados para la ejecución de maniobras de las aeronaves, lo que en su conjunto pone en riesgo la seguridad del vuelo y su eficiencia, acumulándose por esta causa, una notable cantidad de incidentes y de accidentes catastróficos. En noviembre del año 2010 una aeronave de la aerolínea cubana Aerocaribbean que se encontraba volando a una altitud de 4500 metros en una condición meteorológica poco común, fue afectada por engelamiento severo con un final catastrófico en el que perecieron todos sus ocupantes, a pesar de las acciones tomadas por la tripulación.

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) [3], ha asignado, mediante acuerdos con sus Estados miembros, zonas para llevar a cabo el control del movimiento ordenado y seguro de las aeronaves que se desplazan en sus espacios aéreos denominadas Regiones de Información de Vuelos (FIR por sus siglas en inglés), y de conjunto con la Organización Meteorológica Mundial [4, 5], ambas organizaciones especializadas del sistema de Naciones Unidas, la vigilancia de las condiciones meteorológicas que pudieran afectar de diferentes formas la eficiencia o la seguridad del movimiento de dichas aeronaves. La figura 1, muestra la FIR asignada a Cuba, denominada FIR Habana, que limita al norte con las FIR de Miami y de Huston, al Nordeste con la FIR de las Bahamas, Al Este con la FIR de Haití, al Sur con las FIR de Jamaica y Barbados y al Sudeste con la FIR de Centroamérica.



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

Estas organizaciones han establecido normas y recomendaciones para la vigilancia de las condiciones meteorológicas peligrosas para la aviación y la emisión de alertas a los pilotos y controladores de tránsito aéreo sobre estas condiciones. La Comisión Latinoamericana de Aviación Civil (CLAC) igualmente ha regulado esta vigilancia, mediante el Reglamento Aeronáutico Latinoamericano (LAR) [6]. En el marco de todas estas regulaciones, Cuba ha elaborado sus Regulaciones Aeronáuticas Cubanas (RAC), siendo la Número 3, [7], relacionada con los Servicios Meteorológicos Aeronáuticos que también establece la obligatoriedad de esta vigilancia y la emisión de las alertas correspondientes.

Debido a que, en las latitudes medias, la ocurrencia de este fenómeno es mayor que en otras latitudes, se han llevado a cabo numerosas investigaciones para mejorar el pronóstico de esta condición meteorológica en dichas zonas [8-10], no ocurriendo de igual forma para las regiones tropicales. A partir del resultado de estas investigaciones, se realiza una evaluación de los métodos aplicados, así como la efectividad de dichos pronósticos en condiciones tropicales.

MATERIALES Y MÉTODOS

La aparición de gotas de agua subfundidas es un hecho bastante común en la atmósfera, llegando a encontrarse agua líquida a temperaturas de -31°C . La causa de este fenómeno se puede explicar por los desequilibrios entre la entrada de contenido de agua líquida por condensación y la velocidad de nucleación, que es un proceso mucho más lento. La presencia de ciertas partículas existentes en la atmósfera facilita la nucleación heterogénea de las gotas de agua subfundidas al ayudar a superar las fuerzas de tensión superficial, favoreciendo la formación de cristales de hielo a temperaturas por debajo de -40°C . Estas partículas, conocidas como núcleos de hielo (IN, Ice Nuclei) se caracterizan por presentar una morfología similar a la estructura de cristalización del hielo [11]. El engelamiento en las superficies de las aeronaves se produce generalmente cuando se vuela dentro de las nubes, con temperaturas por debajo de 0°C .

También se puede producir fuera de las nubes, cuando existe un alto contenido de humedad dependiendo, entre otros factores, de las características físicas y termodinámicas de la masa de aire por donde se desplaza la aeronave, de las características aerodinámicas de ésta, de su velocidad en el momento del impacto con las microgotas de agua y del tiempo de vuelo en dicha condición. Cuando una gota de agua en suspensión en la atmósfera en estado líquido y con temperatura inferior a cero grado Celsius es golpeada por un objeto, se rompe su estabilidad, la temperatura asciende a 0°C y se congela adhiriéndose a dicho objeto.

Sin embargo, a temperaturas en el entorno a los -10° C la eficiencia del proceso de nucleación es muy baja ya que la mayoría de los materiales que actúan como IN presenta dificultades para activarse a estas temperaturas. Este hecho provoca que a temperaturas superiores a -10° C predominen las gotas en estado líquido, no siendo hasta temperaturas inferiores a -15° C cuando comiencen a prevalecer los hidrometeoros en estado sólido. A esto hay que añadir que la concentración de núcleos de condensación en nubes (CCN, Cloud Condensation Nuclei) es varios órdenes de magnitud mayor que la de IN.

La intensidad del engelamiento se manifiesta en cuatro categorías:

- trazas cuando el hielo se hace perceptible, pero no es peligroso;
- ligera cuando la velocidad de acumulación puede crear problemas si el vuelo se realiza en este ambiente por más de una hora;
- moderada cuando la velocidad de acumulación es tal que, siendo los encuentros cortos se convierte potencialmente peligrosa; y
- severa cuando la velocidad de acumulación es tal, que los sistemas de deshielo o anticongelante fallan para reducir o controlar el peligro.

El comienzo de un evento de engelamiento ha sido definido por el umbral de contenido y de concentración de agua sobreenfriada en estado líquido y finaliza cuando la aeronave ha salido de dichas condiciones o ha cambiado de altitud. En las latitudes tropicales, estas condiciones se encuentran aproximadamente por encima de los 4,000 metros de altitud y se reporta poca ocurrencia por encima de los 6,000 metros de altitud, generalmente asociada a las nubes de desarrollo vertical que transporta cantidades significativas de agua a mayores altitudes.

Para un pronóstico de posible ocurrencia de engelamiento en una zona determinada de la atmósfera, se deben analizar las características térmicas y físicas que pueden determinarse mediante los valores de tres parámetros básicos:

- concentración de agua líquida w ,
- diámetro de la gota de agua d (mm); y
- temperatura T .

La concentración de agua líquida a una altitud z está dada por la ecuación (1):

$$wz = \rho z(x_c - x_z) \quad (1)$$

Donde wz es la concentración de agua-líquida (g m^{-3}) a la altitud z , ρz es la densidad del aire seco (kg m^{-3}) a la altitud z , x_c es la proporción de mezcla de saturación (g kg^{-1}) al nivel de condensación, y x_z es la proporción de mezcla de saturación (g kg^{-1}) a la altitud z . La condición necesaria para la formación de hielo sobre un objeto moviéndose a través del aire con una velocidad V , es que la velocidad vertical de la corriente ascendente w sea mayor que cero y T se encuentre por debajo del valor de congelación, en una cantidad igual o mayor que ΔT , donde ΔT es el incremento de la temperatura del aire húmedo a la velocidad V .

El valor de ΔT está influenciado por varios factores que incluye la forma y la conductividad térmica del objeto en movimiento y del valor de w , y está dado con suficiente exactitud para la mayoría de los propósitos prácticos por la ecuación (2):

$$\Delta T = 0.8 \left(\frac{V}{100} \right)^2 \frac{\gamma m}{\gamma d} \quad (2)$$

Donde γm y γd son los gradientes térmicos adiabáticos húmedos y secos respectivamente, V es en millas por hora y ΔT es en grados centígrados.

Para mejorar la precisión del pronóstico de engelamiento a nivel de la mesoescala, la comunidad científica meteorológica ha desarrollado herramientas a través de varios proyectos de investigación. Uno de ellos el Flysafe Project (Proyecto de Seguridad Operacional de los Vuelos), llevado a cabo durante 4 años, a partir del año 2006 y cuyos esfuerzos estaban dirigidos al Sistema de Vigilancia Integrado de Nueva Generación [Next Generation-Integrated Surveillance System (NG-ISS)], que se basaba en tres fuentes de datos:

- i) índice de riesgo de engelamiento, a partir de un modelo de pronóstico numérico del tiempo con una resolución de entre 0.1 y 10 km;
- ii) temperatura de la brillantez de imágenes infrarrojas de satélites meteorológicos con una resolución de 4 km; y
- iii) brillantez de las imágenes de radares meteorológicos con una resolución de 1 km.

Cada uno de estos componentes puede confirmar o invalidar la información calculada de los otros elementos, a partir de un algoritmo basado en la teoría de los topes calientes de las nubes. Primeramente se utilizaba la imagen infrarroja de satélite que muestra un alto riesgo de engelamiento severo debido a la presencia de gotas superenfriadas; posteriormente se tomaba en cuenta el índice de engelamiento, que define las áreas donde las condiciones de humedad y temperatura son favorables para su ocurrencia, de forma separada para cada nivel del modelo; y finalmente, la información del radar era utilizada para en caso de ecos débiles, determinar la presencia de gotas suspendidas en el aire.

Por otro lado, el Servicio Meteorológico de Suiza y la Fuerza Aérea de dicho país [12], llevaron a cabo investigaciones sobre este fenómeno, tomando en consideración, de forma directa o indirecta, las principales variables que contribuyen al engelamiento como la temperatura, la cantidad de agua líquida y el tamaño de las gotas de agua al considerar el total de nubes condensadas como representativo de la cantidad de agua líquida. La velocidad vertical positiva del aire fue seleccionada para sustituir el tamaño de las gotas de agua, al considerar que la misma incrementa la probabilidad de que la mayor cantidad de agua en la nube esté superenfriada y que las corrientes ascendentes del orden de decenas de centímetros por segundo favorecen la producción de grandes nubes lo cual contribuye a la intensidad del engelamiento.

Pronóstico de engelamiento

Se han desarrollado pronósticos del rango de incremento del engelamiento sobre las superficies de aeronaves, lo que contribuye a la toma de medidas por parte de la tripulación de vuelo. Lo siguiente describe los cálculos utilizados para predecir este ritmo de crecimiento: Vea ecuación (3).

$$\frac{dM}{dt} = \alpha_1 LWCvA \quad (3)$$

Dónde:

$$\alpha_1 = x - 0.028 - Z(Y - 0.0454)$$

$$X = 1.066K^{-0.00616} \exp(-1.103K^{-0.0668})$$

$$Y = 3.541K^{-0.498} \exp(-1.497K^{-0.694})$$

$$Z = 0.00637 (\varphi - 100)^{0.381}$$

$$K = \frac{\rho_w MVD^2 v}{9\mu_a D}$$

$$\Phi = \frac{Re^2}{K}$$

$$e = \frac{\rho_a MVDv}{\mu_a}$$

M = masa

α_1 = eficiencia de colisión

v = velocidad (89.4 m s⁻¹)

A = área de la sección transversal

D = diámetro (7.62 mm del cilindro)

K es el Número de Stokes

Re es el Número de Reynolds

Φ es el parámetro de Langmuir

μ_a es la viscosidad dinámica

ρ_w es la densidad del agua

ρ_a es la densidad del aire

En las investigaciones que se llevaron a cabo [13], se utilizaron los valores de 76.2 mm de diámetro del cilindro, asumiéndose un movimiento de 89.1 m s⁻¹ consistente con los valores utilizados por décadas por la comunidad de investigadores de engelamiento de las superficies de las aeronaves.

El pronóstico de engelamiento en aeronaves a muy corto plazo y su difusión como alerta temprana dirigida a los comandantes de las aeronaves y a los controladores de tránsito aéreo mediante mensaje denominado SIGMET, abarca un período de 4 horas lo cual exige que el mismo posea un alto grado de cumplimiento. La aplicación de algunos métodos de pronóstico mencionados anteriormente, poseen ciertas limitaciones de carácter temporal y espacial si no se dispone de sistemas de predicción automatizados, lo cual dificulta la inmediata emisión de la alerta necesaria sobre la ocurrencia o posible ocurrencia del fenómeno en el corto espacio de tiempo. En la actualidad, aún muchas oficinas de vigilancia meteorológica emiten alertas basadas en condiciones meteorológicas observadas o reportadas por los pilotos.

En el Instituto de Meteorología (INSMET) se ha desarrollado de forma exitosa, un sistema de predicción a corto plazo, denominado SisPI [14], que utiliza el acoplamiento de modelos de pronóstico numérico del tiempo como el Weather Research & Forecast (WRF) [15], 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 (ver figura 2).

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) [16], con un horizonte de pronóstico de hasta 72 horas y ha sido extendido a otras regiones del Caribe [17, 18] y dada las salidas operativas del mismo, varias han sido las aplicaciones a sectores específicos. Las propiedades de este modelo permiten cumplir con el objetivo de realizar un pronóstico a corto plazo sobre la posible ocurrencia de engelamiento en las aeronaves. Para ello se propone la combinación de los dominios de simulación con 9 y 3 Km de resolución espacial que permita cubrir la FIR de Cuba y a partir del pronóstico de las variables meteorológicas requeridas, genere una alerta temprana de engelamiento.

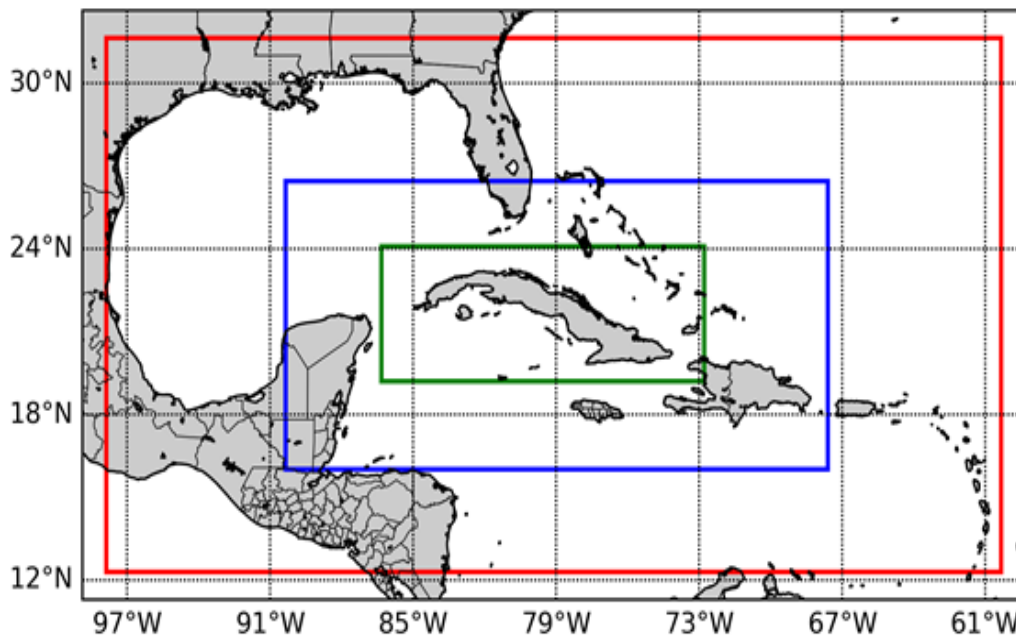


Fig. 2. Dominios de simulación del SisPI. Los cuadros rojo, azul y verde cuentan con resoluciones espaciales horizontales de 27, 9 y 3 km respectivamente. Fuente [14]

CONCLUSIONES

Tomando en cuenta las distintas variables antes mencionadas, entre ellas la temperatura, la humedad relativa, los índices de estabilidad atmosférica, la velocidad vertical de la corriente ascendente w , se realizaron varios cálculos dentro del área de interés, alcanzándose en sentido general resultados coincidentes en el rango aceptación, cuando estos se comparan con los reportes de aeronaves (AIREPs) recibidos, sobre la ocurrencia de engelamiento de diferentes intensidades, pues aunque en más de un 75% ocurrieron reportes de engelamiento con relación al pronóstico, sus intensidades eran variadas.

Los resultados obtenidos en este trabajo presentan una buena indicación de que el enfoque diseñado para este pronóstico constituye un paso de avance, al lograr pronósticos de probabilidad de ocurrencia de engelamiento en aeronaves dentro de la región de vigilancia en un breve espacio de tiempo, lo que permite emitir las alertas correspondientes, lo cual contribuye a un incremento de la seguridad operacional y una disminución importante de las afectaciones económicas a los operadores aéreos.

Sin embargo, aún queda mucho por hacer y se deberán llevar a cabo, entre otras, las siguientes actividades para mejorar dicho pronóstico:

- identificar productos observacionales que permitan contar con otras fuentes para la verificación de las condiciones de engelamiento
- evaluar la habilidad del sistema de pronóstico para identificar las situaciones típicas que producen engelamiento, y
- incorporar la asimilación de datos satelitales y radáricos

REFERENCIAS

- [1]. Thompson G, *et al.* "Intercomparison of In-Flight Icing Algorithms. Part I: WISP94 Real-Time Icing Prediction and Evaluation Program". Research Applications Program, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 1997. [Consultado el 12 de enero de 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/253920203_Intercomparison_of_In-Flight_Icing_Algorithms_Part_I_WISP94_Real-Time_Icing_Prediction_and_Evaluation_Program
- [2]. Thompson Gregory, *et al.* "Overeem KNMI Technisch rapport: A Numerical Weather Model's Ability to Predict Characteristics of Aircraft Icing Environments". Weather and Forecasting. feb 2017, vol. 32, n. 1, p. 207-221. [Consultado el 12 de enero de 2022]. Disponible en: <https://opensky.ucar.edu/islandora/object/articles:19630>
- [3]. Organización de aviación civil internacional. "Servicio Meteorológico para la Navegación Aérea Internacional". Anexo 3 al Convenio de Chicago de la OACI, Capítulo 7. 2019. [Consultado el 12 de enero de 2022]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/24024/92354/OACI-ANEXO+3-ES.pdf/234797a8-2761-42bb-ac5f-139c0eb4d4e8>
- [4]. Organización Meteorológica Mundial. "Compendium on Tropical Meteorology for Aviation Purposes". (World Meteorological Organization No. 930). 2020. [Consultado el 12 de enero de 2022]. Disponible en: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10478
- [5]. Organización Meteorológica Mundial. Technical Regulations Volume II. "Meteorological Service for International Air Navigation, Parts I and II". (World Meteorological Organization No. 49). 2020. [Consultado el 12 de enero de 2022]. Disponible en: https://library.wmo.int/?lvl=notice_display&id=21806
- [6]. Comisión Latinoamericana de Aviación Civil. "Reglamento Aeronáutico Latinoamericano LAR 2020". [Consultado el 12 de enero de 2022]. Disponible en: <https://clac-lacac.org/normativa/>
- [7]. Regulación Aeronáutica Cubana. "Servicio Meteorológico para la Navegación Aérea". 2020, (RAC) Núm. 3. [Consultado el 12 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.iacc.gob.cu/wp-content/uploads/2022/05/RAC03.pdf>
- [8]. Cory A. Wolff, *et al.* "The Forecast Icing Product: Recent Upgrades and Improvements". 1st AIAA Atmospheric and Space Environments Conference 22 - 25 June, 2009, San Antonio, Texas. [Consultado el 12 de enero de 2022]. Disponible en: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.711.7721&rep=rep1&type=pdf>
- [9]. Jing LI, Jian-ping HU. "Numerical Simulation of Three-dimensional Icing for Aircraft and Aero-engine". School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University; 2018. [Consultado el 12 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.semanticscholar.org/paper/Numerical-Simulation-of-Three-dimensional-Icing-for-Jing-Jian-ping/8cb961ffd14d4610e50af42e731d5b590ebc8e2d>
- [10]. Thompson G. "High Resolution Numerical Weather Model Forecasts of Icing at the Ground and in the Air". National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA; 2019. [Consultado el 12 de enero de 2022]. Disponible en: https://iwais2019.is/images/Papers/042_iwais_thompson.pdf
- [11]. Jerry Y. Harrington, *et al.* "Semianalytic Functions to Calculate the Deposition Coefficients for Ice Crystal Vapor Growth in Bin and Bulk Microphysical Models". Department of Meteorology and Atmospheric Science, The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania. 2021. [Consultado el 12 de enero de 2022]. Disponible en: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/78/5/JAS-D-20-0307.1.xml>

- [12]. Olofsson B, *et al.* "A new algorithm to estimate aircraft icing in the HIRLAM model". Swedish Armed Forces; Sweden Esbjörn Olsson. Swedish Meteorological and Hydrological Institute. 2003, p. 111-114. [Consultado el 12 de enero de 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/259280076_A_new_algorithm_to_estimate_aircraft_icing_in_the_HIRLAM_model
- [13]. Jason A. Milbrandt, *et al.* "A Triple-Moment Representation of Ice in the Predicted Particle Properties (P3) Microphysics Scheme". Research Division, Environment and Climate Change Canada, Dorval, Quebec, Canada. 2020. [Consultado el 12 de enero de 2022]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/346514999_A_Triple-Moment_Representation_of_Ice_in_the_Predicted_Particle_Properties_P3_Microphysics_Scheme
- [14]. Sierra Lorenzo, M, *et al.* "Sistema automático de predicción mesoescala de cuatro ciclos diarios". Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba Informe de resultado. 2015. [Consultado el 12 de enero de 2022]. Disponible en: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2888.1127>
- [15]. 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 12 de enero de 2022]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.5065/1dfh-6p97>
- [16]. 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 12 de enero 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_microfísica_y_cumulos_a_muy_alta_resolucion
- [17]. Sierra Lorenzo, M *et al.* "Verification by Multiple Methods of Precipitation Forecast from HDRFFGS and SisPI Tools during the Impact of the Tropical Storm Isaias over the Dominican Republic". Atmosphere 2022, vol. 13, n. 3, p. 495. 2022. [Consultado el 12 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4433/13/3/495>
- [18]. Sierra-Lorenzo, M, *et al.* "Assessment of Different WRF Configurations Performance for a Rain Event over Panama". Atmospheric and Climate Sciences. 2020, vol. 10, n. 3. [Consultado el 12 de enero de 2022]. Disponible en: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=100037>

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. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

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

Diseño de la investigación, recolección de datos. Participó en el análisis de los resultados, redacción del borrador del artículo la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.

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

Recolección de datos. Diseño de la investigación. Análisis de los resultados, en la revisión crítica de su contenido y en la aprobación final.