

Actualización y resultados recientes de los pronósticos biometeorológicos en Cuba

Update and recent results of biometeorological forecasts in Cuba



<https://cu-id.com/2377/v31n2e08>

✉ Luis B. Lecha Estela*, ✉ Luis M. Sánchez Suárez, ✉ Edgardo Soler Torres,
✉ Andrés Guevara Rincón, ✉ Yuslandis Verdecia Naranjo

Centro Meteorológico de la Isla de la Juventud, Instituto de Meteorología, Cuba. E-mail: luis.sanchez0868111@gmail.com, edgardsoler2@gmail.com, andresongr@gmail.com, yuslandis.verdecia@ijv.insmet.cu.

RESUMEN: Se exponen las nuevas herramientas y algoritmos desarrollados para mejorar la efectividad del servicio de pronósticos biometeorológicos, obtenidas durante los años 2018 y 2019 mediante la ejecución del proyecto “Influencia de los procesos de la circulación atmosférica en la génesis de los efectos meteoro-trópicos que ocurren en Cuba”, lo cual permitió validar en la práctica operativa del Centro Meteorológico de la Isla de la Juventud un conjunto de nuevas funciones, algoritmos y criterios de decisión, basados en las opiniones de expertos. Estas nuevas herramientas de pronóstico se utilizaron durante toda la Pandemia de Covid-19, mediante reportes sistemáticos, emitidos dos veces por semana al Consejo de Defensa Provincial de Villa Clara y al Consejo de Defensa Municipal de la Isla de la Juventud. Entre marzo de 2020 y julio de 2022 se hicieron 253 pronósticos biometeorológicos y 43 alertas por la presencia de efectos meteoro-trópicos notables, entre ellos: 2 huracanes, 2 tormentas tropicales, varias nubes de polvo del Sahara, una de ellas muy intensa en abril de 2020, con fuerte impacto sobre la salud de la población, la contaminación asociada a las emisiones a la atmósfera de los volcanes “La Soufriere” y “Cumbre Vieja”, así como por varios incendios forestales grandes. También se emitieron alertas tempranas ante varios cambios de tiempo muy contrastantes, provocados por condiciones de verano y de invierno. El contenido de los pronósticos se combinó con los estimados estadísticos semanales del comportamiento de la Pandemia para los 13 municipios de Villa Clara y la Isla de la Juventud.

Palabras clave: contenido de oxígeno del aire, Covid-19, estados de hipoxia e hiperoxia, pronósticos biometeorológicos, tiempo y salud.

ABSTRACT: The new tools and algorithms developed to improve the effectiveness of the biometeorological forecasts service are presented, obtained during the years 2018 and 2019 through the execution of the project “Influence of atmospheric circulation processes on the genesis of meteor-tropic effects that occur in Cuba”, which allowed validating in the operational practice of the Meteorological Center in the Island of Youth, a set of new functions, algorithms and decision criteria, based on expert opinions. These new forecasting tools were used during all the Covid-19 Pandemic through systematic reports, issued twice a week to the Provincial Defense Council of Villa Clara and the Municipal Defense Council of the Island of Youth. Between March 2020 and July 2022, 253 biometeorological forecasts and 43 alerts were made because the expected occurrence of notable meteor-tropic effects, including: 2 hurricanes, 2 tropical storms, several Saharan dust clouds, one of them very intense in April 2020, with a strong impact on the health of the population, the pollution associated with emissions from “La Soufriere” and “Cumbre Vieja” volcanoes, as well as several large forest fires. Early health warnings were also issued for several very contrasting weather changes, caused by summer and winter conditions. The content of the forecasts was combined with weekly statistical estimates of the behavior of the Pandemia for the 13 municipalities of Villa Clara and the Island of Youth.

Keywords: biometeorological forecasts, Covid-19, hypoxia and hyperoxia states, oxygen content in the air, weather and health.

*Autor para correspondencia: luis.lecha@gmail.com

Recibido: 12/03/2024

Aceptado: 17/04/2025

Conflicto de intereses: Los autores del artículo científico, declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores: Luis B. Lecha Estela realizó el diseño de la investigación y asesoró al equipo de trabajo durante su ejecución. También hizo la redacción preliminar del artículo. Luis M. Sánchez Suárez dirigió el proceso de actualización de los pronósticos y junto con Edgardo Soler Torres y Yuslandis Verdecia Naranjo trabajaron en el diseño y desarrollo de los nuevos algoritmos y herramientas incorporados al procedimiento de pronóstico. Andrés Guevara Rincón diseñó y programó la nueva aplicación para ofrecer los pronósticos de forma personalizada, en los sistemas de telefonía móvil.

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/)

INTRODUCCIÓN

A partir del primer congreso de Clima y Salud, celebrado en Leningrado (hoy San Petersburgo), Rusia, en 1987 y durante los años 90 del siglo XX, la comunidad científica fue tomando conciencia de que algo pasaba en el clima y se comenzó a valorar la posible ocurrencia de un cambio climático global y sus impactos potenciales sobre las actividades del hombre.

En el caso de la salud humana, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), trabajaron en el diseño y desarrollo de los primeros sistemas de alerta temprana, en función de detectar y prevenir los efectos predisponentes (directos e indirectos) del estado del tiempo, capaces de producir efectos meteoro-trópicos con impactos significativos sobre la morbilidad y mortalidad de las diferentes poblaciones del planeta (McMichael *et al.*, 1996).

Como resultado de estas acciones iniciales, se desarrollaron los primeros sistemas de alerta temprana para la salud, a partir de tres enfoques diferentes:

- a. El cálculo de los componentes del balance de calor del cuerpo humano (Aizenshtat, 1987; Jendritzky *et al.*, 1990; Höppe, 1993).
- b. La relación entre los distintos tipos de situaciones sinópticas y masas de aire sobre la salud humana (Kalkstein, 1996).
- c. El contraste en 24 horas del complejo biometeorológico, utilizando como indicador fundamental la densidad parcial del oxígeno en el aire (Ovcharova *et al.*, 1974; Ovcharova, 1981).

El primer Sistema de Avisos y Alertas para la Salud diseñado en Cuba (Lecha y Delgado, 1996), tuvo sus fundamentos científico-metodológicos en los acuerdos del Grupo de Biometeorología de la Conferencia de Directores de los Servicios Meteorológicos e Hidrometeorológicos de los antiguos países socialistas (Karpenko, 1986), así como en resultados propios obtenidos entre 1986 y 1995 (Lecha, 1996).

El sistema se programó con las herramientas y módulos de proceso de imágenes del programa cubano TeleMap GIS y se validó retrospectivamente, a partir de comparar los pronósticos con los datos diarios de las atenciones en los servicios de urgencia de los dos hospitales provinciales y los dos hospitales pediátricos de las provincias de Villa Clara y Cienfuegos, durante los años 1996-1997 (Lecha, 1995).

A fines del año 2006, se diseñó y programó el nuevo modelo numérico **PronBiomet** basado en tecnologías más actuales de computación e internet, mediante el cual fue posible ofrecer sistemáticamente el servicio de pronósticos biometeorológicos para Cuba y otras cinco regiones del mundo, desde el Centro Meteorológico Provincial de Villa Clara,

utilizando la plataforma WEB del Portal de la Ciencia de esa provincia desde diciembre de 2006 hasta enero de 2010 (Estrada *et al.*, 2007; Lecha *et al.*, 2008). Después el programa ha seguido funcionando diariamente para asegurar las actividades del monitoreo global de los efectos meteoro-trópicos. En la actualidad se dispone de una amplia base de datos e imágenes diarias que abarca casi 20 años (2006-2025), aunque con algunas interrupciones temporales.

La ejecución del proyecto “Influencia de los procesos de la circulación atmosférica en la génesis de los efectos meteoro-trópicos que ocurren en Cuba”, llevada a cabo entre los años 2018 y 2019, permitió actualizar los fundamentos y el procedimiento operativo del pronóstico basado en el modelo PronBiomet. El nuevo procedimiento estuvo listo al inicio del año 2020 y se pudo aplicar y validar en la práctica durante el enfrentamiento a la Covid-19 en la provincia de Villa Clara y en el municipio especial de la Isla de la Juventud.

A partir de la presentación de los pronósticos a los Consejos de Defensa en ambos territorios dos veces por semana, se pudo identificar y pronosticar la incidencia de diversos efectos meteoro-trópicos extremos, y fue posible desarrollar con rapidez el vínculo interdisciplinario entre los emisores de los pronósticos, las acciones y decisiones de los Consejos de Defensa y de las autoridades sanitarias locales al nivel de provincia y municipios.

Actualmente, la estrategia de salud para el enfrentamiento al cambio climático en el país, reconoce que los servicios de pronósticos biometeorológicos constituyen una importante herramienta en ese empeño y avala su generalización en Cuba. Por tanto, el objetivo principal del presente trabajo consiste en dejar constancia detallada de todos los cambios y mejoras que actualizan las versiones previas del servicio de pronósticos biometeorológicos, los cuales son el fundamento científico-metodológico de su Manual de Operaciones versión 2.0 elaborado en 2024. Este constituye un requisito esencial para generalizar estos servicios en Cuba y otros países del área, asegurando la homogeneidad de los criterios de análisis, la valoración objetiva de los peligros meteoro-trópicos y el correcto uso e interpretación de las diversas salidas de la nueva versión del modelo PronBiomet.

MATERIALES Y MÉTODOS

El procedimiento de pronóstico

El procedimiento para el pronóstico de los efectos meteoro-trópicos se basó en los mismos datos, procesos y tecnologías empleadas para el pronóstico habitual del estado del tiempo,

pero incorpora nuevos conceptos, procesos, algoritmos y métodos para conocer las peculiaridades, intensidad y duración de los efectos meteoro-trópicos capaces de actuar como un factor de riesgo o predisponente para la ocurrencia de meteoropatías masivas y diversas entre los individuos más vulnerables de una población dada.

El contenido primario del procedimiento se explica con detalles en el Manual de Operaciones de los Pronósticos Biometeorológicos para la Salud Humana, elaborado por un colectivo de autores del Centro Meteorológico de la Isla de la Juventud (CM-IJV, 2020). En términos generales, el procedimiento se estructura en cuatro operaciones básicas:

- a. La clasificación diaria de los tipos de situaciones sinópticas (TSS) que afectarán la región de pronóstico durante los próximos 5 a 7 días.
- b. El análisis y pronóstico del contraste en 24 horas del contenido de oxígeno en el aire (el índice DOA) durante los próximos 5 a 7 días.
- c. La evaluación del peligro meteoro-trópico de siete variables meteorológicas, mediante el cálculo de sus factores de impacto biotrópico (FIB).
- d. La discusión colectiva, redacción y emisión del pronóstico biometeorológico mediante las plataformas de salida disponibles.

La actualización del modelo “PronBiomet”

La densidad del oxígeno en el aire (DOA) es una variable compleja que integra en un solo valor el comportamiento de la temperatura, la humedad y la presión atmosférica. La temperatura y la humedad estimulan de manera específica el sistema termorregulador del ser humano, al tiempo que la presión atmosférica actúa también como estímulo específico sobre el sistema cardiovascular. Estas influencias se expresan mediante los cambios que experimenta el contenido de oxígeno del aire en el transcurso de su marcha diaria y también día tras día, actuando de forma directa sobre la contracción o dilatación del sistema venoso-arterial, sobre la eficiencia de los procesos de oxidación-reducción que ocurren en el cuerpo humano, así como en forma de estímulos activos del sistema nervioso central (Whelton y Carey, 2017).

Los efectos fisiológicos derivados del aumento (hiperoxia) o disminución (hipoxia) del contenido de oxígeno en el aire son diferentes y permiten establecer al personal médico los posibles impactos diferenciados de los efectos meteoro-trópicos sobre los grupos de personas vulnerables, según los factores individuales de riesgo presentes en cada individuo.

El cálculo del índice DOA en intervalos de tiempo de tres, seis, 12 y 24 horas se interpreta como una medida de la intensidad de los cambios de tiempo

a corto y muy corto plazos, porque resume en un solo número el contraste de tres elementos meteorológicos fundamentales: la temperatura y la humedad del aire, más la presión atmosférica.

Mientras más corto es el intervalo de tiempo en que ocurren los cambios contrastantes del índice DOA, más intenso puede ser el efecto meteoro-trópico resultante, porque según la vulnerabilidad de los individuos expuestos, la magnitud y rapidez del cambio puede sobrepasar su capacidad adaptación o de respuesta fisiológica. Los cambios bruscos del índice DOA cada 12 horas son apropiados para evaluar los contrastes entre el día y la noche, mientras los cambios en 24 horas (inter-diarios) se utilizan para analizar la asociación de las crisis de salud con la dinámica día tras día de los tipos de situaciones sinópticas (TSS).

Estos cálculos se realizan sobre una rejilla con resolución de 55 km, adecuada para elaborar las salidas cartográficas en forma de mapas y los meteorogramas, que son las herramientas necesarias para representar el comportamiento espacio-temporal pronosticado del índice DOA sobre la región y los lugares seleccionados previamente.

La DOA y sus cambios, como marcador biometeorológico, tiene la ventaja operativa que se puede calcular muy rápidamente con los datos habituales contenidos en las observaciones meteorológicas de la red global de intercambio de información meteorológica y, por tanto, se puede pronosticar de forma objetiva por métodos numéricos (Ovcharova *et al.*, 1974).

Debido a que la intensidad y diversidad de las crisis de salud asociadas a los efectos meteoro-trópicos depende de la capacidad de adaptación de las personas expuestas; y esta depende de los múltiples factores de riesgo y determinantes socioeconómicos individuales, las salidas del modelo PronBiomet están ajustadas a las características de la región y de la población a que van dirigidos (Tabla 1).

Por esta causa, el tamaño de la zona neutral para las variaciones en 24 horas del índice DOA cambia con la latitud geográfica y la época del año. Los restantes intervalos de la escala de clasificación se modifican consecuentemente para considerar las características de la población involucrada.

El desarrollo de la aplicación “PronBiomet_Mini”

Como parte de la perspectiva de personalizar la información de los pronósticos biometeorológicos, se diseñó y programó una aplicación informática para teléfonos celulares, la cual realiza el cálculo del contenido de oxígeno en el aire y sus diferencias cada 3, 6, 12 y 24 horas, para determinar con precisión la magnitud y duración de los efectos meteoro-trópicos esperados, según se fundamentó por Lecha (2019).

Tabla 1. Escalas de referencia para considerar la adaptación de las poblaciones, en función de la latitud geográfica y época del año.

Condición Biometeorológica	Latitud baja ($\leq 30^\circ$)	Latitud media (30.1° a 60°)	Latitud alta ($> 60^\circ$)
Hiperoxia extrema	> 10.0	> 20.0	> 30.0
Hiperoxia muy fuerte	8.1 a 10.0	16.1 a 20.0	24.1 a 30.0
Hiperoxia fuerte	6.1 a 8.0	12.1 a 16.0	18.1 a 24.0
Hiperoxia moderada	4.1 a 6.0	8.1 a 12.0	12.1 a 18.0
Hiperoxia débil	2.1 a 4.0	4.1 a 8.0	6.1 a 12.0
Zona neutral	- 2.0 a 2.0	- 4.0 a 4.0	- 6.0 a 6.0
Hipoxia débil	- 2.1 a - 4.0	- 4.1 a - 8.0	- 6.1 a - 12.0
Hipoxia moderada	- 4.1 a - 6.0	- 8.1 a - 12.0	- 12.1 a - 18.0
Hipoxia fuerte	- 6.1 a - 8.0	- 12.1 a - 16.0	- 18.1 a - 24.0
Hipoxia muy fuerte	- 8.1 a - 10.0	- 16.1 a - 20.0	- 24.1 a - 30.0
Hipoxia extrema	$< - 10.0$	$< - 20.0$	$< - 30.0$

La aplicación tiene doble propósito: una versión para teléfonos móviles con sistema operativo Androide y la otra para ordenadores de escritorio, debe ofrecer los pronósticos del índice DOA a sus usuarios, con una antelación de hasta 120 horas (cinco días) y calculados para las regiones occidental, central y oriental de Cuba.

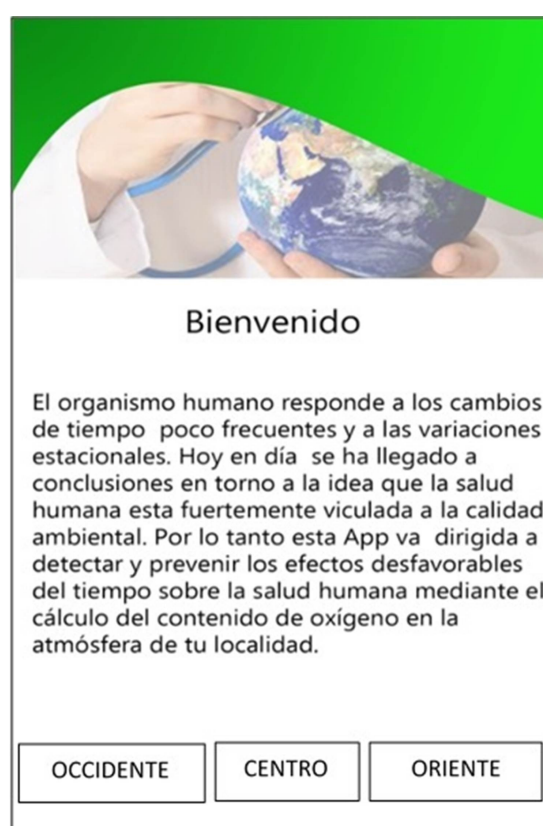
La nueva aplicación es de fácil manejo, está dirigida al público general y al personal médico que ejecuta las acciones preventivas del impacto potencial de los efectos meteoro-trópicos sobre la salud de las personas vulnerables y puede facilitar las indicaciones anticipadas del personal médico a sus pacientes para mitigar algunas de las consecuencias más negativas de la variabilidad del tiempo sobre ellos.

La aplicación es multiplataforma. Se puede usar tanto en dispositivos móviles como en computadoras y utiliza como sistema operativo en los celulares la versión de Android 4.0 o superior y en las computadoras de mesa Windows 7 o superior.

La aplicación aún está en desarrollo y se le incorporarán nuevos elementos de inicio, que se presentan cuando la aplicación se instala en el soporte informático, tales como una encuesta de los datos personales del usuario, sus factores de riesgo poco modificables, las comorbilidades presentes y el tipo de tratamiento indicado, que son datos necesarios para conocer su vulnerabilidad meteoro-trópica.

Las pantallas de presentación están divididas en varias secciones, a las cuales se accede deslizando los textos verticalmente. La pantalla inicial usa una imagen simbólica que muestra a un médico auscultando a la Tierra, incluye un breve resumen del objetivo de la aplicación y debajo aparece un botón que permite seleccionar la región de trabajo: occidente, centro y oriente (Figura 1).

En la segunda pantalla se muestra mediante símbolos el pronóstico del índice DOA, con antelación de 120 horas (Figura 2). También se muestra la leyenda, donde se explican las características


Figura 1. Pantalla inicial de la aplicación "PronBiomet" para teléfonos móviles.

de las siete clases o categorías del pronóstico, según sea el cambio esperado del contenido de oxígeno en el aire (Tabla 2).

En las pantallas siguientes la aplicación muestra el pronóstico del índice DOA para los próximos cinco días, en forma de diagrama de barras y considerando las tres regiones del país. Los valores superiores a cero indican las condiciones de hiperoxia y por debajo de cero las condiciones de hipoxia. También se presenta el pronóstico cada tres horas de la densidad parcial del oxígeno en el aire en g/m^3 (Figura 3).

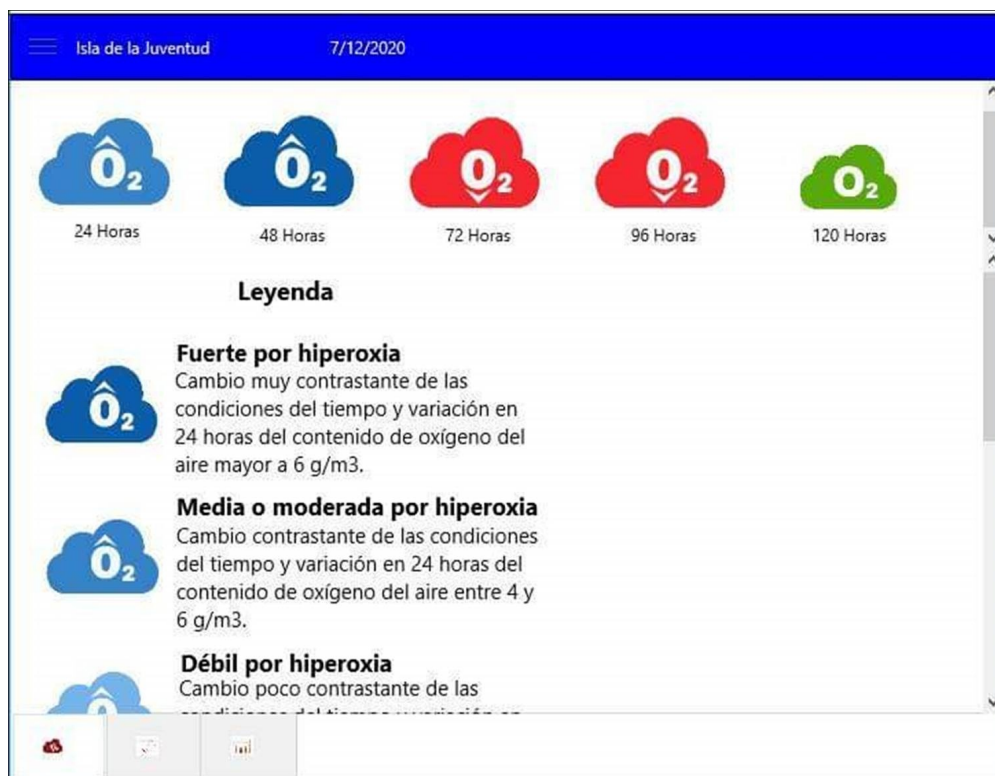


Figura 2. Símbolos del pronóstico biometeorológico hasta 120 horas.

Tabla 2. Descripción de la leyenda de las categorías del índice DOA.

Leyenda	Intensidad	Características de cada categoría
	Hipoxia fuerte	Cambio muy contrastante de las condiciones del tiempo y variación en 24 horas del contenido de oxígeno del aire inferior a -6.0 g/m^3 .
	Hipoxia moderada	Cambio contrastante de las condiciones del tiempo y variación en 24 horas del contenido de oxígeno del aire entre -4.0 y -6.0 g/m^3 .
	Hipoxia débil	Cambio poco contrastante de las condiciones del tiempo y valor del índice DOA entre -2.1 y -4.0 g/m^3 .
	Condición Neutra	Condiciones estables del tiempo y cambio en 24 horas del contenido de oxígeno en el aire entre -2.0 y 2.0 g/m^3 .
	Hiperoxia débil	Cambio poco contrastante de las condiciones del tiempo y variación en 24 horas del índice DOA entre 2 y 4 g/m^3 .
	Hiperoxia moderada	Cambio contrastante de las condiciones del tiempo y variación en 24 horas del índice DOA entre 4 y 6 g/m^3 .
	Hiperoxia fuerte	Cambio muy contrastante de las condiciones del tiempo y variación en 24 horas del índice DOA mayor a 6 g/m^3 .

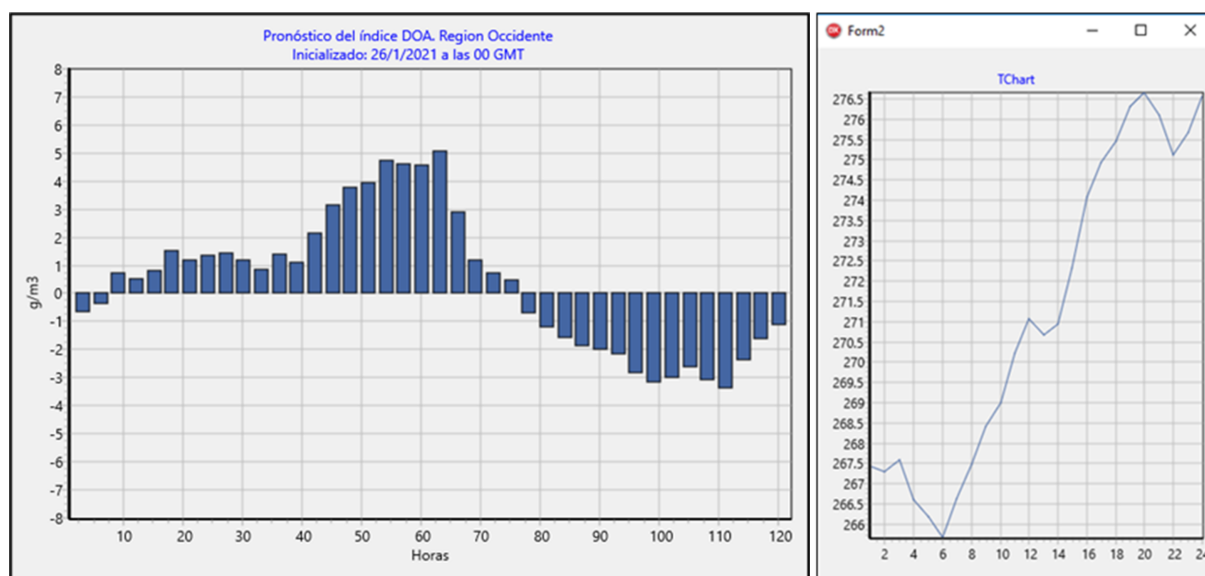


Figura 3. Salidas de la aplicación con el pronóstico del índice DOA y el contenido de oxígeno del aire para los próximos cinco días (120 horas).

En ambos casos, los valores de la escala del eje Y se ajustan automáticamente. Por último, se visualizan 3 pestañas fijas que muestran las vistas del nivel superior y al mismo tiempo facilitan tanto su exploración como el cambio entre ellas. Son pestañas fijas y están siempre visibles en la pantalla, no pueden ser desplazadas y ofrecen tres opciones:

- Información útil:** donde encontrara una información más detallada sobre el pronóstico biometeorológico.
- Créditos y Contactos:** donde podrá ver los datos del fabricante.
- Inicio:** diseñada para facilitar el regreso a la pantalla inicial, donde el usuario podrá seleccionar otra región si así lo desea.

La aplicación ha sido diseñada para facilitar el cálculo de las diferencias en 24 horas de la densidad parcial del oxígeno en el aire (el índice DOA) para las diferentes regiones del país, a partir del pronóstico objetivo de la temperatura del aire, la tensión del vapor de agua y la presión atmosférica disponible en repositorios de Internet hasta con 120 horas de antelación.

Tanto la aplicación como la versión para escritorio del programa, permiten a sus usuarios conocer las características de las marchas diaria e inter-diaria del índice DOA para los próximos cinco días, al mismo tiempo que les facilita a los médicos decidir las características y frecuencia de las acciones preventivas o terapéuticas que deben orientar a sus pacientes para mitigar el impacto de los efectos meteorotrópicos que puedan ocurrir en el plazo del pronóstico.

La estimación del peligro meteorotrópico

La ocurrencia de los efectos meteorotrópicos está asociada a las características de muy variados tipos de situaciones sinópticas influyentes sobre la región de interés. No todos los tipos y subtipos de situaciones sinópticas generan efectos meteorotrópicos, algunos TSS casi siempre los producen, otros los producen solamente en determinadas épocas del año o cuando existen condiciones meteorológicas muy específicas y de baja frecuencia.

En otros casos, es la persistencia del TSS la causa de los efectos meteorotrópicos asociados; por ejemplo: durante varios días sucesivos del verano con influencia cercana del anticiclón oceánico, que dan lugar a efectos meteorotrópicos vinculados con la incidencia de olas de calor y/o procesos de sequía; o en el invierno, el caso de los días sucesivos con influencia de anticiclones continentales en proceso de transformación, acompañados de inversiones nocturnas de la temperatura del aire, proceso que favorece los episodios persistentes de contaminación atmosférica y la formación de nieblas.

El nivel de peligro asociado a los valores del factor de impacto biotrópico se debe interpretar de la forma siguiente:

- Mayor a 0.60: extremadamente peligroso
- De 0.41 a 0.60: muy peligroso
- De 0.21 a 0.40: peligroso
- Inferior o igual a 0.20: poco peligroso

El peligro meteorotrópico referido a la influencia de cada TSS y sus subtipos se expresa objetivamente mediante el “factor de impacto biotrópico” (FIB), que está dado por un número entre 0 y 1, representativo de la probabilidad de ocurrencia de meteoropatías y/o síntomas asociados a la influencia de cada TSS (Tabla 3).

Tabla 3. Valores del FIB y resumen de los efectos meteoro-trópicos asociados a los tipos y subtipos de situaciones sinópticas.

TSS	Subtipos	FIB	Efectos meteoro-trópicos asociados
I	1	0.1213	En verano, sensaciones intensas de calor durante la persistencia de la cuña anticiclónica oceánica sobre la región de pronóstico por más de tres días, disminución de la nubosidad y aumento de las radiaciones solares incidentes.
	2	0.0929	Variación rápida del gradiente de la presión atmosférica por cambios en la estructura y posición del anticiclón oceánico.
II	3	0.0637	Formación de la zona de convergencia de las brisas con efectos diversos asociados a los procesos de mesoescala.
	4	0.0656	Sensaciones intensas de calor sofocante por el transporte de aire cálido y húmedo desde el mar Caribe.
III	5	0.0765	En verano: sensaciones diurnas intensas de calor sofocante y condiciones de hipoxia moderadas a fuertes. En invierno: produce cambios de tiempo muy contrastantes entre los TSS tropicales y extratropicales.
IV	6	0.4160	Ocurrencia de diversos fenómenos hidrometeorológicos peligrosos que pueden generar situaciones de desastre.
V	7	0.1197	Cambios bruscos de la presión en forma de “V” al paso de las ondas tropicales, aumento de la nubosidad y precipitaciones.
	8	0.1713	Cambios de tiempo contrastantes por la influencia de vaguadas en el flujo del oeste y frontogénesis.
VI	9	0.8973	Ocurrencia de diversos fenómenos hidrometeorológicos peligrosos, todos muy contrastantes y biotrópicos.
	10	s/d	Cambio brusco del estado del tiempo por advección fría y condiciones de hiperoxia
	11	0.2184	Vientos de región sur fuertes, con actividad de tormentas y precipitaciones que pueden ser localmente intensas.
	12	0.3717	Elevadas temperaturas y condiciones de hipoxia. Cambios muy contrastantes y rápidos de tiempo tropical a extratropical.
VII	13	0.1650	Cambio de tiempo contrastante de todo el complejo biometeorológico que transita de hipoxia a hiperoxia.
	14	0.6673	Reforzamiento de la influencia anticiclónica continental que produce condiciones de hiperoxia moderadas a fuertes.
	15	0.3355	Cambios de tiempo contrastantes por la cercanía de sistemas frontales con muy poco movimiento.
VIII	16	0.4687	Cambios de tiempo contrastantes por la cercanía de sistemas frontales en disipación (frontolisis).
	17	0.1758	Cambios de tiempo muy contrastantes con condiciones de hiperoxia moderadas a fuertes.
	18	0.0626	Transformación del anticiclón continental bajo condiciones de hiperoxia con ocurrencia frecuente de Brisotes Sucios.
	19	0.1181	Proceso de transformación final del anticiclón continental con sensaciones de hipoxia moderadas a fuertes.

Además de considerar el pronóstico regional anticipado del comportamiento espacio-temporal del índice DOA, se necesita evaluar el peligro meteoro-trópico sobre el área de interés, resultados paralelos del proyecto permiten ahora una adecuada actualización de esta parte del procedimiento y se dispone de la posibilidad de hacer un análisis más detallado de los peligros que pueden generar los efectos meteoro-trópicos en las distintas escalas espacio-temporales de uso habitual en la Meteorología.

El cálculo del “factor de impacto biotrópico” (FIB) de los elementos meteorológicos considerados para evaluar la ocurrencia de los efectos meteoro-trópicos también ha sido actualizado con resultados en proceso de publicación (Lecha *et al.*, 2024). El cálculo del FIB asociado a los elementos individuales del complejo biometeorológico se realiza objetivamente, mediante las funciones que aparecen en la [Tabla 4](#).

Al realizar la ponderación del peligro por elementos, el valor resultante del FIB debe quedar acotado entre 0 y 1. Durante el proceso de ajuste

pueden darse algunos valores fuera de este intervalo, los superiores a la unidad se ajustan a 1 y los negativos se hacen cero. Esto puede suceder por la presencia de máximos o mínimos notables en las series temporales más recientes.

El resultado final será el cálculo del peligro meteoro-trópico total (en porciento) esperado para cada uno de los próximos 10 días sobre la región de pronóstico el cual se obtiene mediante la suma de los peligros individuales de los elementos considerados, dividido por el peligro potencial máximo expresado en porciento, mediante la expresión:

$$Pmt = \frac{\sum_{i=0}^{i=n} P_i}{PP_{max}} * 100 \quad (1)$$

Donde: *Pmt* es el peligro meteoro-trópico total asociado a las variables meteorológicas individuales, *Pi* se refiere al *FIB* de las variables consideradas en la [Tabla 5](#) y *PPmax* es el peligro potencial máximo, equivalente al número de variables, que en este caso son 7.

Tabla 4. Ecuaciones de regresión para calcular el peligro meteoro-trópico asociado a algunos elementos individuales.

Elementos Individuales	Coef. R2	Polinomios de mejor ajuste
Presión al nivel del mar 12z	0.9820	$y = 0.0057*(P)^2 - 11.53*(P) + 5837.8$
Temperatura del aire 12z	0.9582	$y = 0.0063*(T)^2 - 0.2578*(T) + 2.5936$
Temperatura mínima diaria	0.9572	$y = 0.0004*(Tn)^3 - 0.014*(Tn)^2 + 0.133*(Tn) - 0.0392$
Tensión vapor de agua 12z	0.9464	$y = 0.025*(TVA)^2 - 0.2174*(TVA) + 0.4577$
Índice DOA calculado 12z	0.9385	$y = 0.1177*(Dif-DOA)^2 + 0.0323*(Dif-DOA) - 0.0888$
Densidad oxígeno 12z	0.9174	$y = 0.0024*(DOA)^2 - 1.335*(DOA) + 185.84$
Temperatura máxima diaria	0.9145	$y = 0.0062*(Tx)^2 - 0.3749*(Tx) + 5.635$

Tabla 5. Integración de criterios para elaborar el pronóstico hasta 5 días.

Variables	29 Ene 2021	30 Ene 2021	31 Ene 2021	01 Feb 2021	02 Feb 2021
Índice DOA	7.6	7.6	-4.9	-6.6	-5.6
Condición Biomet.	Hiperoxia fuerte	Hiperoxia fuerte	Hipoxia moderada	Hipoxia fuerte	Hipoxia moderada
Subtipo TSS	14	17	18	19	2
FIB	0.6673	0.1758	0.0626	0.1181	0.0929
Efectos MT	Reforzamiento de anticiclón continental	Cambio de tiempo por frente frío clásico e influencia anticiclón continental	Transformación del anticiclón continental	Final de la transformación del anticiclón continental	Cambio de tiempo antes de comenzar la influencia del anticiclón oceánico
Meteoropatías posibles	CAAB, HTA, EC, IRAs	CAAB, IRAs, HTA, EC	Cefaleas, ENEU, ECV, isquemias	Cefaleas, ENEU, ECV, isquemias	Cefaleas, ENEU, ECV, isquemias

CAAB: crisis agudas de asma bronquial; HTA: hipertensión arterial; IRAs: infecciones respiratorias agudas; EC: enfermedad cardiovascular; ENEU: enfermedad neurológica; ECV: enfermedad cerebro-vascular.

De esta forma el cálculo del peligro meteoro-trópico se realiza en dos partes: una, considerando la influencia de las situaciones sinópticas y la otra valorando el peligro relacionado con un grupo de variables individuales; pero en realidad existe un vínculo entre ambos peligros, lo cual plantea varias opciones operativas para facilitar la implementación práctica de los pronósticos biometeorológicos. Al respecto, los siguientes criterios de experto deben ser tenidos en cuenta:

Si la situación sinóptica influyente es extremadamente peligrosa, con valor del FIB superior a 0.60, será suficiente analizar el comportamiento del índice DOA, como variable individual adicional, para determinar si el efecto meteoro-trópico esperado será por sensaciones de hiperoxia (valor positivo del índice DOA) o de hipoxia (valor negativo del índice DOA).

Si la situación sinóptica influyente es muy peligrosa, con valor del FIB entre 0.41 y 0.60, se analizarán adicionalmente el índice DOA, la presión atmosférica medida a las 12:00 GMT

y la posible ocurrencia de fenómenos hidro-meteorológicos peligrosos de cualquier tipo. En este caso el FIB del TSS influyente se integra al cálculo del peligro meteoro-trópico total y por la posible ocurrencia de fenómenos peligrosos se agrega una variable adicional de valor unitario, por lo cual el valor de PPmax se eleva de tres a cuatro.

Si la situación sinóptica influyente es peligrosa, con valor del FIB entre 0.21 y 0.40, los pronósticos emitidos en los meses de verano deben considerar, además: los peligros individuales asociados al índice DOA, la presión atmosférica, la temperatura máxima diaria y la tensión del vapor de agua (TVA) medida a las 12:00 GMT. En este caso el FIB del TSS influyente se integra al cálculo del peligro meteorológico total y el valor de PPmax es cinco.

En la misma situación anterior, pero para los pronósticos emitidos en los meses invernales, se deben agregar los peligros individuales asociados a la presión atmosférica, el índice DOA, el contenido de oxígeno calculado a las 12:00 GMT

y la temperatura del aire a las 12:00 GMT. En este caso el FIB del TSS influyente se integra al cálculo del peligro meteorológico total y el valor de PPmax es igualmente cinco.

Cuando el tipo de situación sinóptica influyente represente un peligro menor, con FIB inferior o igual a 0.20, se considerarán adicionalmente todos los peligros asociados a las variables individuales. En este caso el FIB del TSS influyente también se integra al cálculo del peligro meteorológico total y el valor de PPmax será ocho.

Cuando el TSS influyente sobre la región de pronóstico sea el II, con FIB inferior a 0.10, en cualquier época del año, se priorizará el cálculo del peligro meteoro-trópico asociado al índice DOA, la presión atmosférica y las temperaturas máxima y mínima de cada día. En este caso el valor del FIB del TSS no se incluye en el cálculo del peligro total y el valor de PPmax es cuatro.

Si el TSS influyente es el tipo III (débil gradiente), en los meses de verano se priorizará el cálculo del peligro meteoro-trópico asociado al valor de la DOA calculado a las 12:00 GMT y el de la temperatura mínima diaria. En este caso el FIB del TSS no se incluye en la suma final y el valor de PPmax es solo dos. Adicionalmente y de forma opcional, se evaluará la posible ocurrencia de efectos meteoro-trópicos asociados a procesos de la mesoescala; y de ser posibles, se incluirá una nueva variable ficticia de valor unitario, siendo el valor de PPmax igual a tres.

Bajo el mismo TSS III influyente, pero en los meses invernales, se calculará igualmente el peligro meteoro-trópico asociado al índice DOA y al valor de la DOA medido a las 12:00 GMT. Adicionalmente se evaluará el contraste interdiario del TSS influyente, y si este resulta ser mayor a 11, tanto de ayer a hoy como de hoy a mañana, se incluirá una nueva variable ficticia adicional de valor unitario, siendo entonces el valor de PPmax igual a tres.

Durante la influencia de ciclones tropicales de intensidad inferior a la de huracán, se procederá en la forma indicada para los TSS peligrosos (epígrafe ii). Durante el impacto de huracanes de cualquier intensidad, la condición biometeorológica será extremadamente peligrosa para la salud humana y la emisión de los pronósticos biometeorológicos se subordina a los procedimientos establecidos para el manejo de estos eventos peligrosos en el país.

El peligro meteoro-trópico diario asociado al TSS I (subtipos 1 y 2) es bajo, pero la persistencia de este TSS por más de tres días en los meses del trimestre junio-agosto eleva su peligrosidad debido al aumento del estrés por calor intenso.

En este caso el valor del P_i correspondiente se eleva 10 puntos porcentuales. Si la persistencia alcanza cinco días se duplica el nivel de peligro inicial y si la persistencia fuera por una semana o más, el valor de peligro inicial correspondiente a este TSS se triplica,

siendo recomendable en estos casos agregar el cálculo del peligro meteoro-trópico asociado a la presión atmosférica medida a las 12:00 GMT y a la temperatura máxima diaria, por lo cual PPmax equivale a tres.

También el peligro asociado al subtipo 18 es bajo, pero existe una excepción para este caso, relacionada con la ocurrencia de "Brisotes sucios" en alguna parte del área de interés. En este caso es recomendable calcular el peligro meteoro-trópico asociado al comportamiento del índice DOA y de la presión atmosférica medida a las 12:00 GMT, incluyendo opcionalmente el cálculo del cambio de presión en 24 horas para varios puntos de interés, así como el valor del gradiente de presión superficial entre La Habana y las Bermudas.

Por diferentes circunstancias pueden coexistir distintos tipos de situaciones sinópticas influyendo en diferentes áreas de la misma región de interés para el pronóstico, lo cual implica que el P_i de los distintos TSS influyentes variará según corresponda en los puntos de la rejilla de cálculo numérico. Este ajuste debe hacerse diariamente mediante la regionalización operativa del campo escalar que representa el peligro meteoro-trópico asociado a los TSS, antes de correr el modelo numérico o algoritmo que se esté aplicando.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El modelo PronBiomet debe correr cada 12 horas para mantener actualizado el pronóstico del índice DOA. Las salidas son mapas y meteorogramas, con información para los próximos cinco días, de manera que se pueda apreciar la evolución esperada de las condiciones de hiperoxia e hipoxia en la región geográfica de interés, tal y como muestra la combinación de la [Figura 4](#).

Los mapas biometeorológicos incorporan el trazado de las isobaras, porque así se puede clasificar el tipo de situación sinóptica influyente, lo cual se necesita para evaluar el peligro meteoro-trópico asociado. La estimación del peligro meteoro-trópico asociado a los tipos y subtipos de situaciones sinópticas fue la primera acción de actualización realizada en el modelo original. La validación posterior realizada resultó satisfactoria y se destacan las características siguientes en algunos tipos y subtipos.

El subtipo 9 con 0.8973 resulta extremadamente peligroso y es seguido por los subtipos 14, 16 y 6, todos con FIB superior a 0.40. La influencia de los ciclones extratropicales o tropicales y los sistemas frontales, todos estrechamente conectados desde el punto de vista meteorológico, son altamente meteoro-trópicos y puede considerarse que bajo la influencia de estos TSS van a ocurrir efectos meteoro-trópicos significativos en la mayoría de los días en que estos están presentes.

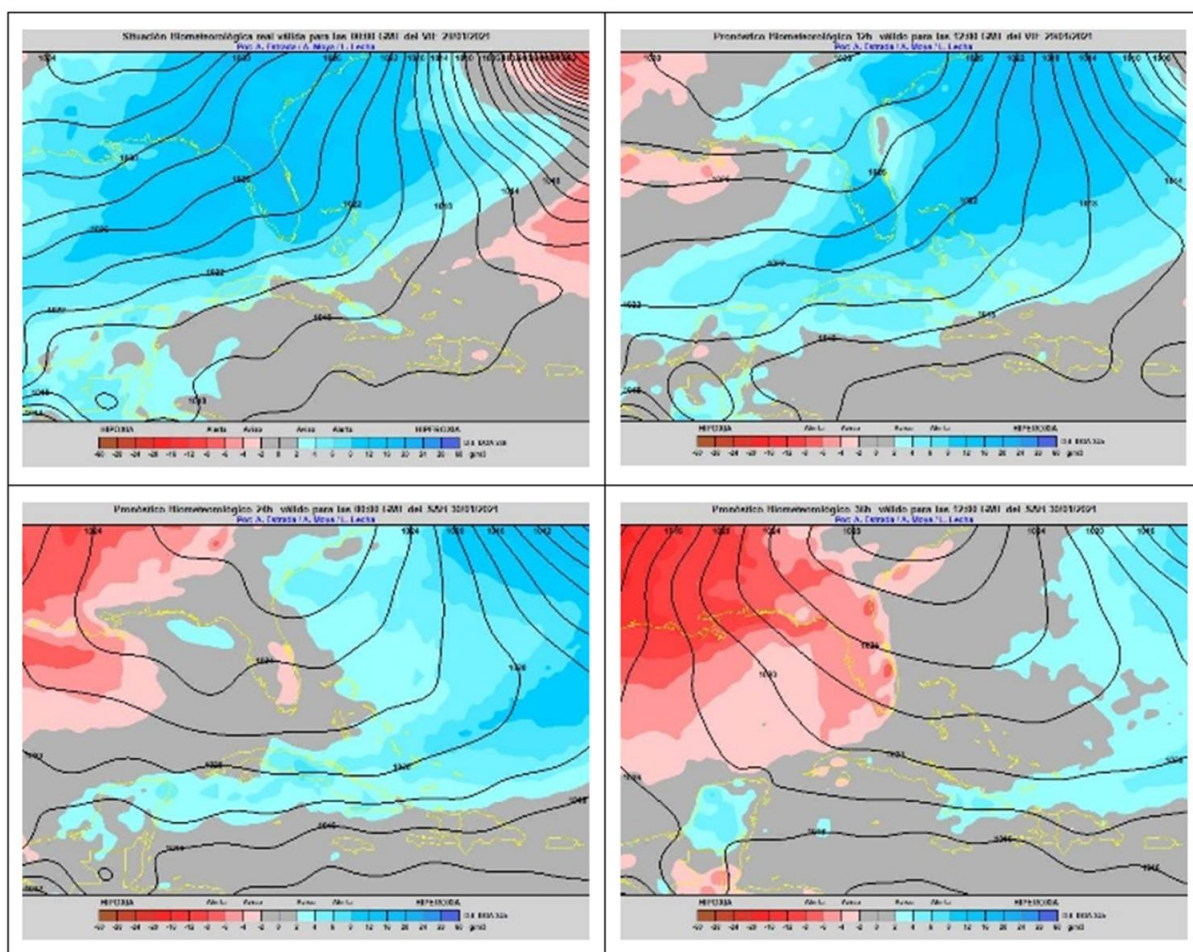


Figura 4. Pronóstico de las condiciones biometeorológicas durante el movimiento de un frente frío sobre Cuba del 29 al 30 de enero de 2021.

El caso de los ciclones tropicales es peculiar, porque siendo un TSS muy peligroso, su incidencia no genera grandes pérdidas de vidas humanas, debido a que Cuba cuenta con larga experiencia en el enfrentamiento a estos meteoros y el Sistema Nacional de la Defensa Civil implementa anticipadamente adecuadas medidas preventivas que resultan un importante factor de mitigación.

En el grupo con FIB entre 0.21 y 0.40 se ubican los subtipos 11, 12 y 15, que pueden considerarse peligrosos y también unen la influencia de los TSS VI y VII, pero combinando diferentes subtipos; y por último está el grupo con FIB inferior o igual a 0.20 que serían los menos peligrosos. La menor probabilidad de ocurrencia de efectos meteorotrópicos masivos y diversos está asociada a la influencia de los subtipos 2, 3, 4, 5 y 18; pero la probabilidad nunca llega a ser inferior a 6 %.

Hay otros efectos meteorotrópicos que no están referidos directamente al tipo de situación sinóptica influyente, son varios y ocurren asociados a las particularidades físico-geográficas regionales, de los ecosistemas y paisajes dominantes.

Estos producen muy diversas condiciones ambientales y microclimáticas en las diferentes áreas de una misma región de pronóstico, incluyendo las peculiaridades del clima urbano en las ciudades más grandes.

El actual procedimiento para el pronóstico de los efectos meteorotrópicos aplica solamente para el primer grupo. Sus salidas en forma de mapas y meteorogramas, permiten apreciar la variación espacio-temporal del índice DOA, lo cual ofrece una perspectiva muy apropiada del pronóstico de los cambios bruscos que pueda experimentar el complejo biometeorológico en la escala sinóptica, pero para lograr el mismo fin en la escala local, se utilizan los meteorogramas de puntos geográficos seleccionados (Figura 5), que ofrecen la variación de los elementos meteorológicos principales siete días antes y siete días después de la fecha de inicialización del pronóstico.

En este mismo sentido funciona la variación del índice DOA en cinco días que ofrece la aplicación PronBiomet_Mini, utilizando barras para representar la magnitud de las condiciones de hipoxia (valores positivos) o de hipoxia (valores negativos) en las tres regiones geográficas del país (Figura 6).

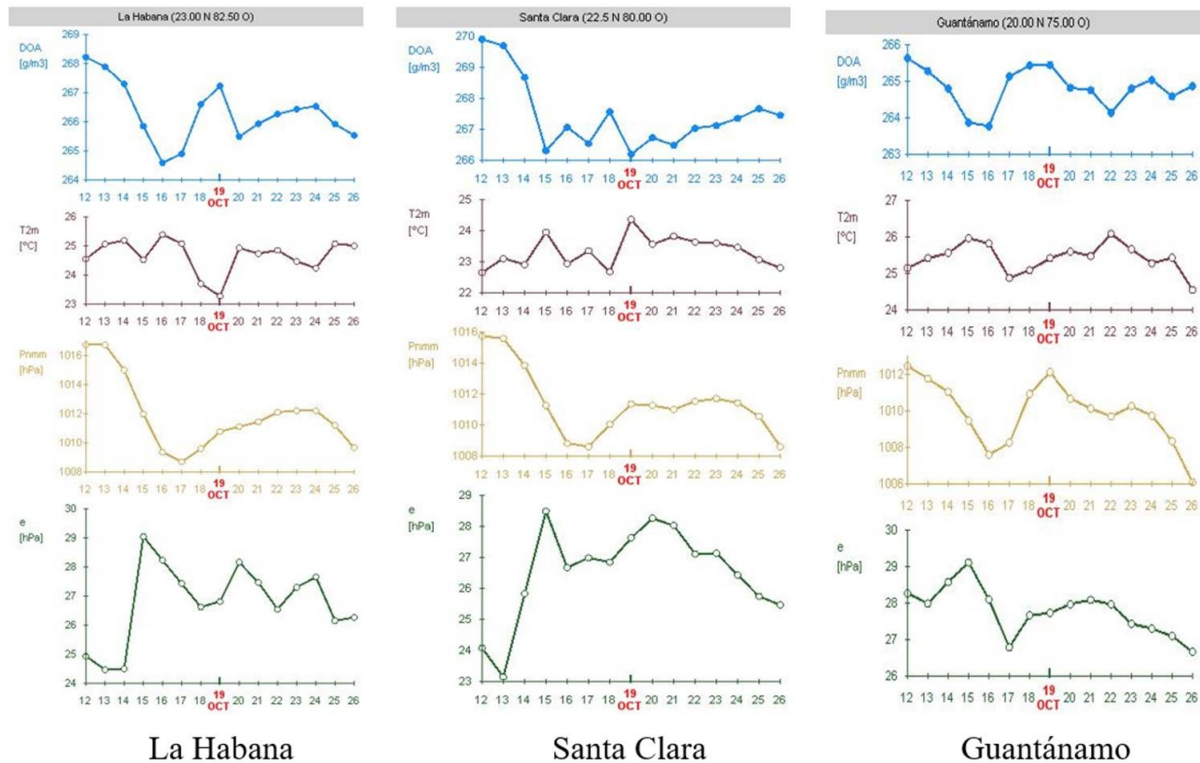


Figura 5. Meteorogramas de localidades seleccionadas



Figura 6. Ciclo del índice DOA característico de los procesos extratropicales invernales asociados a la entrada y paso de un frente frío clásico.

Actualización del cálculo del índice DOA

Hasta ese momento, el índice DOA se había calculado dos veces al día (00 y 12 GMT) solo para el intervalo de 24 horas, pero a partir del nuevo resultado, se comenzaron a calcular los cambios del contenido de oxígeno en intervalos de tres horas, logrando valorar diferentes efectos de corto plazo sobre las personas estudiadas con el MAPA.

En consecuencia, se actualizó el procedimiento operativo de elaboración de los pronósticos biometeorológicos, implementando un conjunto de herramientas para el cálculo y evaluación de la marcha diaria del índice DOA en intervalos de tiempo de tres horas, hasta las 24 horas (Figura 7).

También se incorporó la evaluación objetiva del peligro meteoro-trópico asociado a los procesos sinópticos potencialmente influyentes

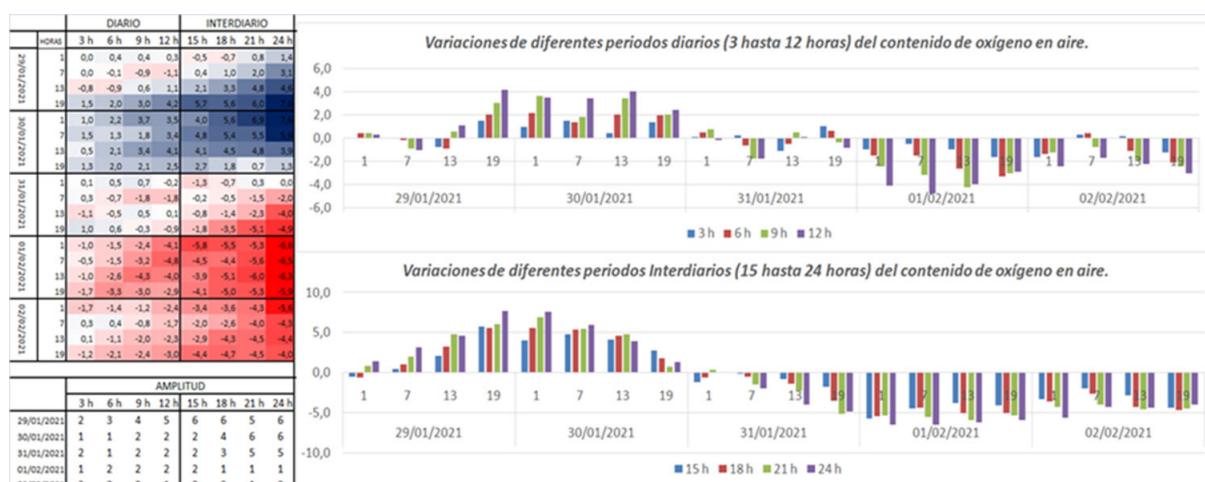


Figura 7. Representación de las salidas del índice DOA para cinco días, reflejando sus contrastes interdiarios cada tres horas.

durante cada día del período de validez del pronóstico. Los nuevos resultados se organizan en una tabla resumen que ofrece los valores del índice DOA, la condición biometeorológica esperada, el subtipo de TSS influyente, el valor del **FIB**, los efectos meteorotrópicos que deben ocurrir y las posibles meteoropatías asociadas a estos, como muestra la [Tabla 5](#).

Las acciones encaminadas a la actualización y futura implementación de los pronósticos biometeorológicos han sido novedosas y aportan herramientas importantes para el perfeccionamiento de estos servicios especializados de pronóstico del tiempo: se mejoró y amplió el procedimiento del pronóstico biometeorológico, agregando el análisis de los cambios del índice DOA cada tres horas (comparando siempre con el dato de las 12:00 GMT), para identificar de forma estandarizada la posible ocurrencia de cambios contrastantes del indicador durante diferentes etapas del día, aspecto que resulta muy importante para la contraparte médica, pues facilita hacer las asociaciones con el comportamiento de los ritmos circadianos de los pacientes.

Otra novedad es el cálculo de la amplitud entre los valores máximos y los mínimos del contenido de oxígeno en el aire para los diferentes periodos, pues se pudo comprobar que cuando estos cambios son superiores a 3 g/m³, aumentan los efectos meteorotrópicos. Varios ejemplos representativos de este hecho, y que formaron parte de la validación de estos nuevos algoritmos, ocurrieron durante el primer trimestre del año 2022. Una muestra se ofrece en la [Figura 8](#), donde se aprecia el aumento de la mortalidad diaria en la Isla de la Juventud durante los días en que tienen lugar grandes diferencias a corto plazo entre el máximo diario por hipoxia y el mínimo siguiente por hipoxia, como sucede después del 8 de enero, después del 30 de enero (cuando ocurre el máximo de mortalidad diaria en el municipio con 14 fallecidos), el 15 de febrero y el 3 de marzo.

Las comprobaciones realizadas durante todo el proceso de actualización del procedimiento de los pronósticos muestran una diversidad de asociaciones directas e indirectas entre el comportamiento de la salud humana y la acción predisponente de los efectos meteorotrópicos influyentes.

El impacto, a corto y muy corto plazos, de los cambios bruscos del contenido de oxígeno del aire sobre los enfermos graves y críticos ingresados en salas de terapia intensiva, en otros centros de salud o con estancia domiciliaria es muy relevante, y los resultados de la validación permitieron hacer un resumen final de los impactos relacionados con la presencia de las condiciones de hipoxia e hiperoxia, respectivamente.

El impacto de la fase de hipoxia se caracteriza por el descenso de la presión y/o el aumento de la temperatura del aire, por lo que puede ser una hipoxia bórica, térmica o combinada. Por su parte, de forma análoga pero inversa, la fase de hiperoxia se caracteriza por el aumento de la presión y/o el descenso de la temperatura del aire, por lo que también puede ser una hiperoxia bórica, térmica o combinada.

Durante el impacto de las condiciones de hipoxia se identificaron dos condiciones biometeorológicas muy peligrosas para salud humana: la primera es invernal y ocurre al final de la transformación de los anticiclones continentales (subtipo 19), después de registrado un evento de frío intenso y antes de integrarse al anticiclón oceánico. La segunda condición es de verano y se relaciona con la marcada influencia anticiclónica oceánica, bajo condiciones de buen tiempo, escasa nubosidad, sin precipitaciones, intensa radiación solar y vientos débiles durante tres días o más, condición que tipifica una ola de calor clásica, como sucedió en el verano de 2017 ([Lecha y Torres, 2024](#)).

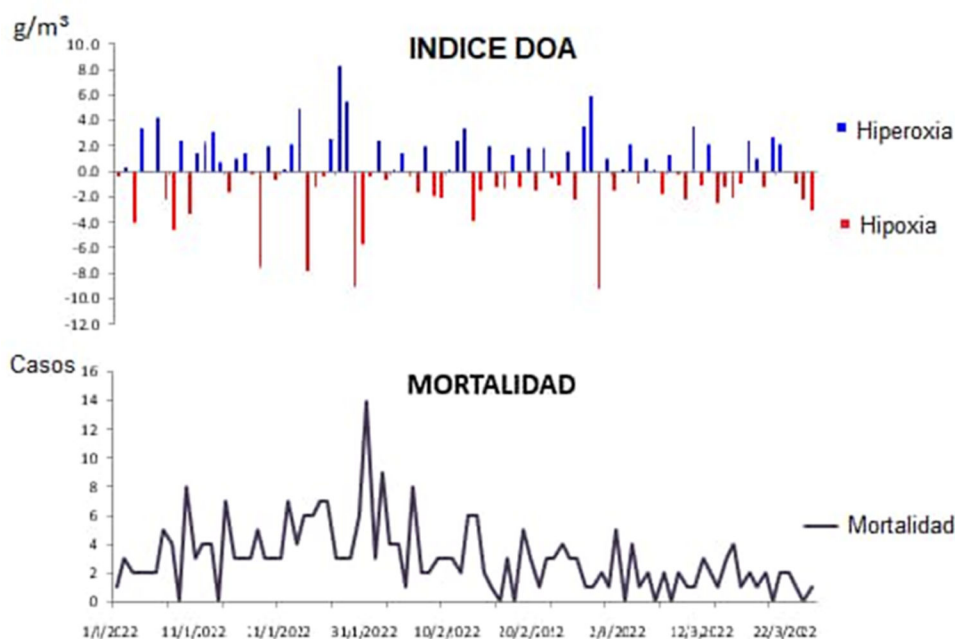


Figura 8. Relación entre los cambios del contenido de oxígeno y la mortalidad diaria en la Isla de la Juventud en el primer trimestre de 2022.

Los efectos meteoro-trópicos asociados a las condiciones de hipoxia producen como reacción fisiológica directa la vasodilatación de todo el sistema venoso-arterial, la disminución del tono cardiovascular, el estímulo del sistema termorregulador y la excitación de todo el tracto respiratorio superior por el calor, y las principales meteoropatías que se observan están asociadas a las enfermedades cerebrovasculares y neurológicas, especialmente de tipo isquémico, el asma bronquial, algunos tipos de infecciones respiratorias agudas cuya transmisión es por vectores como el mosquito, las cefaleas y migrañas; aunque pueden ocurrir otras meteoropatías que se reportan en la literatura especializada, pero que no han sido aún reconocidas en estudios cubanos.

Los efectos meteoro-trópicos asociados a las condiciones de hiperoxia producen como reacción fisiológica directa la vasoconstricción de todo el sistema venoso-arterial, el aumento del tono cardiovascular, el estímulo del sistema termorregulador y la excitación de todo el tracto respiratorio superior por el frío, estando las principales crisis de salud, asociadas a las enfermedades cardiovasculares, la hipertensión arterial, el asma bronquial, las infecciones respiratorias agudas y los accidentes cerebrovasculares de tipo trombótico, aunque pueden ocurrir muchos otras respuestas meteoro-patológicas que se reportan en la literatura especializada, pero que no han sido aún reconocidas en estudios cubanos.

Los principales impactos de las condiciones de hiperoxia sobre la mortalidad en exceso en Cuba se han reportado durante las invasiones de masas de aire polar, coincidiendo con rupturas del Vórtice Polar Ártico. Estos eventos de frío extremo son relativamente recientes en la región, siendo el siglo XXI testigo de una serie de eventos de frío intenso en Norteamérica, que han provocado también impactos notables en Cuba, tanto por el aumento de la morbilidad y mortalidad asociadas a varias meteoropatías, como por los daños a la infraestructura y a la economía de la zona costera del occidente del país, debido a los fenómenos de tiempo severo y penetraciones del mar que suelen acompañarlos.

El asma bronquial y algunos tipos de infecciones respiratorias agudas (IRAs) son enfermedades muy meteoro-trópicas y pueden ocurrir aumentos diarios de su incidencia durante los efectos meteoro-trópicos provocados por cualquiera de las dos fases de hiperoxia o de hipoxia.

Los pronósticos biometeorológicos durante la Covid-19

Los primeros casos de la Covid-19 se detectan en Cuba el 11 de marzo de 2020 y 10 días después, la dirección del país decide activar los Consejos de Defensa Provinciales (CDP).

El 24 de marzo la presidenta del CDP de Villa Clara activa el funcionamiento del Subgrupo de Ciencias, conformando un equipo interdisciplinario de investigadores con la misión de pronosticar el comportamiento semanal de la epidemia

de Covid-19 en la provincia y sus 13 municipios, para organizar su adecuado manejo y control epidemiológico, teniendo en cuenta todos los posibles factores que contribuyeran a su propagación, incluyendo las condiciones biometeorológicas. Varias semanas después se agregó una misión similar para contribuir, de la misma forma, al enfrentamiento de la epidemia de Covid-19 en el municipio especial de la Isla de la Juventud.

Los pronósticos se realizaron dos veces por semana durante todo el período de influencia de la pandemia, desde finales de marzo de 2020 hasta mayo de 2022 y su contenido tenía dos componentes fundamentales: la aplicación y análisis de tres modelos de dinámica de poblaciones (logístico, Richards y Gompertz) y el uso de los pronósticos biometeorológicos, como herramienta que permitió identificar y considerar la posible influencia de los efectos meteoro-tropicos.

Durante los años 2020 y 2021 se emitieron 82 informes para el CDP de la provincia de Villa Clara y 25 informes para el Consejo de Defensa Municipal (CDM) de la Isla de la Juventud; se presentaron 30 reportes públicos por el canal de la televisión provincial TeleCubanacán; se prepararon 53 pronósticos extraordinarios a solicitud de las autoridades provinciales o del Grupo de Trabajo Nacional y se emitieron 18 alertas tempranas, motivadas por efectos meteoro-tropicos diversos, algunos de los cuales se describen brevemente a continuación.

Efectos meteoro-tropicos durante la Covid-19

La fase inicial de la Covid-19 en Villa Clara coincidió con varios máximos diarios de incidencia de infecciones respiratorias agudas (IRAs), debidos a la gripe estacional y el dengue (Figura 9).

El primero, ocurre los días 23 y 24 de marzo con más de 500 casos (pico 1) por la influencia de un anticiclón continental migratorio en proceso de transformación; y el segundo sucede entre el 31 de marzo y el 2 de abril (pico 2), por la entrada de un frente frío. Esto creó confusión y elevado riesgo de contagio en los servicios de urgencia y centros de salud, poniendo en evidencia la necesidad de incorporar los pronósticos biometeorológicos a las actividades del Grupo Temporal recién creado en la provincia.

Los pronósticos permitieron conocer y diferenciar la génesis de los máximos diarios de las IRA, dando la posibilidad al CDP de valorar la necesidad de aislar los casos de IRA, aparte de las personas con Covid-19, garantizando así la seguridad del personal sanitario que trabajaba en urgencias. Poco después se pronostican nuevos efectos meteoro-tropicos, asociados a la temprana presencia de una intensa nube de polvo del Sahara, que afecta la región a mediados de abril de 2020 (Figura 10).

El polvo y los incendios forestales contribuyeron también al aumento de las infecciones respiratorias y reacciones alérgicas diversas entre las personas vulnerables, por lo cual el aumento de estos síntomas respiratorios no debidos a la Pandemia, pudieron ser diferenciados por el sistema de urgencias médicas, separando a estos pacientes de los confirmados con Covid-19, hasta tanto se les hicieran a las pruebas de validación mediante test rápidos o PCR.

Durante la Pandemia hubo influencia de varios ciclones tropicales. En todos los casos, al activarse los protocolos establecidos para la evacuación y traslado de grandes grupos de personas, fue necesario adoptar medidas especiales adicionales para crear las condiciones necesarias que no facilitaran la transmisión del virus.

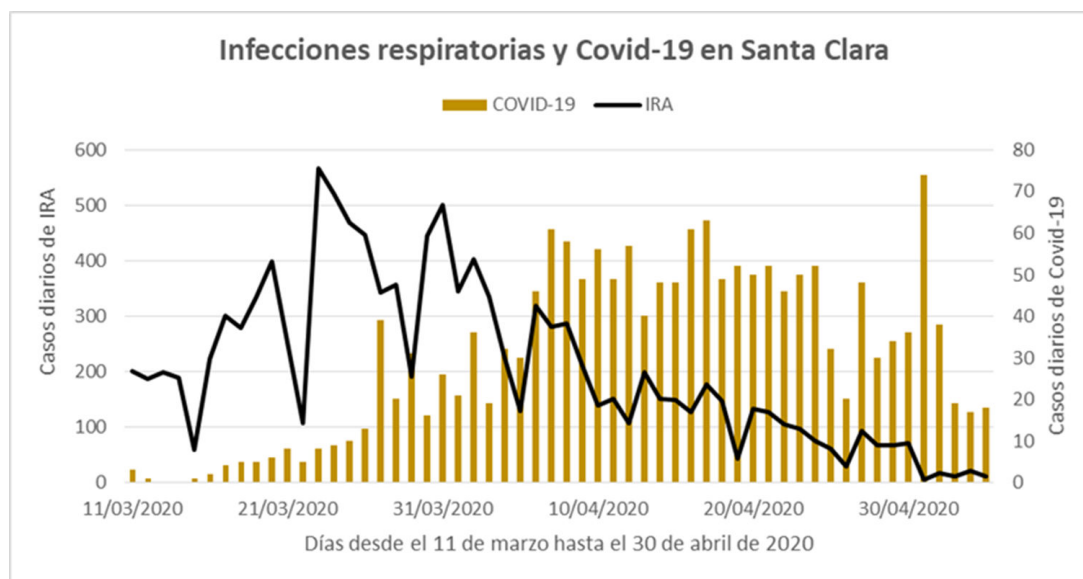
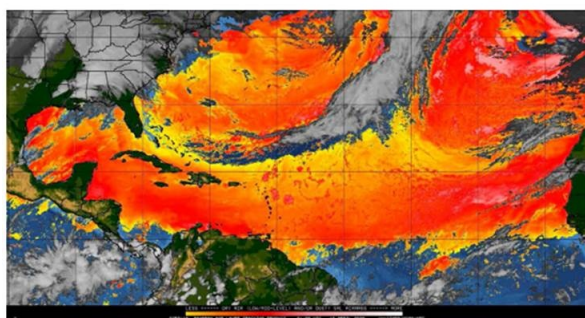


Figura 9. Presencia simultánea de casos de gripe, dengue y Covid-19.



(A)



(B)

Figura 10. Intensa nube de polvo del Sahara el 12 de abril de 2020: (A) Imagen del satélite GOES-16 y (B) Foto del estado diurno del cielo en Santa Clara.

Otras dos situaciones de interés se produjeron por el transporte a larga distancia de las emisiones procedentes de las erupciones de los volcanes “La Soufriere” en la isla de Martinica, en las Antillas Menores y el Cumbre Vieja en Islas Canarias. Las concentraciones atmosféricas de varios elementos aumentaron por encima de lo normal y llegaron hasta Cuba, contribuyendo a estimular la incidencia de algunas meteoropatías alérgicas y respiratorias.

En total, fueron 53 los días con efectos meteoro-tropicales directos e indirectos detectados y pronosticados anticipadamente durante el impacto de la Covid-19 en la región central de Cuba y en el municipio especial de la Isla de la Juventud. Todos, en mayor o menor medida, generaron condiciones predisponentes para la ocurrencia de mayor estrés operativo durante su manejo sanitario, así como la ocurrencia de numerosas meteoropatías entre la población, causantes de la afluencia adicional de personas a los servicios de urgencia médica y de las evacuaciones masivas que fue necesario realizar en el caso de los ciclones tropicales reportados en el período.

Uno de los impactos más importantes del servicio de pronósticos biometeorológicos, se logró al informar directamente al personal médico del hospital militar “Manuel Fajardo” de Santa Clara, el pronóstico de las variaciones del contenido de oxígeno del aire, especialmente la ocurrencia de las condiciones de hipoxia, lo cual facilitó el mejor manejo de los pacientes graves y críticos ingresados en terapia intensiva. Varios de los médicos del área de terapia intensiva instalaron en sus celulares la aplicación “Oxyalert-Beta” durante la etapa más crítica de la epidemia en el verano de 2021 para recibir el pronóstico individual del contenido de oxígeno en el aire y sus cambios hasta 3 días.

CONCLUSIONES

La implementación operativa de los pronósticos biometeorológicos durante el enfrentamiento de la epidemia de la Covid-19 en la provincia de Villa Clara y en el municipio especial de la Isla de la Juventud,

contribuyó de manera efectiva y sistemática al manejo y control de la epidemia, al mismo tiempo que se actualizó y validó en la práctica el procedimiento para la elaboración y emisión de estos pronósticos, quedando listo para su aplicación en todo el país.

El aumento de la frecuencia anual e intensidad de los efectos meteoro-tropicales extremos que afectan a Cuba y zonas aledañas, especialmente los ciclones tropicales, los eventos de frío y calor muy intensos, así como los episodios de contaminación atmosférica, ofrecen una mirada preocupante al futuro del clima en la región.

El constante desarrollo de nuevas técnicas y procedimientos basados en la aplicación masiva de las tecnologías informáticas y de comunicaciones en los servicios meteorológicos, han contribuido decisivamente al diseño y empleo de los actuales modelos de pronósticos biometeorológicos, contribuyen a reforzar la vigilancia sanitaria regional y local, disminuyen el impacto de los fenómenos meteorológicos peligrosos y permiten identificar y avisar con antelación suficiente la presencia de los efectos meteoro-tropicales extremos capaces de afectar la salud de los grupos de personas en situación de vulnerabilidad.

RECOMENDACIONES

Es imperativo seguir investigando la génesis y características de los efectos meteoro-tropicales extremos que afectan a la población cubana, así como su posible relación con el cambio climático, en función de preparar a la sociedad para enfrentar estos desafíos. La mitigación de estos efectos y la adaptación de la población local, serán claves para manejar los impactos de la variabilidad climática y de los cambios bruscos del estado del tiempo sobre el país.

La divulgación adecuada sobre estos temas y el desarrollo de una adecuada percepción del riesgo meteoro-tropical, contribuirán a la toma de decisiones oportunas y efectivas para salvaguardar el bienestar futuro de la sociedad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a Carlos Rodríguez, Ana Delia Hernández Leiva, Anny Sosa Leyet y Emma Díaz Sánchez por su colaboración y dedicación durante los trabajos de programación y proceso de la base de datos utilizada en la investigación.

REFERENCIAS

- Aizenshtat, B.A. (1987). La salud y el balance de calor del cuerpo humano. En: Resúmenes del simposio "Clima y salud", WCASP-1, WMO, Ginebra: 170-181.
- CM-IJV (2020). Manual de Operaciones de los Pronósticos Biometeorológicos para la Salud Humana. Nueva Gerona; 44 p. (Inédito).
- Estrada, A., Moya, A., Lecha, L. y Ciómina, E. (2007). Los pronósticos biometeorológicos: una vía para reducir las crisis de salud en la población cubana. En: Memorias del IV Congreso Cubano Meteorología, La Habana, diciembre: 4-8.
- Höppe P. (1993): Heat balance modeling. *Experientia*, 49(9): 741-746.
- Jendritzky G., Menz G., Schirmer, H. y Schmidt-Kessen, W. (1990): Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioclima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). Beiträge d. Akad. F. Raumforschung und Landesplanung, 114, Hannover.
- Kalkstein, L.S. (1996). A new spatial synoptic classification: application to air mass analysis. *Int. Journal of Climatology*, 16(8): 1-22.
- Karpenko, V.N. (1986). Líneas de trabajo científico en el campo de la biometeorología que se ejecutan en el conjunto de los países socialistas. Aspectos Bioclimáticos [en ruso]. En: Materiales de las investigaciones meteorológicas, 11. Comité Geofísico de la URSS, Inst. Geog. AC de la URSS e Inst. de Climatoterapia y Fisioterapia (Ed.), Moscú: 33-35. ISSN 0206-6564.
- Lecha, L. (1995). Una aproximación al pronóstico de algunas enfermedades del hombre a partir de predictores meteorológicos. *Medicentro*, 11(2): 16-24.
- Lecha, L. (1996). Efectos del clima y el tiempo sobre la salud humana en Cuba. Informe final del proyecto 408508, INSMET, La Habana; 126 p. (Inédito).
- Lecha, L. y Delgado, T. (1996). On a regional health watch & warning system. En: Proceeding of 14th Int. Congress of Biometeorology, Ljubljana, Slovenia, Sept. 1-8, Vol. 3: 94-107.
- Lecha, L., Estrada, A., Moya, A., Ciómina, E. y Gómez, E.C. (2008). Pronósticos biometeorológicos: una vía para reducir las crisis de salud. El caso de Sagua la Grande. *Rev. Cub. Salud Pública*, 34(1): 14-21.
- Lecha, L. (2019). Pronósticos Biometeorológicos [eBook]. Ed. Citmatel, La Habana; 240 p. ISBN 978-959-237-752-3.
- Lecha, L., Monteagudo, L. y Sauchay, L. (2024). Evaluación del riesgo meteoro-trópico en una muestra de adultos cubanos hipertensos de ambos sexos. *Rev. Cub. Meteorología*, 31(3). En: <https://www.researchgate.net/publication/381843698>
- Lecha, L. y Torres, S. (2024). Características e impacto de la ola de calor del verano de 2017 en Cuba. *Rev. Cub. Meteorología*, 31(X); en prensa. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/381313582>
- McMichael, A.J., Haines, A. y Sloof, R. ed. (1996). Climate Change and Human Health. WMO/WHO/UNEP, Ginebra; 297 p.
- Ovcharova V.F. (1974). La evaluación biometeorológica del medio circundante y los pronósticos médico-meteorológicos [en ruso]. En: Materiales de la conferencia "El clima, las ciudades y el hombre". Ed. VM Zhukov, Moscú: 65-68.
- Ovcharova, V.F., Butieva I.V., Shveinova T.G., Ilicheba E.M. y Alioshina T.P. (1974). Pronósticos del tiempo especializados con fines médicos para la prevención de las reacciones meteoropatológicas [en ruso]. *Climatoterapia, fisioterapia y cultura física*, 2: 36-45.
- Ovcharova, V.F. (1981). Cálculo del contenido de oxígeno en el aire sobre la base de parámetros meteorológicos (presión, temperatura y humedad) para el pronóstico de los efectos de las condiciones de hipoxia [en ruso]. *Prob. Climatoterapia, fisioterapia y rehabilitación*, 2: 29-34.
- Whelton, P.K. y Carey, R.M. (2017). Guideline for the prevention, detection, evaluation and management of high blood pressure in adults. *High Blood Pressure Clinical Practice Guideline*, 481 p. <https://doi.org/10.1161/HYP065/-/DC1>