Artículo original

Sistema de alerta bioclimática para la prevención del dengue: SAT-DENCLIM

Bioclimatic Alert System for dengue Prevention: SAT-DENCLIM

Yazenia Linares Vega[1*] https://orcid.org/0000-0003-2980-5120
Idalmis Yamila Villalobos González[2] https://orcid.org/0009-0009-5502-3019
Ramón Amor Valdés[2] https://orcid.org/0009-0004-4649-0460
Beatriz Velazquez Zaldívar[3] https://orcid.org/0000-0002-0464-7632
Daylin Pérez Casañas[1] https://orcid.org/0009-0000-0401-5080
Alejando Felipe Veranes Miranda[4] https://orcid.org/0000-0003-0271-5694
Madelaine Rivera Sanchez[5] https://orcid.org/0000-0003-2227-6764
Paulo Lázaro Ortiz Bultó[3] https://orcid.org/0000-0001-9449-3114

[1]Instituto de Meteorología, Centro Meteorológico Provincial La Habana-Artemisa-Mayabeque. La Habana, Cuba.
[2]Ministerio de Salud Pública, Dirección de Salud Municipal Habana Vieja. La Habana, Cuba.
[3]Instituto de Meteorología, Centro del Clima. La Habana, Cuba.
[4]Universidad de La Habana, Facultad de Geografía. La Habana, Cuba.
[5]Ministerio de Salud Pública, Dirección Nacional de Vigilancia y Lucha Anti-vectorial. La Habana, Cuba.

*Autores para la correspondencia: lyazenia@gmail.com

RESUMEN

Introducción: El incremento de la variabilidad climática y su impacto en las enfermedades transmitidas por vectores demanda herramientas innovadoras para anticipar y gestionar riesgos desde un enfoque preventivo.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

Objetivo: Mostrar el diseño e implementación del Sistema de Alerta Bioclimática para Dengue con el fin de analizar su replicabilidad como medida de adaptación al cambio climático.

Métodos: Se realizó un estudio prospectivo analítico del Sistema de Alerta Bioclimática para Dengue, implementado en una comunidad cubana. Se empleó la metodología Ortiz Bultó, que establece un marco híbrido y flexible para la integración de datos mensuales (climáticos, epidemiológicos y socioambientales). Se aplicaron modelos espaciales autorregresivos mixtos para pronosticar la circulación del virus del dengue desde la predicción climática. Se utilizó la metodología de educación popular para implementar estrategias participativas. La evaluación se realizó mediante entrevistas y encuestas por etapas.

Resultados: Se generaron mapas pronósticos del vector y del virus que permiten establecer umbrales de riesgo. Se evidenció la adherencia de la comunidad a las medidas preventivas y una reducción de casos de dengue en el período de implementación.

Conclusiones: El Sistema de Alerta Bioclimática para Dengue constituye una medida de adaptación a la variabilidad y el cambio climático con un esquema flexible, que combina rigor técnico y participación comunitaria, y que es replicable con apoyo institucional, financiamiento sostenido y fortalecimiento de capacidades.

Palabras clave: dengue; alerta temprana; participación comunitaria; metodología Ortiz Bultó.

ABSTRACT

Introduction: The increase in climate variability and its impact on vector-borne diseases demand innovative tools to anticipate and manage risks through a preventive approach.

Objective: To present the design and implementation of the Bioclimatic Early Warning System for Dengue (EWS-DENCLIM) and analyze its replicability as a measure of adaptation to climate change.

Methods: A prospective-analytical study of the EWS-DENCLIM implemented in a Cuban community. Ortiz Bulto methodology was applied, providing a hybrid and

..Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

flexible framework for integrating monthly climatic, epidemiological, and socio-environmental data, along with homogenization, modeling, and spatial analysis procedures supported by GIS. Mixed spatial autoregressive models were used to forecast Aedes aegypti and dengue virus circulation based on climate predictions. The methodology of popular education was employed to implement participatory strategies. Evaluation of the system by the population was conducted through staged interviews and surveys.

Results: forecast maps of the vector and virus were generated, enabling the establishment of risk thresholds to target interventions and optimize resources through differentiated alert levels. Community adherence to preventive measures and a reduction in dengue cases were observed during the implementation period.

Conclusions: EWS-DENCLIM represents an effective adaptation measure to climate variability and change, offering a flexible framework that combines technical rigor with community participation. The system is replicable, provided there is institutional support, sustained funding, and strengthened technical and community capacities.

Keywords: dengue; early warning; community participation; Ortiz Bulto methodology

Recibido: 14/10/2025

Aceptado: 20/06/2026

Introducción

El dengue es actualmente la arbovirosis de mayor impacto en salud pública, con más de 13 millones de casos en las Américas durante 2024.[1] En América Latina y el Caribe, el dengue se caracteriza por epidemias recurrentes y la expansión hacia áreas previamente no endémicas.[2,3]

La transmisión del dengue presenta una estrecha relación con la variabilidad climática y con determinantes socioambientales que favorecen la proliferación de *Aedes aegypti,* principal transmisor del virus dengue. La temperatura, las

..Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

precipitaciones y la humedad relativa influyen en la dinámica de transmisión, aunque con variaciones locales.[2,3,4,5] El aumento de la temperatura acelera la incubación viral e incrementa la reproducción y actividad de picadura del mosquito; mientras que las precipitaciones y la humedad relativa favorecen la disponibilidad de hábitats para la oviposición y la disponibilidad de criaderos en entornos urbanos.[6,7] En contraste, el almacenamiento inadecuado de agua durante las sequías favorece la disponibilidad de criaderos.[8,9]

Evidencias recientes indican que el cambio climático expandirá el rango geográfico del *Aedes aegypti* e intensificará los brotes, especialmente en áreas urbanas de América Latina.[3,4,8,10] A escala interanual, varios países de Latinoamérica y el Caribe han descrito ciclos sincrónicos asociados con fenómenos de teleconexión como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), que modifica los patrones regionales de temperatura y precipitación.[11,12]

Cuba, por su ubicación tropical, presenta condiciones favorables para la proliferación del vector durante todo el año. Variables como la temperatura, las precipitaciones, la humedad relativa y eventos ENOS, en interacción con factores ecológicos y socioambientales condicionan la dinámica vectorial y el riesgo de transmisión.[5,13]

En este contexto, el sector de la salud requiere de herramientas que integren información climática, epidemiológica y socioambiental para anticipar escenarios de riesgo. Los sistemas de alerta temprana bioclimáticos permiten orientar intervenciones preventivas, optimizar recursos y fortalecer la resiliencia comunitaria.[14,15] Experiencias en Brasil, México y Barbados respaldan este enfoque de integrar predicciones climáticas para el control del dengue y otras arbovirosis.[6,16] La Organización Mundial de la Salud (OMS) los reconoce como un componente esencial de la adaptación del sector de la salud al cambio climático.[17]

En Cuba, el dengue constituye la arbovirosis de mayor importancia sanitaria por su elevada capacidad de transmisión, recurrencia epidémica y amplia distribución geográfica. Como respuesta, se han desarrollado sistemas de alerta temprana sustentados en la colaboración entre el Ministerio de Salud Pública y el Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, iniciativa pionera en la región de las

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

Américas.[18] Entre ellos, destaca el SAT-BioClim, basado en modelos espacio-temporales de alta capacidad predictiva; sin embargo, su alcance nacional limita la incorporación de particularidades locales relacionadas con la dinámica del vector y la vulnerabilidad social.

Un sistema de alerta a escala comunitaria integra información climática, entomológica, virológica, epidemiológica y socioambiental con mayor resolución espacial, lo que favorece pronósticos ajustados al contexto local. Además, garantiza la participación comunitaria y la comunicación del riesgo.

Con este propósito, se diseñó e implementó el Sistema de Alerta Temprana Bioclimático para el virus dengue y su vector sensible al clima (SAT-DENCLIM) en el Área de Salud Diego Tamayo, municipio Habana Vieja. El sistema se sustenta en el enfoque ecosistémico y en el paradigma de Una Sola Salud, al integrar la metodología híbrida de Ortiz Bultó con estrategias de educación popular para combinar predicción climática, análisis espacial y participación comunitaria.[19,20]

A diferencia de los enfoques reactivos, SAT-DENCLIM incorpora la predicción climática para orientar el control focalizado del vector, optimizar recursos y fortalecer la adaptación del sector de la salud frente a la variabilidad y el cambio climático. Este enfoque se encuentra en consonancia con la OMS, la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y el Plan de Estado cubano Tarea Vida.[17,21,22]

El objetivo de este estudio fue Mostrar el diseño e implementación del SAT-DENCLIM con el fin de analizar su replicabilidad como medida de adaptación al cambio climático.

Métodos

Se realizó un estudio observacional longitudinal, con enfoque analítico y de implementación, que combinó un análisis retrospectivo de series temporales del período 2019-2023, con una fase prospectiva de aplicación y evaluación correspondiente al período 2024-2025, del Sistema de Alerta Temprana Bioclimático SAT-DENCLIM en una comunidad de La Habana Vieja. Se tomó como estudio de caso el Área de Salud Diego Tamayo.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

El componente retrospectivo permitió calibrar el modelo, mientras que el componente prospectivo evaluó su aplicación operativa y respuesta comunitaria. Las actividades incluyeron:

1. Recopilación y armonización de datos georreferenciados climáticos, entomológicos, virológicos, epidemiológicos y socioambientales.
2. Aplicación de la metodología híbrida de Ortiz Bultó para el cálculo mensual del índice de riesgo.
3. Generación de boletines diferenciados (decisores y comunidad) y difusión mediante canales locales.
4. Realización de talleres de educación popular.
5. Análisis geoespacial (*clusters* y puntos calientes) para priorizar intervenciones.

La información climática se obtuvo de la red de estaciones meteorológicas del Centro Meteorológico Provincial de La Habana, perteneciente al Instituto de Meteorología (INSMET). Se utilizaron series mensuales de temperatura máxima y mínima del aire (° C), oscilación térmica del aire (° C), humedad relativa del aire (%), tensión de vapor de agua (mm), presión atmosférica a nivel del mar (hpa), precipitación (mm), días con precipitación > 0,1 mm y densidad de oxígeno disuelto en el aire (g/m^2), a partir de las cuales se calcularon los índices climáticos complejos que expresan la variabilidad climática mensual, estacional e interanual según la metodología de Ortiz Bultó.

La información entomológica procedió de las inspecciones domiciliarias e incluyó el número de focos larvarios, índice de casa e índice de Breteau. Los datos epidemiológicos correspondieron a casos confirmados de dengue mediante IgM positiva, obtenidos del laboratorio de referencia del Instituto de Medicina Tropical Pedro Kourí y de los registros de la Unidad Municipal de Higiene y Epidemiología de La Habana Vieja.

La información socioambiental incluyó la densidad poblacional, el hacinamiento y la localización de depósitos de agua. Además, se incorporaron encuestas aplicadas en tres momentos (inicial, intermedio y final) para evaluar percepciones,

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

hábitos preventivos, necesidades de información, vías de comunicación y empoderamiento comunitario. Esta información se complementó con reportes de criaderos, fichas de inspección, entrevistas a actores comunitarios y registros de talleres participativos. Todas las series fueron sometidas a procesos de limpieza, imputación mínima cuando fue necesario y normalización para su integración en la metodología de Ortiz Bultó.

Se exponen los mapas temáticos de densidad de población, hacinamiento y envejecimiento que fundamentaron la selección del área de estudio y facilitan la replicación de la herramienta en otros territorios (fig. 1).[23,24]

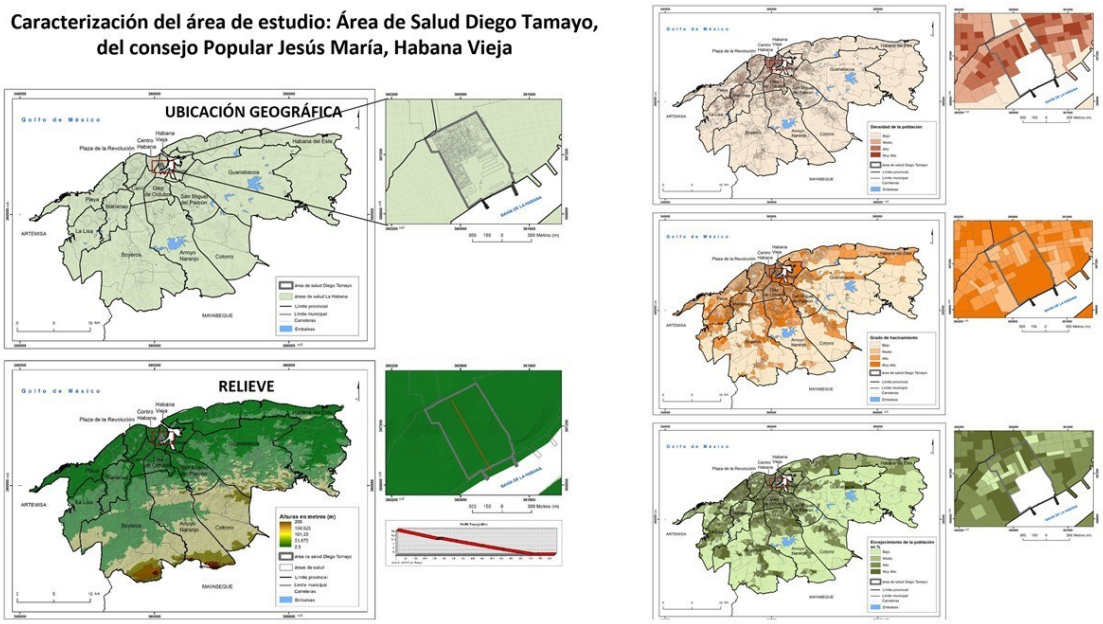


Fig. 1 - Mapas de ubicación del área de estudio, relieve, densidad poblacional, hacinamiento y envejecimiento poblacional.

Estos mapas se elaboraron en un Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizando un archivo *shapefile* como base cartográfica. Los datos se clasificaron mediante el método Natural Jenks y se representaron en categorías desde baja hasta muy alta. Asimismo, se generó un modelo digital de elevación. Se empleó la proyección cónica conforme de Lambert, ajustada al sistema de referencia de Cuba Norte.

..Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

El componente técnico-operativo se sustentó en la metodología de Ortiz Bultó, que integra la geografía de la salud y la bioclimatología para articular información climática, epidemiológica, entomológica y socioambiental en modelos predictivos.[9,25] Se combinaron variables heterogéneas a través de una malla que homogenizó las métricas, mediante métodos de interpolación espacial (Kriging univariado-multivariado y kriging Poisson combinado con la ponderación de distancias inversas). Se aplicaron modelos espaciales-autorregresivos-mixtos para obtener predicciones escalonadas de riesgo climático mediante el índice de Bultó, con rangos entre ± 3, utilizados para establecer niveles de alerta diferenciados (decisores: azul, verde, amarillo, naranja y rojo; comunidad: azul, amarillo y rojo).

El enfoque de Ortiz Bultó ha sido aplicado en estudios cubanos previos para predicción espacial de *Aedes aegypti*.[9] Este método utiliza un sistema de modelos por capas, en el que la información fluye de manera secuencial:

- Pronóstico climático: emplea los Índices de Bultó para caracterizar la variabilidad climática mensual con resolución espacial de 50 m e identificar umbrales de riesgo entomológico en cada localidad. Estos índices facilitan la identificación temprana de condiciones propicias para la proliferación de *Aedes aegypti*.
- Predicción de la densidad poblacional de *Aedes aegypti*: combina los índices climáticos con información entomológica y variables socioambientales para estimar la abundancia futura del vector.
- Pronóstico de circulación viral: integra la densidad proyectada del vector con el historial de casos confirmados de dengue y variables socioambientales para estimar la probabilidad de transmisión.

Este esquema por capas garantiza la integración y validación cruzada de la información, reflejando la influencia conjunta del clima, la entomología y las condiciones socioambientales.

Se aplicaron técnicas de análisis espacial multivariado (Moran' s I, LISA, Getis-Ord Gi*, K-Function)[26] para identificar áreas de mayor vulnerabilidad y generar mapas

..Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

de riesgo incorporados a los boletines dirigidos a decisores y población. Los mapas se actualizaron mensualmente y permitieron priorizar acciones de control vectorial y educación sanitaria. La escala espacial incluye diversos horizontes (municipales/comunitarias/manzanas), al igual que la escala temporal (mensual y trimestral), lo cual permite pronósticos a corto plazo (un mes) y mediano plazo (hasta tres meses).

Se elaboraron dos boletines mensuales: uno técnico para decisores y otro simplificado para la población, acompañado de un protocolo de respuesta adaptado a cada público (Anexo 1).

El SAT-DENCLIM incorpora la educación popular para favorecer la apropiación comunitaria de la información. Se realizaron talleres participativos y se mantuvo la retroalimentación con líderes comunitarios y brigadas de salud para ajustar los boletines y mapas a las necesidades locales. Asimismo, se establecieron canales bidireccionales de comunicación que permitieron incorporar observaciones comunitarias al sistema.

El SAT-DENCLIM contiene los cuatro pilares identificados por la Organización Meteorológica Mundial para los sistemas de alerta. La estructura y el desempeño operativo del SAT-DENCLIM se compararon con el marco de referencia del Sistema de Alerta Temprana y Respuesta (EWARS, por sus siglas en inglés) de la OMS/TDR, y con experiencias de alerta temprana desarrolladas en América Latina, con el propósito de identificar similitudes, diferencias y elementos potencialmente replicables.[15,27,28]

El procesamiento y análisis de la información se realizó mediante las siguientes aplicaciones: ZigmaPlot 10.0, GeoDa 1.22.0.49, TIBCO Spotfire S+® 8.1, Statistical 12 y ArcGIS, utilizados para la integración de datos, desarrollo de modelos espaciales-autorregresivos-mixtos y de series temporales para el análisis de patrones y la visualización de resultados en formato de mapas y gráficos.

Resultados

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

Los resultados del SAT-DENCLIM mostraron cómo la integración de información climática, entomológica, epidemiológica y social permite anticipar escenarios de riesgo de dengue (fig. 2).

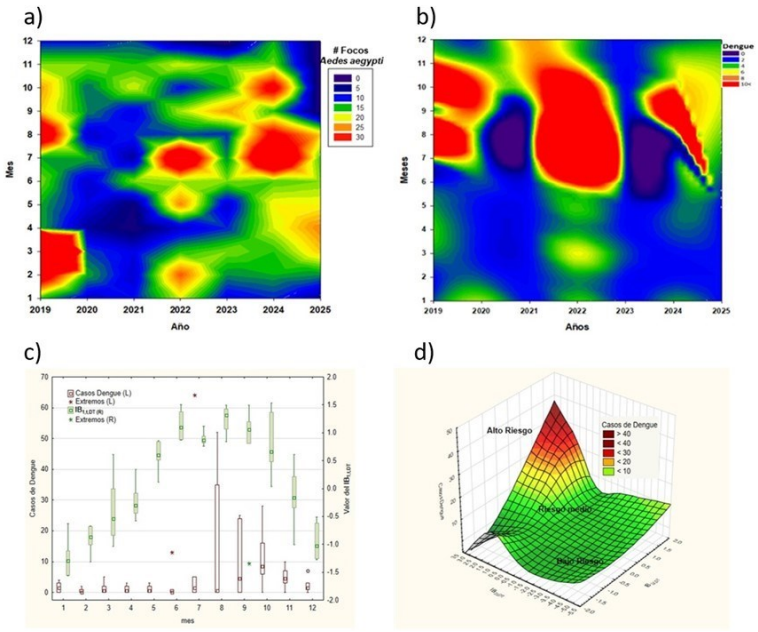


Fig. 2 - Serie multianual de densidad de Aedes aegypti (escala mensual): (a), serie multianual de casos de dengue en el área de estudio; (b), asociación entre el patrón del Índice de Bultó y casos de dengue; (c), asociación no lineal del Índice de Bultó y casos de dengue (d). Período 2019-2025.

El análisis multianual de la densidad de *Aedes aegypti* reveló patrones estacionales consistentes, con picos en los meses posteriores a períodos de lluvias intensas y elevadas temperaturas. El dengue mostró una clara asociación con el incremento de las poblaciones del vector, con un desfase aproximado de un mes. Además, se observó una ciclicidad de brotes cada 2-2,5 años, que en los años 2019 y 2022 se extendió al período poco lluvioso.

El Índice de Bultó definió umbrales de riesgo entomológico estrechamente asociados con la ocurrencia de dengue. Los picos de transmisión se concentraron en septiembre-octubre y coincidieron con valores del índice superiores a los umbrales establecidos.

..Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

El gráfico tridimensional corroboró esta relación, al mostrar al período lluvioso con valores positivos del Índice de Bultó, lo que coincide con las condiciones climáticas más favorables para la proliferación de *Aedes aegypti* y la transmisión del dengue. El SAT-DENCLIM generó pronósticos de circulación viral a partir de la predicción climática, lo que contribuyó a fortalecer la vigilancia temprana con una reducción relativa de criaderos y de dengue durante la implementación, en comparación con años previos para igual período (figs. 3 y 4).

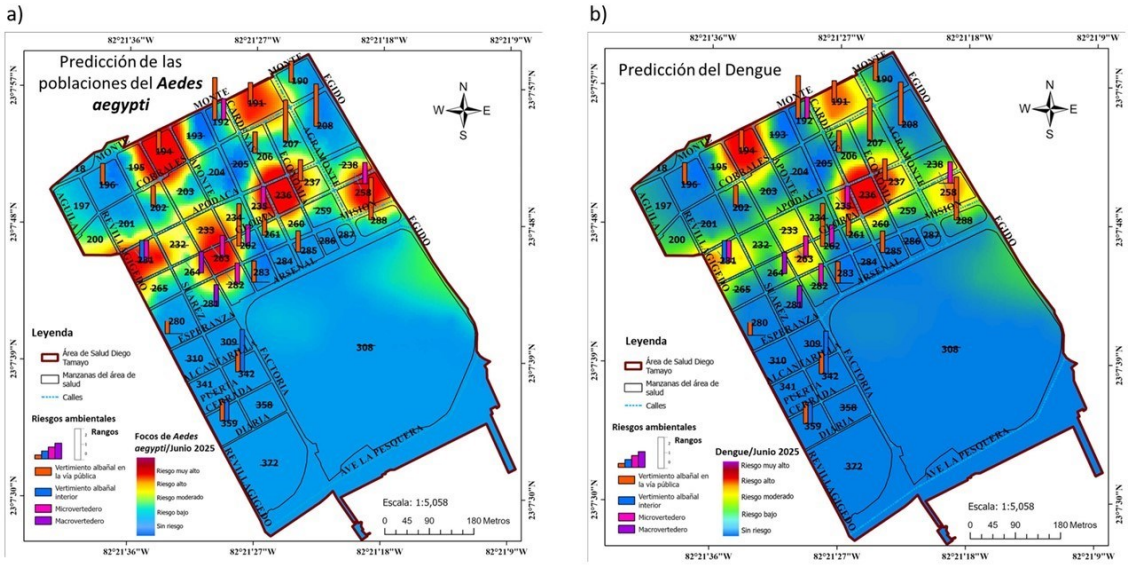


Fig. 3 - Pronóstico espacial de las poblaciones de *Aedes aegypti* (a) y circulación del dengue (b) para el mes de junio de 2025.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

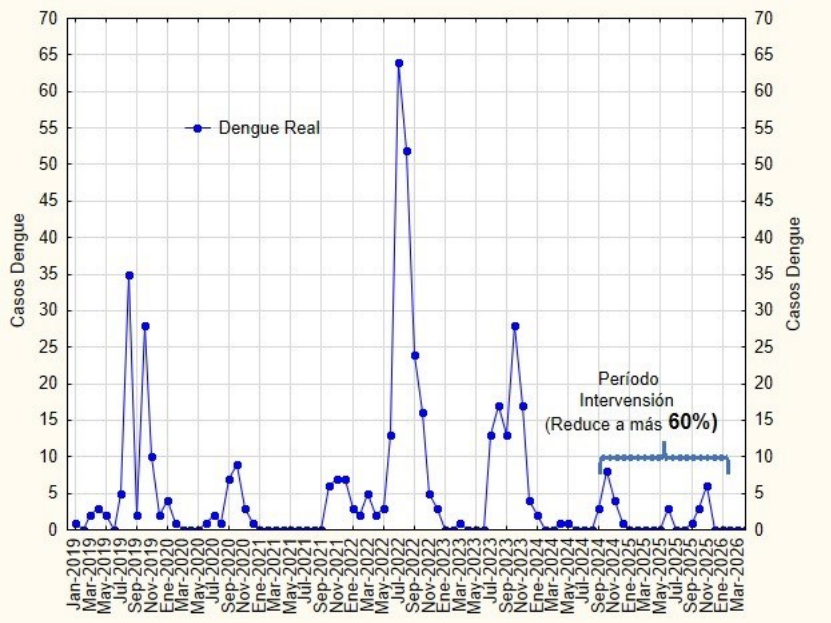


Fig. 4 - Comparación entre la línea base de casos de dengue y el período de implementación. Período 2019- 2025.

Asimismo, los pronósticos permitieron anticipar escenarios de riesgo con varias semanas de antelación, lo que facilitó la planificación de intervenciones focalizadas y la elaboración de boletines para decisores y población.

Los boletines comunitarios, basados en códigos de color y recomendaciones prácticas, fueron comprendidos adecuadamente durante talleres y grupos focales. Los participantes identificaron el nivel de alerta, entendieron las recomendaciones y reportaron condiciones favorables para la proliferación del vector. El boletín técnico facilitó la coordinación intersectorial y la priorización de recursos, mientras que el boletín comunitario incrementó el reporte de criaderos y fortaleció la base de datos local (fig. 5).

..Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

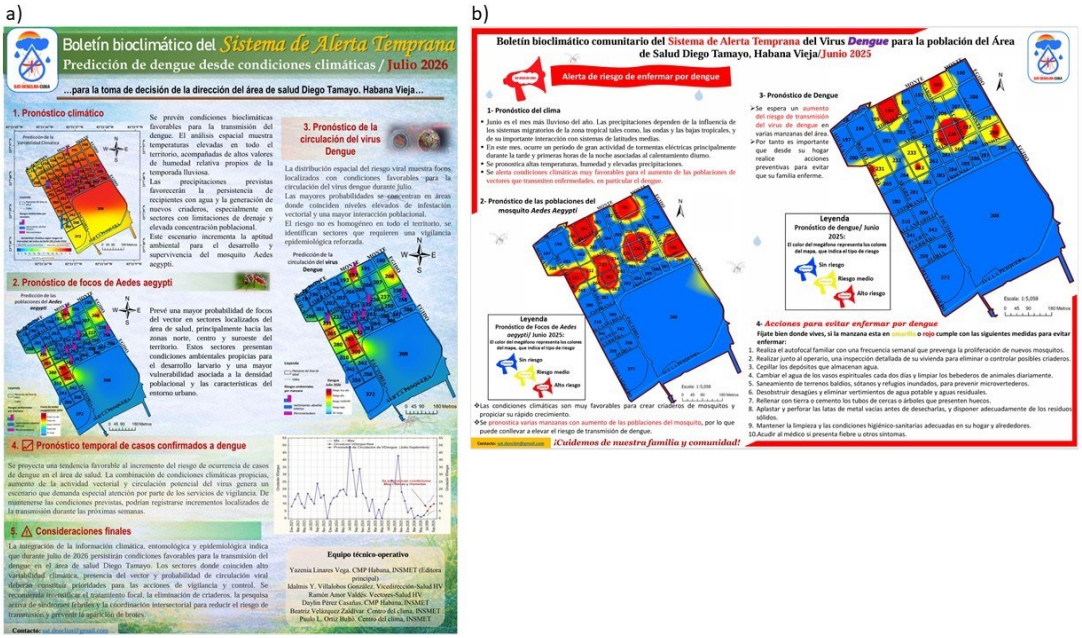


Fig. 5 - Boletín bioclimático del sistema de alerta temprana para dengue según grupo meta, para decisores (a) y para la población (b).

En conjunto, los resultados demostraron que la integración de información climática, entomológica, virológica, epidemiológica y socioambiental mediante la metodología de Ortiz Bultó permite generar alertas tempranas confiables. Este proceder metodológico brinda las herramientas para fortalecer la toma de decisiones y la participación comunitaria.

La implementación del SAT-DENCLIM requirió coordinación entre el servicio meteorológico, salud pública local y actores comunitarios. Las reuniones mensuales de coordinación y los protocolos de intercambio de datos (estandarizados) fueron esenciales para mantener el funcionamiento del sistema operativo. Se identificaron limitaciones con los recursos humanos y la continuidad financiera, aspectos que deberán fortalecerse para garantizar su sostenibilidad.

..Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

Discusión

Los hallazgos del SAT-DENCLIM son consistentes con la evidencia que demuestra la sensibilidad del dengue a las condiciones climáticas. La asociación entre la dinámica del vector, la circulación viral y los casos de dengue respalda el enfoque predictivo basado en variables climáticas, lo que coincide con estudios que muestran que la transmisión depende de la interacción entre la variabilidad climática, el espacio geográfico y las características socioambientales.[2,5,7,8]

La variabilidad climática modifica las condiciones que regulan la supervivencia, reproducción y dispersión del *Aedes aegypti,* mientras que el espacio geográfico modula el riesgo mediante factores ambientales, urbanos y sociales. Las anomalías de temperatura y precipitación suelen preceder al incremento de la actividad vectorial y la circulación viral con desfases de varias semanas, en concordancia con los tiempos requeridos para el desarrollo del vector, la replicación viral y la aparición de casos de dengue.[5]

El enfoque híbrido basado en la metodología de Ortiz Bultó demuestra un importante valor operativo al integrar múltiples dimensiones del peligro climático y del riesgo entomológico, virológico, epidemiológico y socioespacial en un único sistema predictivo. Esta aproximación resulta especialmente útil en entornos urbanos complejos, donde la heterogeneidad espacial condiciona la distribución del riesgo. Los resultados confirman que los indicadores integrados de variabilidad climática permiten anticipar escenarios de transmisión y fortalecer la planificación preventiva, en concordancia con investigaciones previas desarrolladas en Cuba.[20,25]

A diferencia de otros sistemas de alerta temprana, SAT-DENCLIM incorpora la predicción climática, la circulación viral, el análisis espacial y variables socioambientales en un mismo esquema metodológico. Esta integración amplía su capacidad para identificar áreas de riesgo, priorizar intervenciones y apoyar la toma de decisiones locales. Además, complementa experiencias como EWARS-TDR, cuya factibilidad ha sido demostrada en diferentes países, pero que no incorpora de forma dinámica modelos de predicción climática ni análisis espacial con el nivel de resolución utilizada en este estudio.[27,28]

..Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

La identificación de patrones espaciales de riesgo y su correspondencia con condiciones de vulnerabilidad socioambiental refuerzan la utilidad del análisis espacial para focalizar intervenciones en áreas urbanas densamente pobladas. Estos resultados coinciden con la literatura sobre geoestadística aplicada a enfermedades transmitidas por vectores.[26,29]

Asimismo, los boletines diferenciados facilitaron la comunicación del riesgo y la toma de decisiones, aspectos reconocidos como componentes esenciales de los sistemas de alerta temprana.[19,22]

La implementación del SAT-DENCLIM evidencia el aporte del enfoque de Una Sola Salud para articular los sectores que abordan problemas complejos como el dengue. Desde esta perspectiva, la metodología de Ortiz Bultó favorece la interpretación conjunta de las señales climáticas, la circulación viral y su expresión espacial, al fortalecer la comprensión del riesgo y la vigilancia integrada.

En conjunto, los resultados refuerzan la utilidad de integrar estos enfoques para fortalecer la capacidad predictiva y la toma de decisiones preventivas en el nivel local. El SAT-DENCLIM es adaptable a otros contextos con condiciones similares, siempre que se garantice la disponibilidad de datos y la coordinación intersectorial, por lo que constituye un modelo innovador de vigilancia integrada y prevención del dengue.

Más allá del componente técnico, los resultados evidencian que la participación comunitaria constituye un factor determinante en la efectividad del SAT-DENCLIM. La apropiación social de la información facilita la transformación de las alertas en acciones concretas de prevención.

La retroalimentación continua permitió ajustar los productos comunicativos a las necesidades de la población y prestar especial atención a grupos en condición de vulnerabilidad que se encuentran en mayor desventaja para adaptarse ante los impactos del cambio climático (niños, mujeres y adultos mayores). Se promovió la equidad de género y el enfoque generacional, lo que incrementó la pertinencia y utilidad del sistema.

Estos procesos fortalecieron el empoderamiento comunitario y favorecieron la adopción de medidas preventivas, la vigilancia y el control vectorial. La efectividad

..Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

de los sistemas de alerta depende tanto de la precisión de los pronósticos como de la capacidad de la población para interpretar y utilizar la información recibida.

Desde la perspectiva de la adaptación al cambio climático,[30] el SAT-DENCLIM constituye una herramienta que fortalece la resiliencia del sector salud, al promover un enfoque anticipatorio frente a riesgos epidémicos. Sin embargo, a pesar de sus fortalezas, el sistema enfrenta desafíos: la exactitud de los pronósticos depende del monitoreo y calidad de los datos disponibles. Asimismo, la replicabilidad requiere de formación técnica local, coordinación intersectorial y continuidad de la participación comunitaria.

Los resultados muestran que los sistemas de alerta bioclimática trascienden la predicción de brotes al integrar vigilancia climática, circulación viral, análisis espacial y participación social para fortalecer la toma de decisiones y la adaptación del sector de la salud frente a la variabilidad y el cambio climático en contextos urbanos y rurales.[30] Estos hallazgos coinciden con las recomendaciones del IPCC[4] y la OMS,[17] que promueven enfoques integrados y participativos para enfrentar los riesgos sanitarios asociados con el cambio climático.

La implementación del SAT-DENCLIM en comunidades cubanas ha permitido identificar múltiples lecciones aprendidas que pueden sustentar su replicabilidad en otros contextos, nacional e internacional, con condiciones epidemiológicas y climáticas similares.

La metodología de Ortiz Bultó constituyó el eje integrador del sistema al permitir la homogenización y procesamiento conjunto de información climática, entomológica, virológica, epidemiológica y socioambiental. Los Índices de Bultó propician la identificación temprana de condiciones propicias para la proliferación del vector y la circulación viral, lo que apoya la toma de decisiones oportunas en salud pública.

La incorporación de la educación popular favoreció la apropiación social de la información y la utilización de los boletines y mapas para orientar acciones preventivas. La retroalimentación permanente con la comunidad fortaleció la efectividad de las alertas.

La integración de información climática, entomológica, epidemiológica y socioambiental mediante herramientas SIG y análisis espacial permitió identificar

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

patrones de riesgo y anticipar escenarios de circulación viral con varias semanas de antelación. Los mapas pronósticos facilitaron la priorización de intervenciones tanto a escala comunitaria como municipal.

La experiencia demuestra que SAT-DENCLIM es adaptable a otros territorios siempre que exista disponibilidad de información climática, entomológica y epidemiológica, junto con coordinación intersectorial. Su diseño flexible permite ajustar los modelos, indicadores y productos comunicativos a las condiciones locales para la vigilancia integrada de enfermedades sensibles al clima.

En conjunto, estas lecciones evidencian que la combinación de predicción climática, modelos por capas, análisis espacial y participación comunitaria constituye una estrategia sostenible para fortalecer la adaptación del sector de la salud frente a la variabilidad y el cambio climático.

Se recomienda:

1. Adoptar una metodología que integre información climática, epidemiológica, entomológica y socioambiental.
2. Elaborar boletines diferenciados para decisores y población con niveles de alerta fácilmente interpretables.
3. Incorporar activamente a líderes comunitarios y brigadas de salud en la vigilancia.
4. Utilizar SIG y análisis espacial para priorizar intervenciones.
5. Establecer mecanismos formales de intercambio de información entre meteorología, salud y comunidad.
6. Implementar indicadores de monitoreo y evaluación para ajustar el sistema.
7. Garantizar financiamiento y capacitación continua que aseguren su sostenibilidad.

Para implementar el SAT-DENCLIM en otras localidades, se proponen las acciones siguientes:

- Evaluar la disponibilidad de datos y capacidades técnicas.
- Adaptar la metodología de Ortiz Bultó mediante validación retrospectiva.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

- Diseñar estrategias de comunicación acordes con las características socioculturales locales.
- Formalizar acuerdos para el intercambio de información entre instituciones.
- Establecer un plan de evaluación con indicadores cuantitativos y cualitativos.

El SAT-DENCLIM demostró la factibilidad de integrar información climática, entomológica, virológica, epidemiológica y socioambiental en un sistema operativo de alerta temprana para la vigilancia del dengue a escala comunitaria.

La aplicación de la metodología de Ortiz Bultó permitió incorporar la variabilidad climática, el análisis espacial y la circulación viral en modelos predictivos capaces de identificar umbrales de riesgo y anticipar escenarios de transmisión, lo que facilitó la planificación de intervenciones preventivas focalizadas y el uso más eficiente de los recursos disponibles.

La integración de SIG, modelos por capas y estrategias de educación popular fortaleció la participación comunitaria, la comunicación del riesgo y la toma de decisiones intersectoriales, y contribuyó a una vigilancia más integrada del dengue.

Se concluye el SAT-DENCLIM constituye una herramienta innovadora y replicable para la adaptación del sector de la salud frente a la variabilidad y el cambio climático, con potencial para su aplicación en otros territorios afectados por enfermedades transmitidas por vectores sensibles al clima, siempre que se garantice la disponibilidad de información, el fortalecimiento de capacidades técnicas y la coordinación interinstitucional.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Inter-Americano para la investigación del Cambio Global y la Organización Panamericana de la Salud, en particular a la Unidad de Cambio Climático y Determinantes Ambientales de la Salud para las Américas y su representación en La Habana-Cuba, por el apoyo financiero y técnico brindado para la implementación del proyecto SAT-DENCLIM. Este trabajo no habría sido posible sin su respaldo para fortalecer capacidades locales de

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

vigilancia y prevención del dengue. Asimismo, agradecen la colaboración de las autoridades sanitarias nacionales y locales, el sistema meteorológico, los centros de investigación, el personal técnico y, especialmente, las comunidades participantes, cuya contribución y compromiso fueron esenciales para el éxito del sistema de alerta.

Referencias bibliográficas

1. Pan American Health Organization. PLISA health information platform for the Americas. Dengue: analysis by country. Washington: PAHO; 2025 [acceso 12/08/2025]. Disponible en: https://www.paho.org/en/arbo-portal/dengue-data-and-analysis/dengue-analysis-country

2. Gizaw Z, Salubi E, Pietroniro A, Schuster-Wallace C. Impacts of climate change on water-related mosquito-borne diseases in temperate regions: A systematic review of literature and meta-analysis. Act Trop. 2024;258:107324. DOI: https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2024.107324

3. Quijada M, Vicco A, Bajura F, Moreno L, Díaz Y, Laydon D, *et al*. The Lancet Regional Health–Americas. 2026;58:101471x. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lana.2026.101471

4. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Geneva: IPCC; 2023 [acceso 12/04/2026]. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/

5. Douglas K, Payne K, Sabino-Santos G, Chami P, Lorde T. The Impact of Climate on Human Dengue Infections in the Caribbean. Pathogens. 2024;13:756. DOI: https://doi.org/10.3390/pathogens13090756

6. Mordecai EA, Cohen JM, Evans MV, Gudapati P, Johnson LR, Lippi CA, *et al*. Detecting the impact of temperature on transmission of Zika, dengue, and chikungunya using mechanistic models. PLoS Negl Trop Dis. 2017;11(4):e0005568. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0005568

7. Nakase T, Giovanetti M, Obolski U, Lourenco J. Population at risk of dengue virus transmission has increased due to coupled climate factors and population growth.

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

Commun Earth Environ. 2024;5:475. DOI: https://doi.org/10.1038/s43247-024-01639-6

8. Campbell KM, Haldeman K, Lehnig C, Munayco CV, Halsey ES, Laguna-Torres VA, *et al*. Multi-decadal climate-dengue relationships across tropical regions: Evidence from wavelet coherence analyses. PLoS Negl Trop Dis. 2024;18(2):e0012005. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0012005

9. Ortiz PL, Rivero A, Linares Y, Vázquez JR. Spatial models for prediction and early warning of Aedes aegypti proliferation from data on climate change and variability in Cuba. MEDICC. 2015 [acceso 20/01/2026];17(2):20-7. Disponible en: https://www.medigraphic.com/pdfs/medicreview/mrw-2015/mrw152f.pdf

10. Childs ML, Lyberger K, Harris M, Burke M, Mordecai EA. Climate warming is expanding dengue burden in the Americas and Asia. Proc Natl Acad Sci USA. 2025;16:122(37):e2512350122. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.2512350122

11. Ferreira H, Nobrega R, Brito P, Farias J, Amorim J, Moreira E, *et al*. Impacts of El Niño Southern Oscillation on the dengue transmission dynamics in the Metropolitan Region of Recife, Brazil. Rev Soc Bras Med Trop. 2022;55. DOI: https://doi.org/10.1590/0037-8682-0671-2021

12. Li G, Lu P, Weinstein P, Urban A, Tong S, Ryti N, *et al*. The burden of El Niño–Southern Oscillation-related dengue attributable to anthropogenic climate change: a multicountry modelling study. Lancet Planet Health. 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/.lanplh.2026.101454

13. Sánchez-Lara E, Pascual-Armiñan ME, Expósito-Boue LM, González-Ramírez R. Variabilidad climática y su influencia en la aparición del dengue en la provincia de Guantánamo. Rev Inf Cient. 2022 [acceso 13/12/2025];101(6). Disponible en: https://www.revinfcientifica.sld.cu/index.php/ric/article/view/3777

14. Feng F, Ma Y, Qin P, Zhao Y, Liu Z, Wang W, *et al*. Temperature-Driven Dengue Transmission in a Changing Climate: Patterns, Trends, and Future Projections. GeoHealth. 2024;8:10e2024GH001059. DOI: https://doi.org/10.1029/2024GH001059

15. Tejeda G, Valladares D, Morales F, Cisneros J, Tamarindo BE, Hussain-Alkhateeb L, *et al*. Early warning and response system for dengue outbreaks:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

Moving from research to operational implementation in Mexico. PLOS Glob Public Health. 2023;3(9):e0001691. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pgph.0001691

16. Allen CF, West RM, Gordon-Strachan G, Hassan S, McFarlane S, Polson-Edwards K, *et al*. Research for Action on Climate Change and Health in the Caribbean: A Public, Private, People's and Planetary Agenda. Research for Action on Climate Change and Health in the Caribbean Project. 2024 [acceso 15/02/2026]. Disponible en: https://www.paho.org/sites/default/files/research-for-action-on-climate-change-and-health-in-the-caribbean_2024_0.pdf

17. World Health Organization. Belem health action plan for the adaptation of the health sector to climate change. Geneva: WHO; 2025 [acceso 07/10/2025]. Disponible en: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/climate-change/en---belem-action-plan.pdf

18. Borroto Gutiérrez SM, Suárez Tamayo S, del Puerto Rodríguez A, coords. El cambio climático y la salud en Cuba. La Habana: Editorial Ciencias Médicas; 2022 [acceso 20/05/2025]. Disponible en: http://www.bvscuba.sld.cu/libro/el-cambio-climatico-y-la-salud-en-cuba

19. Organización Panamericana de la Salud. Alerta temprana para el dengue: Cuba fortalece la prevención desde la comunidad. Washington: OPS/OMS; 2025 [acceso 21/11/2025]. Disponible en: https://www.paho.org/es/historias/alerta-temprana-para-dengue-cuba-fortalece-prevencion-desde-comunidad

20. Ortiz-Bultó PL, Linares-Vega Y. Cuban approaches to climate and health studies in tropics: early warning system and learned lessons. J Virol Immunol. 2021 [acceso 05/05/2026];5(3). Disponible en: https://medwinpublishers.com/VIJ/cuban-approaches-to-climate-and-health-studies-in-tropics-early-warning-system-and-learned-lessons.pdf

21. Organización Panamericana de la Salud. Agenda para las Américas sobre salud, medioambiente y cambio climático 2021-2030. Washington: OPS/OMS; 2021 [acceso 11/06/2025]. Disponible en: https://iris.paho.org/handle/10665.2/55212

22. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medioambiente. Programa de gobierno Tarea Vida: Plan de Estado para el enfrentamiento al cambio climático. La Habana: CITMA; 2017 [acceso 08/09/2025]. Disponible en:

Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

https://www.citma.gob.cu/tareavidaplandeestadodeenfrentamientoacambioclimaticoencuba/

23. Favier L. Condiciones de vida en La Habana. Un acercamiento desde el análisis estadístico-espacial [Tesis]. La Habana: Universidad de La Habana; 2019.

24. Veranes AF. Población vulnerable ante la COVID-19 según prevalencia de enfermedades crónicas no transmisibles en Cuba y La Habana [Tesis]. La Habana: Universidad de La Habana; 2022.

25. Ortiz-Bultó P, Pérez-Rodríguez AE, Rivero-Valencia A, León-Vega N, Díaz-González M, Pérez-Carrera A. Assessment of human health vulnerability to climate variability and change in Cuba. Environ Health Perspect. 2006 [acceso 11/02/2026];114(12):1942-9. Disponible en: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1764156/pdf/ehp0114-001942.pdf

26. Anselin L. A local indicator of multivariate spatial association: Extending Geary's c. Geogr Anal. 2019;51:141-64. DOI: https://doi.org/10.1111/gean.12164

27. Cárdenas R, Tejeda GS, Hussain-Alkhateeb L, Benítez-Valladares D, Sánchez-Tejeda G, Kroeger A. The Early Warning and Response System (EWARS-TDR) for dengue outbreaks: evaluation and applications. BMC Infect Dis. 2022 [acceso 30/02/2026];22:235. Disponible en: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8902764/

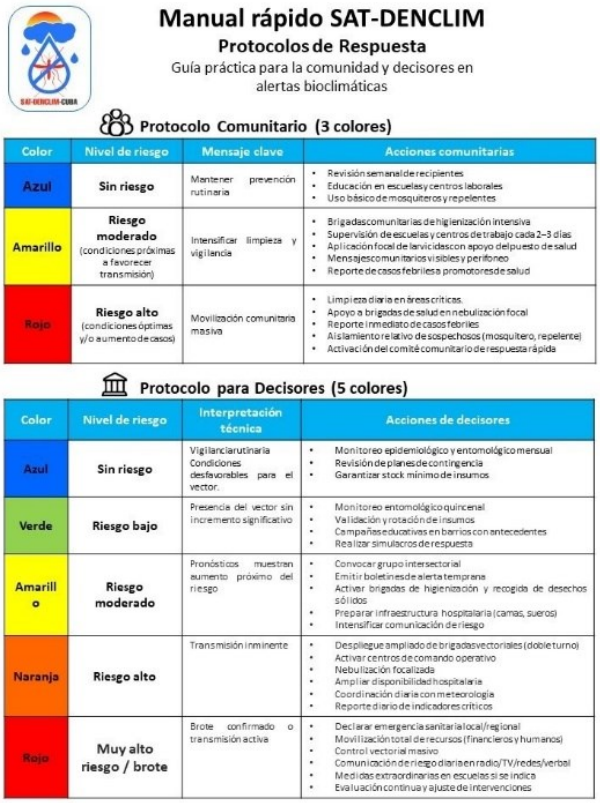
28. WHO/TDR. Early Warning and Response System for climate-sensitive diseases (EWARS-csd). Geneva: TDR/WHO; 2023 [acceso 03/12/2025]. Disponible en: https://tdr.who.int/activities/ewars-csd

29. Goovaerts P. Medical Geography: A Promising Field of Application for Geostatistics. Math Geosci. 2009;41:243-64. DOI: https://doi.org/10.1007/s11004-008-9211-3

30. Brandon C, Kratzer B, Aggarwal A. Adapting to climate-related health risks: The economic case for climate services for health. Working paper. Washington, DC: World Resources Institute; 2026. DOI: https://doi.org/10.46830/wriwp.25.00120

..Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

Anexos



Manual rápido SAT-DENCLIM

Protocolos de Respuesta

Guía práctica para la comunidad y decisores en alertas bioclimáticas

Protocolo Comunitario (3 colores)

Color	Nivel de riesgo	Mensaje clave	Acciones comunitarias
Azul	Sin riesgo	Mantener prevención rutinaria	• Revisión semanal de recipientes • Educación en escuelas y centros laborales • Uso básico de mosquiteros y repelentes
Amarillo	Riesgo moderado (condiciones próximas a favorecer transmisión)	Intensificar limpieza y vigilancia	• Brigadas comunitarias de higienización intensiva • Supervisión de escuelas y centros de trabajo cada 2–3 días • Aplicación focal de larvicidas con apoyo del puesto de salud • Mensajes comunitarios visibles y perifoneo • Reporte de casos febriles a promotores de salud
Rojo	Riesgo alto (condiciones óptimas y/o aumento de casos)	Movilización comunitaria masiva	• Limpieza diaria en áreas críticas • Apoyo a brigadas de salud en nebulización focal • Reporte inmediato de casos febriles • Aislamiento relativo de sospechosos (mosquitero, repelente) • Activación del comité comunitario de respuesta rápida

Protocolo para Decisores (5 colores)

Color	Nivel de riesgo	Interpretación técnica	Acciones de decisores
Azul	Sin riesgo	Vigilancia rutinaria. Condiciones desfavorables para el vector.	• Monitoreo epidemiológico y entomológico mensual • Revisión de planes de contingencia • Garantizar stock mínimo de insumos
Verde	Riesgo bajo	Presencia del vector sin incremento significativo	• Monitoreo entomológico quincenal • Validación y rotación de insumos • Campañas educativas en barrios con antecedentes • Realizar simulacros de respuesta
Amarillo	Riesgo moderado	Pronósticos muestran aumento próximo del riesgo	• Convocar grupo intersectorial • Emitir boletines de alerta temprana • Activar brigadas de higienización y recogida de desechos sólidos • Preparar infraestructura hospitalaria (camas, sueros) • Intensificar comunicación de riesgo
Naranja	Riesgo alto	Transmisión inminente	• Despliegue ampliado de brigadas vectoriales (doble turno) • Activar centros de comando operativo • Nebulización focalizada • Ampliar disponibilidad hospitalaria • Coordinación diaria con meteorología • Reporte diario de indicadores críticos
Rojo	Muy alto riesgo / brote	Brote confirmado o transmisión activa	• Declarar emergencia sanitaria local/regional • Movilización total de recursos (financieros y humanos) • Control vectorial masivo • Comunicación de riesgo diaria en radio/TV/redes/verbal • Medidas extraordinarias en escuelas si se indica • Evaluación continua y ajuste de intervenciones

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribuciones de los autores

Conceptualización: Yazenia Linares Vega y Paulo Lázaro Ortiz Bultó.

Curación de datos: Yazenia Linares Vega, Idalmis Yamila Villalobos González, Ramón Amor Valdés, Beatriz Velázquez Zaldívar y Madelaine Rivera Sánchez.

Análisis formal: Yazenia Linares Vega, Idalmis Yamila Villalobos González, Beatriz Velázquez Zaldívar, Alejando Felipe Veranes Miranda, Madelaine Rivera Sánchez, Paulo y Lázaro Ortiz Bultó.

Investigación: Alejando Felipe Veranes Miranda.

Metodología: Yazenia Linares Vega.

Redacción-borrador original: Idalmis Yamila Villalobos González, Ramón Amor Valdés, Beatriz Velázquez Zaldívar, Madelaine Rivera Sánchez y Paulo Lázaro Ortiz Bultó.

..Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES

Redacción-revisión y edición: Yazenia Linares Vega, Idalmis Yamila Villalobos González, Ramón Amor Valdés, Beatriz Velázquez Zaldívar, Madelaine Rivera Sánchez y Paulo Lázaro Ortiz Bultó.

Financiación

Este estudio se desarrolló en el marco del proyecto SG-05-SAT-DENCLIM, financiado por la Organización Panamericana de la Salud y el Instituto Inter-Americano para la Investigación del Cambio Global, con el apoyo de instituciones de Salud y de Meteorología.

..Esta obra está bajo una licencia: https://creativecomons.org/licenses/by-nc/4.0/deed.es_ES