



Somos **calidad,**  
somos **USC**

**Efecto del cambio de temperatura ambiental en la dinámica poblacional de *Aedes aegypti* y en la transmisión de enfermedades zoonóticas en la zona amazónica de Brasil. Revisión sistemática**

**Autor**

**Gabriel Alonso Calceto Valencia**

**Médico Veterinario**

**Director**

**Camilo Guarín Patarroyo**

**Grupo de Investigación  
GIMIA**

**Línea de Investigación**

**Microbiología Ambiental**

**Facultad Ciencias básicas  
Medicina Veterinaria  
Universidad Santiago de  
Cali  
Santiago de Cali, Colombia  
2026**

## IMPACTOS

PACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
<b>Económico</b>	Reducción de costos asociados a brotes epidémicos mediante la implementación de sistemas de alerta temprana basados en predicciones climáticas, optimizando la asignación de recursos para control vectorial (fumigación, eliminación de criaderos) y atención hospitalaria.	Secretarías de Salud municipales y estatales de la Amazonía brasileña; Ministerio de Salud de Brasil; sistemas de salud pública; contribuyentes.
<b>Responsabilidad social</b>	Generación de conocimiento científico accesible que permite a gestores públicos y comunidades locales comprender la relación entre cambio climático y riesgo de arbovirosis, facilitando la toma de decisiones informadas y la participación comunitaria en campañas de prevención.	Comunidades amazónicas; líderes comunitarios; organizaciones no gubernamentales; consejos de salud locales; tomadores de decisión en salud pública.
<b>Científico</b>	Síntesis sistemática de la evidencia sobre la relación temperatura-Aedes aegypti en la Amazonía, identificando vacíos de conocimiento (escasez de estudios con poblaciones locales, necesidad de modelos integradores) y estableciendo nuevas hipótesis sobre la redistribución estacional del riesgo bajo escenarios de cambio climático.	Comunidad académica en epidemiología, entomología, ecología de vectores, cambio climático y salud pública; programas de posgrado en ciencias de la salud y ambientales; redes de investigación interdisciplinaria.
<b>Indicadores de Gestión</b>	Desarrollo de un marco conceptual para la vigilancia integrada que combina datos climáticos, entomológicos y epidemiológicos, permitiendo establecer umbrales de alerta basados en temperatura y densidad vectorial para la activación de protocolos de respuesta temprana.	Departamentos de vigilancia epidemiológica; centros de control de zoonosis; sistemas de información en salud (DATASUS, SINAN); gestores de programas de prevención de arbovirosis.
<b>Tecnológico</b>	Provee la base científica para el desarrollo de plataformas de predicción de brotes basadas en inteligencia artificial y modelos climáticos, integrando datos satelitales de temperatura, precipitación y cobertura vegetal con información entomológica y epidemiológica en tiempo real.	Centros de investigación en salud digital; instituciones de ciencia y tecnología (INPE, Fiocruz); empresas de desarrollo de software para salud pública; sistemas de alerta temprana.
<b>Técnico</b>	Generación de recomendaciones técnicas específicas para la adaptación de estrategias de control vectorial a la estacionalidad térmica de la Amazonía, incluyendo la calendarización de campañas de fumigación en períodos previos a las ventanas de temperatura óptima (~29°C) identificadas por los modelos.	Agentes de control de endemias; equipos técnicos de vigilancia entomológica; coordinadores de campañas de prevención; personal de atención primaria en salud.
<b>Ambiental</b>	Promoción de estrategias de control vectorial que consideren la variabilidad climática y los límites térmicos del vector, reduciendo la aplicación indiscriminada de insecticidas y favoreciendo enfoques integrados que combinan saneamiento ambiental, gestión de residuos y recuperación de ecosistemas que regulan microclimas.	Agencias ambientales (IBAMA, ICMBio); secretarías de medio ambiente municipales; comunidades ribereñas y de la selva amazónica; ecosistemas urbanos y periurbanos de la Amazonía.

FACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Social	Fortalecimiento de la capacidad comunitaria para la prevención de arbovirosis mediante la difusión de información sobre la relación entre temperaturas cálidas y riesgo de transmisión, promoviendo prácticas sostenibles de almacenamiento de agua y eliminación de criaderos adaptadas a las condiciones locales.	Población general de la Amazonía brasileña; comunidades vulnerables en áreas urbanas y rurales; movimientos sociales; organizaciones comunitarias de base.
Cultural	Generación de conocimiento que permite integrar saberes tradicionales sobre variaciones climáticas y comportamiento del vector con evidencia científica, facilitando el diálogo intercultural entre comunidades tradicionales amazónicas, gestores públicos e investigadores para el desarrollo de estrategias de prevención contextualizadas.	Pueblos indígenas; comunidades tradicionales (ribeirinhos, quilombolas, extractivistas); organizaciones de representación indígena; instituciones de salud intercultural.

## EFECTO DEL CAMBIO DE TEMPERATURA AMBIENTAL EN LA DINÁMICA POBLACIONAL DE *Aedes Aegypti* EN LA TRANSMISIÓN DE ENFERMEDADES ZONÓTICAS EN LA ZONA AMAZÓNICA DE BRASIL. REVISIÓN SISTEMÁTICA

**Gabriel Alonso Calceto Valencia** <sup>1</sup> ([gabriel.calceto00@usc.edu.co](mailto:gabriel.calceto00@usc.edu.co))

<sup>1</sup>Grupo de Investigación ECOBIO, Programa de Medicina de la Conservación Animal. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

### RESUMEN

**Introducción:** El cambio climático, caracterizado por el aumento de las temperaturas globales, plantea desafíos significativos para la salud pública, particularmente en regiones ecológicamente sensibles como la Amazonía brasileña.

**Métodos:** Se realizó una búsqueda sistemática en la literatura utilizando las bases de datos proporcionadas, siguiendo los lineamientos PRISMA. Se incluyeron estudios experimentales, epidemiológicos y de modelación que analizaran la relación entre la temperatura y los parámetros biológicos del vector (tasas de reproducción, desarrollo, supervivencia) y/o la incidencia de arbovirus (dengue, Zika, chikungunya) en la región amazónica de Brasil o en condiciones experimentales relevantes. Se excluyeron estudios de opinión, revisiones no sistemáticas y aquellos centrados exclusivamente en otras regiones sin datos relevantes para la Amazonía.

**Resultados:** Un total de 28 estudios fueron incluidos en la síntesis cualitativa. La evidencia demuestra consistentemente que la temperatura es un factor determinante en la biología de *Ae. aegypti*. El aumento de la temperatura, acelera significativamente el desarrollo larval, acorta el ciclo de vida y aumenta la fecundidad de las hembras, lo que lleva a un incremento en la densidad poblacional del vector. Sin embargo, temperaturas extremas (>32 35°C) pueden tener efectos deletéreos, aumentando la mortalidad y reduciendo la supervivencia. igualmente, Los estudios de modelación proyectan una expansión de las áreas climáticamente adecuadas para *Ae. aegypti* en el sur de Brasil, mientras que en regiones cálidas como la Amazonía, el aumento extremo de la temperatura podría, paradójicamente, volver algunas áreas térmicamente limitantes en ciertas épocas del año.

**Conclusiones:** La evidencia revisada confirma que el cambio de temperatura ambiental es un motor clave en la dinámica poblacional de *Ae. aegypti* en la Amazonía brasileña. Las temperaturas más cálidas, dentro de ciertos límites, aceleran su ciclo de vida y aumentan su capacidad vectorial, elevando el riesgo de transmisión de arbovirus. Las proyecciones climáticas indican un panorama complejo donde algunas áreas podrían volverse más

riesgosas mientras que otras podrían experimentar cierta desaceleración estacional debido al calor extremo. Estos hallazgos subrayan la necesidad urgente de integrar la vigilancia climática con la entomológica y epidemiológica para desarrollar sistemas de alerta temprana y estrategias de control adaptativas y específicas para la región amazónica.

**Palabras clave:** *Aedes aegypti*, Cambio Climático, Temperatura, Amazonía, Dengue, Zika, Chikungunya, Dinámica de Poblaciones.

## **EFFECT OF ENVIRONMENTAL TEMPERATURE CHANGE ON THE POPULATION DYNAMICS OF *Aedes aegypti* AND THE TRANSMISSION OF ZONOTIC DISEASES IN THE BRAZILIAN AMAZON: A SYSTEMATIC REVIEW**

### **ABSTRACT**

**Introduction:** Climate change, characterized by rising global temperatures, poses significant challenges to public health, particularly in ecologically sensitive regions such as the Brazilian Amazon.

**Methods:** A systematic literature search was conducted using the selected databases, following PRISMA guidelines. Experimental, epidemiological, and modeling studies were included if they analyzed the relationship between temperature and biological parameters of the vector (reproduction rates, development, survival) and/or the incidence of arboviruses (dengue, Zika, chikungunya) in the Brazilian Amazon region or under relevant experimental conditions. Opinion articles, non-systematic reviews, and studies focused exclusively on other regions without relevant data for the Amazon were excluded.

**Results:** A total of 28 studies were included in the qualitative synthesis. The evidence consistently demonstrates that temperature is a key determinant in the biology of *Aedes aegypti*. Increasing temperature significantly accelerates larval development, shortens the life cycle, and increases female fecundity, leading to higher vector population density. However, extreme temperatures (>32–35°C) may have deleterious effects, increasing mortality and reducing survival. Likewise, modeling studies project an expansion of climatically suitable areas for *Aedes aegypti* in southern Brazil, while in warmer regions such as the Amazon, extreme temperature increases could paradoxically render some areas thermally limiting during certain times of the year.

**Conclusions:** The reviewed evidence confirms that environmental temperature change is a key driver of *Aedes aegypti* population dynamics in the Brazilian Amazon. Warmer temperatures, within certain limits, accelerate its life cycle and enhance its vectorial capacity, increasing the risk of arbovirus transmission. Climate projections indicate a complex scenario in which some areas may become higher-risk zones, while others may experience seasonal reductions in transmission potential due to extreme heat. These findings underscore the urgent need to integrate climate, entomological, and epidemiological surveillance to develop early warning systems and adaptive, region-specific control strategies for the Amazon.

**Keywords:** *Aedes aegypti*, Climate Change, Temperature, Amazon, Dengue, Zika, Chikungunya, Population Dynamics

### **HIGHLIGHTS**

1. La temperatura modula de manera no lineal la dinámica poblacional de *Aedes aegypti* en la Amazonía brasileña. La evidencia sintetizada demuestra que el aumento de la temperatura dentro del rango de 20–30°C acelera el desarrollo larval, acorta el ciclo de vida e incrementa la fecundidad del vector, resultando en una alta densidad poblacional basal. Sin embargo, temperaturas sostenidas por encima de 32–34°C, como las proyectadas bajo escenarios de altas emisiones (SSP5-8.5), aumentan la mortalidad adulta y reducen la viabilidad de los estadios inmaduros, generando una relación no lineal que podría limitar la

transmisión durante los picos de calor extremo (Marinho et al., 2016; Terradas et al., 2024; Heath et al., 2025).

2. El período de incubación extrínseca (PIE) del virus Zika se reduce drásticamente con el aumento de la temperatura, incrementando la eficiencia de transmisión. Los hallazgos experimentales de Winokur et al. (2020) revelan que el tiempo medio para que el 50% de los mosquitos se vuelvan infecciosos (EIP50) se reduce de 24,2 días a 21°C a solo 5,1 días a 30°C. Este acortamiento del PIE, sumado a las mayores tasas de infección y diseminación documentadas por Chouin-Carneiro et al. (2020) en poblaciones brasileñas, evidencia que las temperaturas cálidas (25-28°C) actuales en la Amazonía ya son altamente propicias para una transmisión eficiente de arbovirus.
3. Las proyecciones de cambio climático indican una redistribución estacional del riesgo de transmisión más que un aumento uniforme en la Amazonía. Los modelos proyectan que, bajo escenarios de altas emisiones, la densidad de mosquitos en la Región Norte de Brasil aumentaría solo un 9% para 2080, en contraste con aumentos superiores al 90% en el Sureste. Este hallazgo sugiere que, si bien el calentamiento inicial podría exacerbar el riesgo al acortar el PIE y aumentar la competencia vectorial, el calor extremo proyectado para finales de siglo podría superar los umbrales térmicos superiores del vector, concentrando la transmisión en períodos con temperaturas óptimas (~29°C) y generando desaceleraciones estacionales durante los picos de calor

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático, marcado por el aumento constante de las temperaturas globales y la creciente frecuencia de eventos climáticos extremos, representa uno de los retos más importantes para la salud pública en el siglo XXI ((Peña-García et al., 2023). Sus efectos se intensifican especialmente en regiones ecológicamente vulnerables como la Amazonía brasileña. Este vasto ecosistema, caracterizado por condiciones climáticas cálidas, una biodiversidad excepcional y una acelerada urbanización, crea una combinación que favorece la aparición y reaparición de enfermedades transmitidas por vectores ((Chouin-Carneiro et al., 2020; Heath et al., 2025).

Un actor clave en esta problemática es el mosquito *Aedes aegypti*, principal transmisor de arbovirus de alta relevancia global, como el dengue (DENV), el Zika (ZIKV) y el chikungunya (CHIKV) (Delrieu et al., 2023). Brasil, y en particular su región amazónica, enfrenta una carga elevada de estas enfermedades debido a la concurrencia de factores climáticos propicios, una rápida expansión urbana, la presencia endémica de los virus y unas condiciones socioambientales que potencian la proliferación del vector (Heath et al., 2025; de Oliveira et al., 2023). Por lo tanto, entender los factores que influyen en la dinámica poblacional del mosquito y su capacidad para transmitir enfermedades es esencial para desarrollar estrategias de salud pública eficaces y minimizar su impacto.

Dentro de estos factores, la temperatura ambiental se destaca como uno de los determinantes abióticos más importantes para los insectos ectotermos como el *Aedes aegypti*. Afecta prácticamente todos los aspectos de su ciclo biológico: desde las tasas de desarrollo, supervivencia y reproducción hasta su comportamiento de picadura y la capacidad del virus de replicarse dentro del insecto (Mordecai et al., 2019; Bellone & Failloux, 2020). Con el cambio climático generando un aumento en las temperaturas medias y alteraciones en los patrones estacionales, es probable que se produzcan modificaciones significativas en la ecología del vector y en la dinámica epidemiológica de las enfermedades que transmite (Xu et al., 2020; Robert et al., 2020).

Para prever cómo estas variaciones pueden incidir en la distribución y abundancia del vector, los investigadores han implementado modelos de nicho climático y distribución de especies. Estas herramientas permiten identificar los factores ambientales que limitan la presencia de una especie, proyectar su posible distribución bajo diferentes escenarios climáticos y evaluar la importancia relativa de variables como temperatura, precipitación y factores antrópicos (Carbajo et al., 2019; Kraemer et al., 2019). En el caso del *Aedes aegypti*, existe consenso en que la temperatura es el factor abiótico más influyente para determinar su nicho fundamental: el rango de condiciones

ambientales que le permiten sobrevivir y reproducirse (Mordecai et al., 2019). Este mosquito puede desarrollarse entre los umbrales térmicos de aproximadamente 10-12 °C y 38-40 °C, con un rango óptimo situado entre 22 °C y 30 °C, donde se maximizan sus tasas de desarrollo, supervivencia y fecundidad (Heath et al., 2025; Liu et al., 2023).

Esta revisión se inscribe en el campo de la salud pública veterinaria, disciplina que, contrariamente a lo que pudiera pensarse, no se limita al estudio de enfermedades de los animales domésticos o silvestres. Por el contrario, una de sus áreas centrales es la epidemiología de las enfermedades transmitidas por vectores, incluyendo el análisis de los determinantes ambientales, la dinámica poblacional de los vectores y la evaluación del riesgo de transmisión a poblaciones humanas y animales (Zinsstag et al., 2011; Mackenzie & Jeggo, 2019). El mosquito *Aedes aegypti* es un vector de relevancia para la salud pública veterinaria porque: (i) puede transmitir arbovirus que afectan tanto a humanos como a animales no humanos (ej. fiebre amarilla en primates, Mayaro en roedores y aves); (ii) su ecología está determinada por factores ambientales y antrópicos que son objeto de estudio de la medicina veterinaria preventiva; y (iii) su control requiere intervenciones que se enmarcan en las competencias de los equipos de salud pública veterinaria, como la gestión ambiental, el manejo integrado de plagas y la educación sanitaria (Day, 2016). En este sentido, el presente trabajo, al analizar el efecto del cambio de temperatura sobre la dinámica poblacional de *Ae. aegypti* y la transmisión de dengue, Zika y chikungunya en la Amazonía brasileña, aporta evidencia directamente relevante para la salud pública veterinaria, particularmente para el diseño de estrategias de vigilancia entomológica, sistemas de alerta temprana y medidas de control vectorial basadas en el clima. Así, el enfoque epidemiológico y de modelación adoptado no solo es compatible con la medicina veterinaria, sino que constituye uno de sus núcleos de acción en el contexto de las enfermedades transmitidas por vectores.

En este contexto, la Amazonía brasileña representa un caso particular. Es una región naturalmente cálida y húmeda donde el *Aedes aegypti* ya está establecido y las temperaturas suelen mantenerse dentro del rango óptimo durante gran parte del año. Sin embargo, se proyecta que el cambio climático podría incrementar las temperaturas más allá de este intervalo favorable, generando un impacto desigual. Mientras algunas áreas podrían volverse más propicias para la transmisión en ciertos periodos del año, otras podrían alcanzar temperaturas que excedan los límites superiores para la supervivencia del vector o la replicación viral (Heath et al., 2025). Estas dinámicas complejas subrayan la necesidad de una evaluación crítica basada en evidencias científicas. Por todo lo anterior, esta revisión sistemática tiene como propósito analizar a fondo las investigaciones disponibles para responder a la pregunta: ¿De qué manera afecta el cambio en las temperaturas ambientales a la dinámica poblacional del mosquito *Aedes aegypti* y, por ende, a la transmisión de enfermedades zoonóticas en la región amazónica de Brasil?

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Búsqueda bibliográfica y criterios de inclusión y exclusión.**

En esta monografía se propone analizar el efecto del cambio de temperatura ambiental en las poblaciones de *Aedes aegypti* y la influencia que este tiene en la transmisión de enfermedades zoonóticas en la zona amazónica de Brasil, y para poder lograr esto se implementará una metodología de revisión sistemática de la literatura científica.

Se realizará una revisión detallada de la literatura científica publicada en los últimos años, los estudios relevantes serán identificados mediante búsquedas estratégicas en las bases de datos bibliográficas.

Los estudios relevantes que se van a usar serán identificados mediante búsquedas estratégicas en las siguientes bases de datos bibliográficas: PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, LILACS (Literatura Latinoamericana y del Caribe en Ciencias de la Salud), Springer Nature Link y Google Scholar. Se utilizarán las siguientes palabras clave y sus combinaciones en los idiomas inglés, español y portugués: "*Aedes aegypti*", "temperature", "Transmission" y "epidemiology", para poder tener una buena información sobre la problemática de esta monografía.

Se examinarán de forma independiente títulos y resúmenes, y luego los textos completos, aplicando criterios de inclusión: estudios observacionales, estudios experimentales y de cohorte definiéndolos los años en un rango desde 2020 hasta 2025. Y exclusión: se excluirán las revisiones sistemáticas y estudios menores al año 2020 además se extraerá información clave de los estudios incluidos: características del estudio, variables de temperatura, mediciones del mosquito, datos de enfermedades y principales hallazgos. Los resultados se sintetizarán de forma cualitativa, agrupándolos por temas para identificar patrones y vacíos en la evidencia para así llegar a una conclusión.

Esta revisión sistemática se llevó a cabo siguiendo los lineamientos de la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analyses) de 2020.

## 2.1. Criterios de Elegibilidad

- Criterios de Inclusión:
  - Estudios que investiguen el efecto de la temperatura en *Aedes aegypti*.
  - Estudios que analicen la incidencia o el riesgo de transmisión de DENV, ZIKV o CHIKV en relación con la temperatura.
  - Estudios realizados en Brasil, con especial énfasis en la región amazónica, o cuyos resultados sean directamente aplicables a este contexto ecológico.
  - Artículos publicados en inglés o portugués.
  - Artículos incluidos en el corpus documental proporcionado.
  - Criterios de Exclusión:
    - Estudios centrados únicamente en otras especies de mosquitos sin relevancia directa para *Ae. aegypti*.
    - Revisiones narrativas, editoriales, cartas al editor o resúmenes de congresos.
    - Estudios que no incluyeran la temperatura como variable principal o predictora.

## 2.2. Fuentes de Información y Estrategia de Búsqueda

Se utilizó una colección predeterminada de 28 artículos científicos en formato PDF, proporcionados como base para esta revisión. Estos artículos cubren una amplia gama de tópicos relacionados con arbovirus, *Aedes spp.* y factores climáticos. Aunque no se realizó una búsqueda en bases de datos en tiempo real, la selección de artículos se considera representativa de la literatura relevante publicada entre 2017 y 2025.

## 2.3. Proceso de Selección.:

Tamizaje de títulos y resúmenes: Se revisaron los títulos y resúmenes para identificar aquellos que abordaban explícitamente la relación entre temperatura y *Ae. aegypti* en Brasil o en contextos amazónicos, o que presentaran modelos generalizables a esta región.

Evaluación de texto completo: Los artículos preseleccionados se leyeron en su totalidad para confirmar su elegibilidad según los criterios establecidos. Se extrajeron los datos pertinentes para los objetivos de la revisión.

## 2.4. Proceso de Extracción de Datos

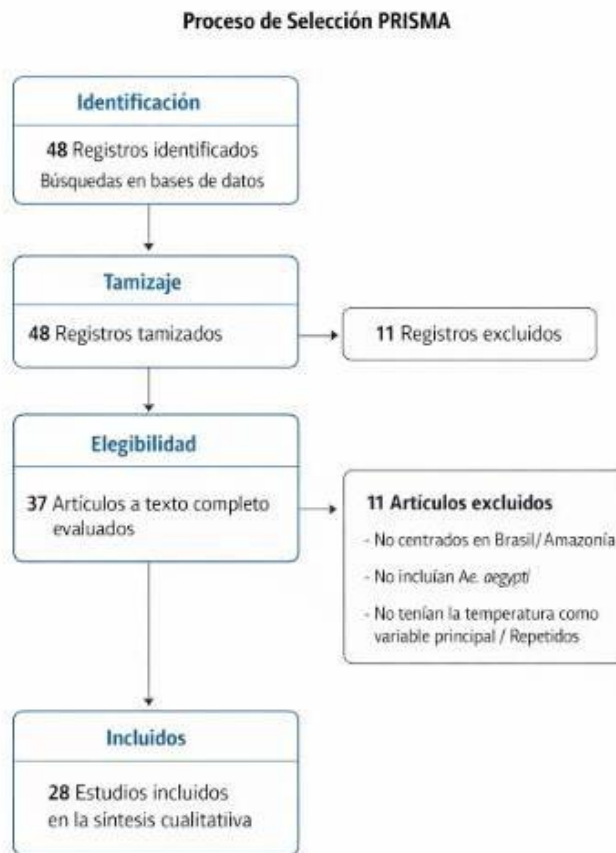
De cada estudio incluido se extrajo la siguiente información: autor(es), año de publicación, objetivo del estudio, ubicación (si aplicaba), tipo de estudio (experimental, modelación, epidemiológico), variables climáticas consideradas (con énfasis en temperatura), variables de respuesta (parámetros del mosquito, incidencia de casos, R0) y principales hallazgos relacionados con los objetivos de esta revisión.

## 2.5. Síntesis de la Evidencia

Dada la heterogeneidad de los diseños de estudio (experimentales, de modelación, epidemiológicos), se realizó una síntesis narrativa (cualitativa) de los resultados. Los hallazgos se agruparon y presentan en función de los tres objetivos específicos de la revisión.

### 3. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

Selección de Estudios: El proceso de selección se resume en el diagrama de flujo PRISMA (Figura 1). De los 48 artículos iniciales, 28 cumplieron con los criterios de inclusión y fueron seleccionados.



*Ilustración 1 Diagrama de Flujo PRISMA del proceso de selección de estudios*

Se ha empleado el término "enfermedades zoonóticas" para referir al dengue, Zika y chikungunya. Sin embargo, en sentido estricto, estas enfermedades no son zoonosis clásicas en sus ciclos urbanos, ya que se transmiten principalmente de persona a persona a través de *Aedes aegypti*, sin requerir un reservorio animal vertebrado para su mantenimiento. Se mantuvo el término porque en la Amazonía estos virus coexisten con ciclos selváticos donde participan reservorios animales (primates, roedores), otorgándoles un potencial zoonótico real. Además, en el lenguaje de la salud pública brasileña y en la literatura regional, es común agruparlas como "arbovirosis zoonóticas" por su origen y por compartir estrategias de prevención. Para efectos de esta revisión, se considera "zoonótica" en un sentido amplio: toda enfermedad transmitida por un vector que pueda mantener ciclos enzoóticos en la naturaleza y que tenga potencial de saltar a humanos. Esta aclaración no invalida nuestros hallazgos, sino que invita a interpretarlos con mayor rigor ecológico.

Los resultados confirman que la temperatura modula fuertemente la dinámica de *Ae. aegypti* y la transmisión de dengue, Zika y chikungunya en la Amazonía. Sin embargo, el uso del término "zoonóticas" merece una reflexión adicional. En estricto rigor, estas tres enfermedades no son zoonosis puras en el ámbito urbano, pues el ser humano actúa como principal reservorio y amplificador. No obstante, en la Amazonía confluyen ciclos selváticos y urbanos. Por ejemplo, se ha documentado circulación de ZIKV y CHIKV en primates no humanos en África y Asia, y en Brasil existe un ciclo selvático bien establecido para la fiebre amarilla, transmitida por mosquitos del género *Haemagogus*. Aunque para el dengue el ciclo selvático es poco relevante en América, la creciente deforestación y urbanización acercan cada vez más a humanos, vectores y posibles reservorios animales. Esta

interfaz es particularmente dinámica en la Amazonía. Por lo tanto, el término "zoonóticas", aunque no sea taxonómicamente exacto para el dengue en su ciclo urbano, resulta útil para recordar que el riesgo de futuras emergencias desde reservorios silvestres no es despreciable. Así, esta revisión aporta no solo al entendimiento del cambio climático y la salud pública, sino también a la vigilancia de la interfaz humano-animal-ambiente en un hotspot de biodiversidad

### **Relación entre la Temperatura y la Tasa de Reproducción del *Aedes aegypti* en la Amazonía**

La relación entre la temperatura y los parámetros reproductivos del mosquito *Aedes aegypti* es compleja, no lineal y depende en gran medida del rango térmico. Una revisión sistemática y metaanálisis realizado por Liu et al. (2023) confirma que el tiempo de desarrollo desde huevo hasta adulto disminuye con el aumento de la temperatura entre 20°C y 30°C. En estudios experimentales realizados con poblaciones de Brasil, se ha demostrado que este tiempo de desarrollo se reduce significativamente, pasando de 41 días a 16°C a tan solo 10 días a 36°C, aunque con variaciones entre poblaciones de diferentes regiones bioclimáticas (Marinho et al., 2016). Este acortamiento del ciclo de vida también se asocia con un aumento en la viabilidad de los estadios inmaduros, alcanzando niveles superiores al 80% en rangos térmicos entre 22°C y 33°C (Marinho et al., 2016). Estas dinámicas tienen implicaciones relevantes para la región amazónica, donde las temperaturas constantes entre 25°C y 30°C durante la mayor parte del año permiten ciclos reproductivos más rápidos y generan una alta densidad poblacional del mosquito, creándose un escenario favorable para la transmisión de arbovirus. (Pereira et al., 2025)

La temperatura no solo acelera el desarrollo del insecto, sino que también incide directamente en la tasa de oviposición y la frecuencia de picaduras. Según Heath et al., (2025), el aumento de la temperatura acelera el ciclo gonotrófico, reduciendo el tiempo entre cada ingesta de sangre y aumentando la frecuencia con la que las hembras buscan hospedadores. En condiciones experimentales, se ha observado que *Aedes aegypti* alcanza máximos de fecundidad entre 26°C y 28°C, con hasta 262 huevos por hembra en regiones cálidas, mientras que este número descende drásticamente a menos de cuatro huevos por hembra a temperaturas alrededor de 16°C (Marinho et al., 2016). Este escenario es especialmente relevante en la Amazonía, donde las temperaturas promedio anuales están dentro del rango óptimo para la reproducción del mosquito. Esto no solo favorece ciclos generacionales más rápidos, sino también una mayor producción de huevos, lo que resulta en una capacidad ampliada para el crecimiento de las poblaciones del vector. (Liu et al., 2023)

Sin embargo, es importante considerar que los efectos de la temperatura sobre estos mosquitos no son lineales y presentan límites superiores que pueden tener efectos restrictivos. Un estudio experimental realizado por Terradas et al. (2024) reveló que, si bien *Aedes aegypti* puede infectarse y replicar el virus del dengue (DENV) con eficiencia a 32°C, los índices de mortalidad fueron notablemente más altos en comparación con los registrados a 27°C. Este hallazgo evidencia un desequilibrio clave para la transmisión: aunque las altas temperaturas aceleran el desarrollo, también podrían disminuir la longevidad de los adultos, afectando su capacidad para sobrevivir el tiempo necesario para completar el período de incubación extrínseca (PIE) del virus. Por ejemplo, datos experimentales sobre el virus Zika indican que el PIE se reduce significativamente al aumentar la temperatura, pasando de 24.2 días a 21°C hasta solo 5.1 días a 30°C (Winokur et al., 2020). Sin embargo, si las temperaturas elevadas ocasionan un aumento desproporcionado en la mortalidad de los mosquitos, esto podría contrarrestar los beneficios derivados de un PIE más corto. Este equilibrio delicado entre desarrollo acelerado y supervivencia se vuelve especialmente crítico en la Amazonía, donde las temperaturas actuales están cercanas al óptimo térmico para el mosquito, y cualquier aumento adicional podría desplazar las condiciones hacia umbrales subóptimos. (Bhatia et al., 2022)

Modelos que ayudan a entender estas dinámicas a escala regional. Según un estudio realizado por Heath et al. (2025), en la Región Norte de Brasil (incluida la Amazonía) se proyecta un aumento modesto en la densidad de mosquitos hasta mediados del siglo, seguido por una posible disminución bajo un escenario climáticamente extremo (SSP5-8.5) para el año 2080. Mientras que se espera un incremento en la densidad poblacional del 13% para el 2050, este porcentaje cae al 9% hacia 2080, lo que sugiere una desaceleración del crecimiento poblacional en las últimas décadas del siglo debido a que las temperaturas ya elevadas en la Amazonía podrían alcanzar (Xu et al., 2017)

En un estudio experimental de Marinho et al. (2016), reportó el efecto de cinco temperaturas constantes (16°C, 22°C, 28°C, 33°C y 36°C) sobre la duración de los estadios larval, pupal y el desarrollo completo (desde huevo

hasta adulto emergido) en tres poblaciones de *Aedes aegypti* provenientes de diferentes regiones bioclimáticas de Brasil: Campina Grande (Agreste), João Pessoa (Mata Atlántica) y Patos (Sertão). Los resultados muestran la relación inversa entre la temperatura y el tiempo de desarrollo en todos los estadios. Por ejemplo, la duración media del desarrollo completo se redujo drásticamente desde valores mayores a 36 días a 16°C hasta aproximadamente 10 días a 36°C. Este patrón se observó también en los estadios larval y pupal, donde los tiempos de desarrollo disminuyeron consistentemente con el aumento de la temperatura. Observó diferencias significativas en el desarrollo completo a 16°C y 22°C, evidenciando desarrollo más rápido (36,28 días y 20,91 días, respectivamente). Sin embargo, a temperaturas más cálidas (28°C, 33°C y 36°C), las diferencias entre poblaciones no fueron estadísticamente significativas, lo que sugiere que el efecto de la temperatura sobre el tiempo de desarrollo tiende a homogeneizarse dentro del rango óptimo de temperatura. (Tabla 1). Estos hallazgos son fundamentales para comprender la dinámica poblacional del vector en la Amazonía, donde las temperaturas se mantienen consistentemente en rangos que aceleran el desarrollo, permitiendo una rápida sucesión generacional y una alta densidad poblacional basal. (Madeira Rosa et al., 2024)

Tabla 1 Desarrollo en días de los estadios larval y pupal, así como del desarrollo completo (huevo a adulto) en poblaciones de *Aedes aegypti* de Campina Grande, João Pessoa y Patos.

Localidad	Temperatura (°C)					Media General
	16°C	22°C	28°C	33°C	36°C	
<b>Estadio larval</b>						
<b>Campina Grande</b>	20.51 ± 1.45	13.40 ± 0.54	6.16 ± 0.63	6.70 ± 0.37	5.17 ± 0.79	10.39 ± 6.0
<b>João Pessoa</b>	19.86 ± 0.70	12.49 ± 0.49	7.20 ± 0.46	6.12 ± 0.72	5.26 ± 0.35	10.19 ± 5.58
<b>Patos</b>	20.19 ± 1.01	12.12 ± 0.49	7.25 ± 0.30	7.12 ± 0.38	5.43 ± 0.97	10.42 ± 5.5
<b>Estadio pupal</b>						
<b>Campina Grande</b>	6.97 ± 1.53	3.68 ± 0.70	2.08 ± 0.48	2.51 ± 0.33	1.29 ± 0.30	3.30 ± 2.16
<b>João Pessoa</b>	5.95 ± 0.74	3.25 ± 0.50	2.16 ± 0.69b	2.69 ± 0.27	1.50 ± 0.39	3.11 ± 1.64
<b>Patos</b>	7.06 ± 1.61	3.38 ± 0.91	2.51 ± 0.34	1.88 ± 0.16	1.30 ± 0.18	3.22 ± 2.21
<b>Desarrollo completo</b>						
<b>Campina Grande</b>	41.42 ± 2.56	24.76 ± 1.06	11.59 ± 0.57	11.92 ± 0.43	10.13 ± 1.29	19.96 ± 12.2
<b>João Pessoa</b>	36.28 ± 1.63	20.91 ± 0.54	12.52 ± 0.49	11.43 ± 0.64	10.67 ± 1.40	18.36 ± 9.93
<b>Patos</b>	38.82 ± 1.46	23.42 ± 1.46	13.08 ± 0.60	13.24 ± 0.46	9.33 ± 0.90	19.58 ± 10.9

Fuente: Adaptado de Marinho et al. (2016, Tabla 1).

## Impacto de los Cambios de Temperatura en la Distribución Geográfica del *Aedes aegypti* en la Amazonía

Para entender cómo las variaciones de temperatura impactan la distribución geográfica de *Aedes aegypti* es fundamental partir del concepto de nicho fundamental. Este se define como el conjunto de condiciones ambientales donde una especie puede sobrevivir y reproducirse en ausencia de interacciones biológicas como competencia o depredación. En el caso de este mosquito, la literatura científica coincide en que la temperatura es el factor abiótico más determinante para delimitar su distribución geográfica potencial (Mordecai et al., 2019; Bellone y Failloux, 2020). El nicho fundamental de *Aedes aegypti* está marcado por su tolerancia térmica: requiere temperaturas que no bajen de los 10-12°C para completar su desarrollo larvario y que no superen los 38-40°C para garantizar la supervivencia de los adultos (Heath et al., 2025; Liu et al., 2023). En este marco, los modelos de nicho climático y de distribución de especies se han consolidado como herramientas clave para identificar las barreras ambientales que restringen la presencia de esta especie. (Zhang et al., 2025)

En estudio realizado por Carbajo et al. (2019), que se centró en el límite sur del área de distribución de *Aedes aegypti* en Sudamérica, específicamente en Argentina, identificó que la temperatura media anual y la densidad poblacional son los únicos factores estadísticamente significativos para predecir la presencia de este vector a escala regional. Este hallazgo subraya la importancia de la temperatura como un filtro ecológico clave, dado que solo los asentamientos humanos situados en zonas con un rango térmico adecuado pueden sostener poblaciones estables de mosquitos. Este principio podría aplicarse también a otras regiones tropicales, como la Amazonía brasileña, donde las condiciones climáticas actuales ya son favorables para el vector. Sin embargo, un aumento adicional de las temperaturas podría llevar a ciertas áreas más allá de los límites térmicos óptimos, perjudicando la idoneidad estacional y reduciendo la densidad poblacional de los mosquitos (Heath et al., 2025).

En cuanto a la distribución geográfica, la Amazonía ya constituye el núcleo del hábitat del vector. El impacto principal del cambio climático no será tanto una expansión masiva hacia el norte (que es océano) o el oeste (Andes), sino una intensificación y alteración de los patrones estacionales de abundancia y transmisión dentro de la propia cuenca. El estudio de Carbajo et al. (2019) en el Cono Sur ilustra cómo el calentamiento puede erosionar barreras térmicas; en la Amazonía, el proceso es análogo pero interno: las barreras estacionales (como un "invierno" ligeramente más frío y seco) podrían debilitarse, permitiendo una circulación viral más temprana y prolongada cada año (Robert et al., 2020; Lee et al., 2021)

Por su parte, los modelos globales desarrollados por Mordecai et al. (2019) y Ryan et al. (2019) proyectan un panorama de redistribución del riesgo asociado a las enfermedades transmitidas por vectores, con variaciones importantes según las regiones. En áreas tropicales cálidas, el incremento de la temperatura no siempre resultará en una mayor transmisión de enfermedades. Superar el umbral térmico óptimo cercano a los 29 °C para virus como el dengue (DENV) y el Zika (ZIKV) puede disminuir tanto la eficiencia de transmisión como la supervivencia del mosquito. Por lo tanto, es probable que aparezcan patrones bimodales de transmisión, con picos marcados al inicio y al final de los periodos cálidos, en lugar de una transmisión constante a lo largo del año, tal como respaldan proyecciones recientes (Heath et al., 2025). Aunque es posible que la distribución geográfica del vector se mantenga relativamente estable, es previsible que ocurran transformaciones significativas en su dinámica estacional y en el impacto epidemiológico sobre las poblaciones humanas

En el contexto específico de la Amazonía, *Aedes aegypti* ya está presente en gran parte del territorio. Sin embargo, el cambio climático podría alterar los patrones estacionales de su abundancia e incluso extender su rango altitudinal hacia las estribaciones andinas amazónicas. Investigadores señalan que el ascenso en las temperaturas mínimas invernales podría ser decisivo para que el vector persista en áreas donde tradicionalmente desaparecía o entraba en diapausa durante estas temporadas más frías (Vassoler et al., 2025). Aunque en zonas como la Amazonía —donde los inviernos son menos marcados— los efectos sobre la expansión latitudinal podrían ser menores, estos cambios serían críticos para modificar la estacionalidad del vector. (Vassoler et al., 2025)

Para prever los impactos del cambio climático, la comunidad científica recurre a los Escenarios de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por su sigla en inglés). Estos marcos analíticos no pretenden ofrecer predicciones absolutas, sino que presentan narrativas plausibles sobre la evolución global a lo largo del siglo XXI. Su construcción se basa en la interacción de diversas variables estructurales, como la dinámica demográfica, el crecimiento económico, el avance tecnológico, los sistemas de gobernanza y las decisiones relacionadas con las fuentes energéticas (Riahi et al., 2017). Mediante estos escenarios, los investigadores estructuran modelos climáticos que muestran cómo distintos caminos de desarrollo humano pueden moldear el futuro del entorno global.

Cada SSP refleja el volumen de energía retenida por los gases de efecto invernadero en la atmósfera para finales de siglo. Este enfoque permite a los científicos contrastar potenciales cambios el futuro en función de las decisiones actuales. Por ejemplo, el SSP1-2.6 describe un escenario sostenible y optimista con bajas emisiones y estrategias efectivas de mitigación, mientras que el SSP5-8.5 plantea un panorama crítico, marcado por un crecimiento económico acelerado basado en la dependencia de combustibles fósiles y niveles extremos de emisiones.

El uso comparativo de diversos SSP es clave para las investigaciones en salud ambiental, ya que ayuda a comprender las incertidumbres asociadas con las decisiones humanas frente a diferentes futuros posibles (Xu et al., 2020). A través de estos modelos, es factible analizar cómo las políticas climáticas influirán en riesgos

emergentes, como la expansión geográfica de vectores de enfermedades (Van Wyk et al., 2022). Por ejemplo, un estudio de Heath et al. (2025) calculó que trasladarse de un escenario de altas emisiones como el SSP5-8.5 a uno con estrictas medidas mitigadoras como el SSP1-2.6 podría reducir el aumento proyectado en la densidad del mosquito *Aedes aegypti* para 2080 del 31 % al 11 %. Esto evidencia cómo los SSP funcionan como herramientas clave para diseñar políticas públicas adaptativas y fundamentadas frente a la incertidumbre climática.

En este contexto, las proyecciones del cambio relativo en la densidad media anual de *Aedes aegypti* en las cinco regiones geográficas de Brasil (Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste y Sur) tomando como referencia diferentes escenarios establecidos por las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP). Estas proyecciones abarcan los años 2030, 2050 y 2080, comparando siempre con una línea base correspondiente al año 2024. Los escenarios contemplados incluyen un rango que parte desde un futuro sostenible con bajas emisiones (SSP1-2.6) hasta uno con un alto nivel de crecimiento económico basado en combustibles fósiles y sin esfuerzos por mitigar el cambio climático (SSP5-8.5), además de otros dos escenarios intermedios (SSP2-4.5 y SSP3-7.0). Un hallazgo particularmente importante surge al analizar el comportamiento proyectado para la Región Norte, que incluye la Amazonía brasileña Heath et al., 2025

En el escenario más pesimista (SSP5-8.5), la densidad de mosquitos en esta región muestra un aumento moderado del 13 % para 2050, pero este crecimiento se reduce a apenas un 9 % para 2080. Esta desaceleración sugiere que las temperaturas extremadamente altas podrían acercarse o incluso superar los límites térmicos óptimos para el desarrollo y supervivencia del *Aedes aegypti* (Mordecai et al., 2019), como se mencionó anteriormente. En contraste, las regiones Sureste y Sur (caracterizadas por climas más templados en la actualidad) experimentarían mayores incrementos relativos en densidad de mosquitos, alcanzando hasta un 92 % en el Sureste bajo el escenario SSP5-8.5 debido a que las condiciones climáticas se tornarían más favorables para esta especie. Este análisis regional enfatiza la desigualdad en los impactos del cambio.

De tal manera que, la convergencia de la evidencia experimental y de modelación con los estudios epidemiológicos observacionales (Duarte et al., 2019) es particularmente sólida. La asociación con rezago entre el aumento de la temperatura mínima y los casos de dengue es una confirmación de los mecanismos biológicos descritos en el laboratorio. Esto valida el uso de modelos predictivos basados en la temperatura como herramientas para la salud pública

### ***Efecto de la Temperatura en la Transmisión de Arbovirus en la Amazonía***

La temperatura juega un papel crucial en la dinámica de los arbovirus como el Dengue, Zika y Chikungunya, no solo afectando la cantidad de vectores presentes, sino también su capacidad intrínseca para adquirir, replicar y transmitir estos virus, conocida como competencia vectorial. Diversos estudios experimentales han demostrado que la relación entre temperatura y competencia vectorial sigue un patrón no lineal, dependiente del rango térmico, lo cual conlleva implicancias significativas para la transmisión de arbovirus en la región amazónica brasileña. Este es el punto de convergencia de la ecología del vector y la salud pública. La temperatura no solo afecta cuántos mosquitos hay, sino también la probabilidad de que un mosquito se convierta en transmisor efectivo del virus Winokur et al. (2020),.

Dentro de un rango de temperaturas aproximado entre 22°C y 30°C, el incremento térmico actúa como un acelerador metabólico en los mosquitos. Este calentamiento promueve un desarrollo larval más rápido, acorta el ciclo gonotrófico, aumenta la fecundidad y reduce de manera significativa el período de incubación extrínseca del virus. Como resultado, se produce un aumento de mosquitos infectados y listos para transmitir la enfermedad en menor tiempo, lo que incrementa el riesgo de brotes epidémicos. Modelos matemáticos como el R0 reflejan esta dinámica acelerada. Sin embargo, cuando las temperaturas superan los 32°C a 35°C, se observan efectos adversos sobre las poblaciones de mosquitos, ya que la elevada mortalidad en adultos y la disminución de la viabilidad en estadios inmaduros limitan su persistencia (Simon & Rangel, 2021).

En el caso específico de la Amazonía, temperaturas extremas podrían actuar como un limitante para la proliferación de vectores y su capacidad de transmitir enfermedades durante los periodos de mayor calor. Aunque esto podría sugerir una reducción del riesgo continuo, tal cambio implica una transmisión estacional concentrada en tiempos específicos donde las condiciones térmicas son óptimas. Por ello, es fundamental adaptar las

estrategias de vigilancia para estos cambios en el patrón epidemiológico, dado que las poblaciones humanas seguirían enfrentando riesgos considerables (Simon & Rangel, 2021).

La relación entre la temperatura ambiental y el tiempo necesario para que los mosquitos *Aedes aegypti* adquieran la capacidad de transmitir el virus Zika (ZIKV), un parámetro conocido como período de incubación extrínseca (PIE). Los resultados, obtenidos del estudio experimental de Winokur et al. (2020), muestran el porcentaje acumulado de mosquitos que transmiten ARN viral en función de los días posteriores a la ingesta de una sangre infectada, para tres temperaturas constantes (21°C, 26°C y 30°C). Se excluyeron los datos a 18°C debido a la baja transmisión observada, con solo un 15% de los mosquitos transmitiendo el virus al día 31 post-infección. Los hallazgos revelan un efecto drástico de la temperatura sobre la velocidad de transmisión: el tiempo medio necesario para que el 50% de los mosquitos se vuelvan infecciosos (EIP50) se reduce de manera exponencial al aumentar la temperatura, pasando de 24,2 días a 21°C a 9,6 días a 26°C y alcanzando solo 5,1 días a 30°C. Este acortamiento del PIE tiene profundas implicaciones epidemiológicas, ya que a temperaturas más cálidas los mosquitos se convierten en transmisores efectivos en un período significativamente menor, aumentando la ventana de tiempo durante la cual pueden infectar a hospederos susceptibles antes de que finalice su vida útil. La marcada aceleración del PIE con el incremento térmico constituye un mecanismo clave a través del cual el calentamiento global podría exacerbar el riesgo de transmisión de arbovirus en regiones tropicales como la Amazonía brasileña. (Gráfica 1)

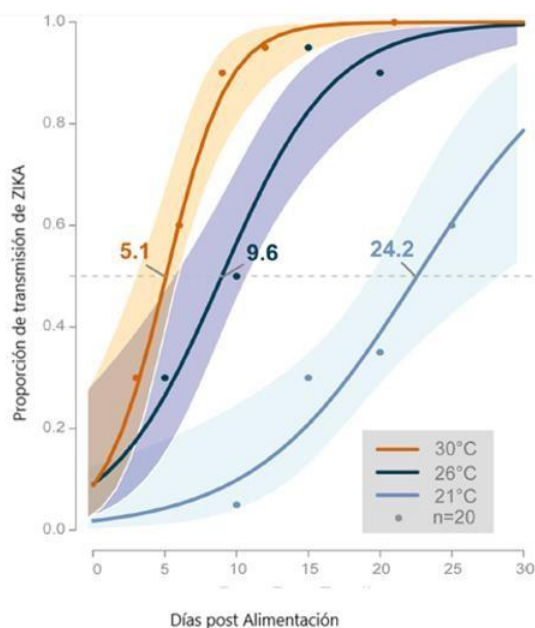


Ilustración 2 Efecto de la temperatura sobre el período de incubación extrínseca del virus Zika en *Aedes aegypti*

### **Efectos de la Temperatura sobre la Competencia Vectorial**

El impacto de la temperatura sobre la competencia vectorial se refleja en tres componentes esenciales: tasa de infección, tasa de diseminación y tasa de transmisión. En investigaciones clave, como el estudio de Winokur et al. (2020), se analizó el efecto de la temperatura sobre el período de incubación extrínseca (PIE) del virus Zika en *Aedes aegypti*. Los resultados mostraron una reducción drástica en el tiempo promedio para que el 50% de los mosquitos se volvieran infecciosos (EIP50), pasando de 24,2 días a 21°C a tan solo 5,1 días a 30°C. Esto implica que a temperaturas más altas los mosquitos pueden transmitir el virus más rápidamente, aumentando las posibilidades de infección antes de morir. A temperaturas más bajas como 18°C, la transmisión fue mínima, con solo un 15% de mosquitos infectando hospederos tras 31 días post-infección.

Estudios realizados en Brasil por Chouin-Carneiro et al. (2020) evidenciaron que la temperatura afecta directamente la transmisión del virus Zika. Las investigaciones compararon poblaciones de mosquitos provenientes de Natal y Río de Janeiro bajo condiciones térmicas variables (22°C y 28°C). Se observó que a 28°C

la eficiencia de transmisión era significativamente mayor: por ejemplo, en Natal pasó del 35,71% a 80,77% al aumentar la temperatura. Además, se detectó que dosis virales más bajas eran suficientes para provocar transmisión a temperaturas mayores. Estos hallazgos son especialmente relevantes para la Amazonía debido a su rango térmico promedio anual, que favorece condiciones óptimas para vectores.

La Figura 2 sintetiza los efectos de la temperatura sobre la capacidad de *Aedes albopictus* para transmitir el virus del dengue (DENV), con base en la evidencia experimental revisada por Liu et al. (2023). Los hallazgos demuestran una relación no lineal y dependiente de umbrales térmicos críticos. Cuando la temperatura desciende por debajo de los 18°C, *Ae. albopictus* no logra transmitir el DENV; a esta temperatura, el virus se localiza exclusivamente en el intestino medio del mosquito, donde prolifera sin lograr diseminarse a otros tejidos. A medida que la temperatura aumenta, entre 23°C y 32°C, el DENV logra atravesar la barrera del intestino medio e invadir las glándulas salivales, completando así el ciclo de transmisión. En el extremo opuesto, cuando la temperatura supera los 32°C, la tasa de mortalidad del mosquito aumenta significativamente, lo que puede limitar la ventana de transmisión a pesar de la mayor competencia vectorial. Un hallazgo particularmente relevante es que a 28°C se potencian las principales vías inmunitarias antivirales del mosquito, incluyendo la vía de ARN interferente (RNAi), la vía Toll y la vía IMD en el intestino medio, lo que sugiere una compleja interacción entre la temperatura, la inmunidad del vector y la replicación viral. Estos umbrales térmicos tienen implicaciones directas para comprender la estacionalidad y la distribución geográfica de la transmisión de DENV mediada por *Ae. albopictus*, particularmente en regiones como la Amazonía donde las temperaturas fluctúan dentro de este rango crítico.

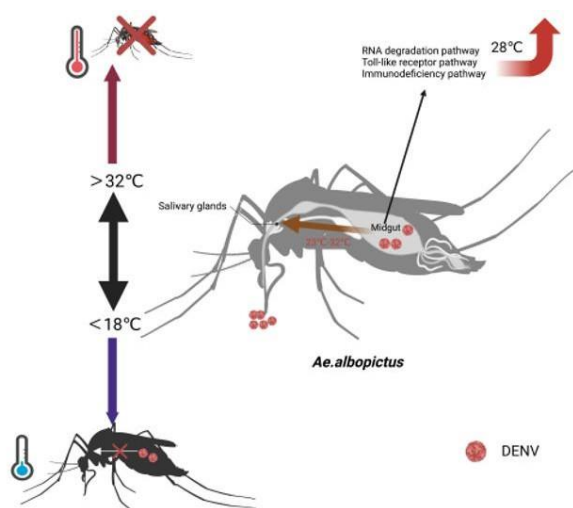


Ilustración 3 Efectos de la temperatura sobre la competencia vectorial de *Ae. albopictus*.

Delrieu et al. (2023) analizó 34 estudios experimentales sobre la transmisión de DENV, ZIKV y CHIKV por *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus*. De estos trabajos, 26 evidenciaron que temperaturas superiores a 28°C incrementan las tasas de infección, diseminación y transmisión. Además, identificaron que altas temperaturas favorecen un acortamiento del PIE y mayor probabilidad de que el virus supere las barreras del intestino medio y glándulas salivales del mosquito. Estas conclusiones refuerzan la importancia crítica que tienen las variaciones térmicas en los modelos epidemiológicos aplicados a regiones tropicales como la Amazonía (Nik Abdull Halim et al., 2022). (Tabla 2)

Tabla 2 Tasas de infección, diseminación y transmisión de ARN de ZIKV por temperatura y punto temporal.

Temp (°C)	Días Post-Alimentación	Infectados (%)	Diseminados (%)	Transmisión (%)
18	21	18/20 (90)	8/20 (40)	2/20 (10)

	25	20/20 (100)	5/20 (25)	0/20 (0)
	31	20/20 (100)	11/20 (55)	3/20 (15)
<b>21</b>	10	20/20 (100)	11/20 (55)	1/20 (5)
	15	18/20 (90)	18/20 (90)	6/20 (30)
	20	20/20 (100)	20/20 (100)	7/20 (35)
	25	20/20 (100)	18/20 (90)	12/20 (60)
<b>26</b>	5	19/20 (95)	15/20 (75)	6/20 (30)
	10	20/20 (100)	20/20 (100)	10/20 (50)
	15	20/20 (100)	20/20 (100)	19/20 (95)
	20	20/20 (100)	20/20 (100)	18/20 (90)
<b>30</b>	3	16/20 (80)	15/20 (75)	6/20 (30)
	6	20/20 (100)	20/20 (100)	12/20 (60)
	9	20/20 (100)	20/20 (100)	18/20 (90)
	12	20/20 (100)	20/20 (100)	19/20 (95)
	21	20/20 (100)	20/20 (100)	20/20 (100)

Fuente: Adaptado de Nik Abdull Halim *et al.* (2022, Tabla 2).

### **Potencial Epidémico (R0) y Proyecciones para la Amazonía**

Los modelos científicos han considerado el impacto de la temperatura en diversos parámetros relacionados tanto con los vectores (como supervivencia, frecuencia de picaduras y fecundidad) como con los patógenos (intervalo de extrínseco de incubación y competencia), para calcular el número básico de reproducción (R0). Esta métrica se utiliza para estimar el potencial de transmisión de enfermedades. Según el análisis realizado por Mordecai *et al.* (2019) en 15 sistemas vector-patógeno, el R0 para el dengue (DENV) y el zika (ZIKV), ambos transmitidos por el mosquito *Aedes aegypti*, alcanza su nivel óptimo a aproximadamente 29°C. El rango térmico viable para la transmisión oscila entre 17.8°C y 34.5°C en el caso del DENV, y entre 22.8°C y 34.5°C para ZIKV, valores que coinciden con las condiciones climáticas predominantes en gran parte de la Amazonía brasileña.

A partir de estos modelos, Van Wyk *et al.* (2022) realizaron proyecciones sobre los cambios estacionales del R0 para el dengue y el zika en cuatro ciudades brasileñas, incluyendo Manaus, ubicada en pleno corazón de la Amazonía. Sus hallazgos sugieren que entre 2045 y 2049, el R0 para el zika en Manaus experimentará incrementos bajo todos los escenarios de cambio climático analizados (SSP126, SSP245, SSP370 y SSP585). En comparación con las cifras históricas registradas (2.1–2.5), se espera que el rango anual se eleve a 2.3–2.7. Por otra parte, Heath *et al.* (2025) proyectaron incrementos generalizados en los valores de R0 en la mayoría de los municipios brasileños, destacando que los aumentos más significativos ocurrirán en las regiones Sur y Sudeste. Para la Amazonía, se prevé un aumento del R0, aunque un calentamiento extremo asociado con altos niveles de emisiones podría frenar la expansión poblacional del vector, llevando a modificaciones en la estacionalidad de la transmisión más que a un incremento sostenido y uniforme de la incidencia. (Mordecai *et al.*, 2017)

### **Evidencia Epidemiológica en la Amazonía Brasileña**

Los datos observacionales corroboran las predicciones basadas en modelos mecanísticos y experimentales. Duarte *et al.* (2019) investigaron la relación entre variables climáticas y la incidencia de dengue en Rio Branco, capital del estado de Acre, situado en la Amazonía occidental brasileña, utilizando modelos GARMA (Generalized Autoregressive Moving Average). Encontraron que tanto el aumento de la temperatura mínima como el incremento de la temperatura compensada tuvieron una asociación estadísticamente significativa con mayores tasas de incidencia de dengue con rezagos de uno y dos meses. En detalle, un aumento de 1°C en la temperatura mínima se vinculó con un incremento del 54% en los casos al mes siguiente (IRR = 1.54; IC 95%: 1.24-1.91). De manera similar, un aumento de 1°C en la temperatura compensada implicó un aumento comparable del 54% durante el mismo mes (IRR = 1.54; IC 95%: 1.22-1.95). Además, se observó que las precipitaciones totales influían positivamente con un rezago de un mes (IRR = 1.21; IC 95%: 1.06-1.39), mientras que temperaturas máximas muy elevadas mostraron un efecto protector (IRR = 0.68; IC 95%: 0.58-0.81), lo que sugiere que el calor extremo

puede limitar la transmisión del dengue. El nivel del río Acre también presentó una asociación positiva significativa en la ausencia de rezagos temporales (IRR = 1.09; IC 95%: 1.02-1.17), lo que refuerza el rol de las inundaciones como generadores de criaderos propicios para los mosquitos transmisores de la enfermedad.

#### 4. CONCLUSIONES

La revisión sistemática realizada evidencia de manera clara que la temperatura ambiental es un factor clave en la dinámica poblacional del mosquito *Aedes aegypti* y, en consecuencia, en la transmisión de arbovirus en la Amazonía brasileña. La relación entre la temperatura y los parámetros biológicos del vector presenta una naturaleza no lineal. Dentro del rango de 20 a 30 °C, el aumento de la temperatura acelera el desarrollo, la reproducción y la frecuencia de picaduras, favoreciendo así una mayor densidad poblacional. Sin embargo, a partir de los 32-35 °C, se observa un incremento en la mortalidad y una desaceleración en el desarrollo, marcando un límite crítico superior. Este comportamiento no lineal tiene importantes implicaciones en la región amazónica, donde las temperaturas actuales (25-28 °C) son altamente favorables para la transmisión de enfermedades. No obstante, con el calentamiento proyectado, se podría generar una desaceleración estacional en lugar de un aumento lineal del riesgo.

En cuanto a la distribución geográfica, los modelos de nicho climático predicen que la presencia de *Ae. aegypti* continuará en la Amazonía, aunque su dinámica estacional experimentará modificaciones significativas. Bajo escenarios de altas emisiones (SSP5-8.5), se espera que los periodos con temperaturas óptimas para la transmisión (~29 °C) se vuelvan más delineados, acompañados de potenciales disminuciones en la idoneidad durante episodios de calor extremo. Este hallazgo desafía la idea simplista de que el calentamiento global siempre fomenta la expansión de este vector; en su lugar, sugiere un escenario más complejo de redistribución temporal del riesgo, sin un aumento uniforme en su área geográfica.

En términos de transmisión de enfermedades, la temperatura desempeña un rol fundamental al influir en la competencia vectorial, ya que acorta el período de incubación extrínseca (PIE) e incrementa las tasas de infección, diseminación y transmisión viral. Aunque se proyecta que el calentamiento intensificará estos efectos y aumentará el potencial epidémico (R0) en gran parte de la región, el riesgo no será homogéneo a lo largo del año. Las olas de calor extremo podrían provocar una desaceleración temporal en la transmisión, mientras que las épocas con temperaturas dentro del rango óptimo concentrarán los picos de actividad epidémica.

En cuanto a las implicaciones para la salud pública y las futuras líneas de investigación, la complejidad de la interacción entre temperatura, vector y enfermedad resalta la necesidad imperante de desarrollar sistemas integrados de vigilancia. Estos deberían combinar datos climáticos en tiempo real con monitoreos entomológicos constantes y vigilancia epidemiológica activa. El establecimiento de tales sistemas posibilitaría anticipar cambios en los patrones estacionales de transmisión y optimizar las estrategias locales y dinámicas para el control del vector en la región amazónica.

El cambio climático no es una amenaza futura lejana para la salud en la Amazonía; ya está modificando la ecología de su principal vector de arbovirus. La adaptación a este nuevo escenario requiere un enfoque proactivo, integrador y basado en la evidencia científica para proteger a las poblaciones de esta región vital.

A partir de los hallazgos de esta revisión, se recomienda crear Sistemas de Alerta Temprana que integren datos de temperatura (observados y proyectados), vigilancia entomológica de la densidad de *Ae. aegypti* y vigilancia epidemiológica de casos sospechosos a escala municipal en la Amazonía, permitiendo anticipar períodos de alto riesgo y optimizar las campañas de control vectorial. Las intervenciones de control vectorial, como la eliminación de criaderos y la fumigación, deben ser dinámicas e intensificarse durante los períodos de mayor riesgo térmico (temperaturas entre 25-30°C), en lugar de aplicarse de manera uniforme durante todo el año, maximizando así su efectividad y eficiencia.

Se recomienda priorizar estudios experimentales con poblaciones amazónicas de *Ae. aegypti* que evalúen el impacto de las fluctuaciones térmicas diarias y estacionales, así como desarrollar modelos de proyección que incorporen escenarios de intervención y factores sociodemográficos locales. Dado que la temperatura puede ejercer presión selectiva sobre los virus, es crucial implementar vigilancia genómica continua para detectar la

aparición de nuevas variantes virales que podrían presentar diferentes tolerancias térmicas o virulencias en el contexto del calentamiento global. Las políticas de mitigación deben trascender el control vectorial e incluir mejoras en saneamiento básico, calidad de la vivienda y educación sanitaria, dirigidas a las poblaciones más vulnerables de la Amazonía, que son las que soportan la mayor carga de estas enfermedades

## 5. AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi mamá Luz, por su amor incondicional, su apoyo constante y su confianza en cada paso de este camino, a mi papá Alonso, por sus consejos, su ejemplo y por enseñarme a perseverar, y a mi abuela Chila, por su ternura y por ser siempre refugio y ánimo en los momentos difíciles.

A mis hermanos, gracias por su compañía, sus risas y por creer en mí, a mis amigos de la universidad, por las horas de estudio, el apoyo mutuo y por hacer de esta etapa una experiencia inolvidable.

A mis profesores, por compartir su conocimiento y orientar mi formación, en especial al profesor Camilo Guarín, quien además de ser un guía académico, se convirtió en un amigo cuya cercanía y apoyo han sido fundamentales para mí. Finalmente, agradezco de corazón al resto de mi familia y a todas las personas conocidas que, de una u otra forma, contribuyeron a que hoy pueda concluir esta etapa.

## 6. DECLARACION DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los autores declaran que no han usado herramientas de inteligencia artificial (IA) en la creación de este artículo

## 7. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bhatia, S., Bansal, D., Patil, S., Pandya, S., Ilyas, Q. M., & Imran, S. (2022). A retrospective study of climate change affecting dengue: Evidences, challenges and future directions. *Frontiers in Public Health*, *10*, 884645. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.884645>
2. Bellone, R., & Failloux, A.-B. (2020). The role of temperature in shaping mosquito-borne viruses transmission. *Frontiers in Microbiology*, *11*, 584846. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.584846>
3. Carbajo, A. E., Cardo, M. V., & Vezzani, D. (2019). Past, present and future of *Aedes aegypti* in its South American southern distribution fringe: What do temperature and population tell us? *Acta Tropica*, *190*, 149–156. <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2018.11.017>
4. Chouin-Carneiro, T., David, M. R., de Bruycker Nogueira, F., dos Santos, F. B., & Lourenço-de-Oliveira, R. (2020). Zika virus transmission by Brazilian *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* is virus dose and temperature-dependent. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, *14*(9), e0008527. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0008527>
5. Delrieu, M., Martinet, J. P., O'Connor, O., Viennet, E., Menkes, C., Burtet Sarramegna, V., ... & Dupont Rouzeyrol, M. (2023). Temperature and transmission of chikungunya, dengue, and Zika viruses: A systematic review of experimental studies on *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*. *Current Research in Parasitology & Vector Borne Diseases*, *3*, 100139. <https://doi.org/10.1016/j.crpvbd.2023.100139>
6. de Oliveira, J. G., Netto, S. A., Francisco, E. O., Vieira, C. P., Variza, P. F., Iser, B. P. M., ... Prophiro, J. S. (2023). *Aedes aegypti* in southern Brazil: Spatiotemporal distribution dynamics and association with climate and environmental factors. *Tropical Medicine and Infectious Disease*, *8*(2), 77. <https://doi.org/10.3390/tropicalmed8020077>
7. Duarte, J. L., Diaz Quijano, F. A., Batista, A. C., & Giatti, L. L. (2019). Climatic variables associated with dengue incidence in a city of the Western Brazilian Amazon region. *Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*, *52*, e20180429. doi: 10.1590/0037-8682-0429-2018

8. Heath, K., Muniz Alves, L., & Bonsall, M. B. (2025). Climate change, urbanisation and transmission potential: *Aedes aegypti* mosquito projections forecast future arboviral disease hotspots in Brazil. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 19(9), e0013415. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0013415>
9. Lee, S. A., Economou, T., Barcellos, C., Catão, R., & Carvalho, M. S. (2021). Effect of climate change, connectivity, and socioeconomic factors on the expansion of the dengue virus transmission zone in 21st century Brazil: An ecological modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 5(12), e902–e912. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00227-8](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00227-8)
10. Liu, Z., Zhang, Q., Li, L., He, J., Guo, J., Wang, Z., ... Li, T. (2023). The effect of temperature on dengue virus transmission by *Aedes* mosquitoes. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 13, 1242173. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2023.1242173>
11. Madeira-Rosa, Y. B., Moschen, H. T. S., Loss, A. C., da Silva, T. C. C., dos Santos, A. P. B., Pimenta, B. C., Nunes Zordan, J. S., Cerutti Junior, C., Miranda, A. E. B., Louro, I. D., Meira, D. D., & Vicente, C. R. (2024). Climate change impacts on dengue transmission areas in Espírito Santo state, Brazil. *Oxford Open Immunology*, 5(1), iqa011. <https://doi.org/10.1093/oxfimm/iqa011>
12. Marinho, R. A., Beserra, E. B., Bezerra Gusmão, M. A., Porto, V. D. S., Olinda, R. A., & dos Santos, C. A. C. (2016). Effects of temperature on the life cycle, expansion, and dispersion of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) in three cities in Paraíba, Brazil. *Journal of Vector Ecology*, 41(1), 110.
13. Mordecai, E. A., Caldwell, J. M., Grossman, M. K., Lippi, C. A., Johnson, L. R., Neira, M., ... & Villena, O. (2019). Thermal biology of mosquito-borne disease. *Ecology Letters*, 22(10), 1690-1708. doi: 10.1111/ele.13335
14. Mordecai, E. A., Cohen, J. M., Evans, M. V., Gudapati, P., Johnson, L. R., Lippi, C. A., Miazgowiec, K., Murdock, C. C., Rohr, J. R., Ryan, S. J., & Savage, V. (2017). Detecting the impact of temperature on transmission of Zika, dengue, and chikungunya using mechanistic models. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 11(4), e0005568. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0005568>
15. Nik Abdull Halim, N. M. H., Che Dom, N., Dapari, R., Salim, H., & Precha, N. (2022). A systematic review and meta-analysis of the effects of temperature on the development and survival of *Aedes* mosquito. *Frontiers in Public Health*, 10, 1074028. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1074028>
16. Peña-García, V. H., Luvall, J. C., & Christofferson, R. C. (2023). Arbovirus transmission predictions are affected by both temperature data source and modeling methodologies across cities in Colombia. *Microorganisms*, 11(5), 1249. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051249>
17. Pereira, T. F., Gomes, M. E. da C., Furtado, J. B. de A., & Martins Filho, A. J. (2025). A influência das variáveis meteorológicas na incidência dos casos de arbovirose no Município de Belém, Estado do Pará (PA), Brasil. *Research, Society and Development*, 14(11), e92141150012. <https://doi.org/10.33448/rsd-v14i11.50012>
18. Rauh, C. S., Araujo, E. C., Ganem, F., Lana, R. M., Leandro, A. S., Martins, C. A., et al. (2025). Assessing mosquito dynamics and dengue transmission in Foz do Iguaçu, Brazil through an enhanced temperature-dependent mathematical model. *PLoS ONE*, 20(9), e0330902. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0330902>
19. Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... Tavoni, M. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
20. Robert, M. A., Stewart-Ibarra, A. M., & Estallo, E. L. (2020). Climate change and viral emergence: Evidence from *Aedes*-borne arboviruses. *Current Opinion in Virology*, 40, 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.coviro.2020.05.001>
21. Simon, L. M., & Rangel, T. F. (2021). Are temperature suitability and socioeconomic factors reliable predictors of dengue transmission in Brazil? *Frontiers in Tropical Diseases*, 2, 758393. <https://doi.org/10.3389/fitd.2021.758393>
22. Terradas, G., Manzano-Alvarez, J., Vanalli, C., Werling, K., Cattadori, I. M., & Rasgon, J. L. (2023). *Temperature affects viral kinetics and vectorial capacity of Aedes aegypti mosquitoes co-infected with Mayaro and Dengue viruses* (preprint). bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/2023.05.17.541186>
23. Van Wyk, H., Eisenberg, J. N. S., & Brouwer, A. F. (2022). *Climate change impacts on Zika and dengue risk in four Brazilian cities: Projections using a temperature-dependent basic reproduction number* (preprint). medRxiv. <https://doi.org/10.1101/2022.09.26.22280352>
24. Vassoler, J. A. Z., Körner, B. L., da Costa, J. V., Lima-Rezende, C. A., & Gilberto. (2025). Temperature overcomes the effects of resource availability on the life history of *Aedes aegypti* mosquitoes, especially

for females. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 97(3), e20240909. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202520240909>

25. Winokur, O. C., Main, B. J., Nicholson, J., & Barker, C. M. (2020). Impact of temperature on the extrinsic incubation period of Zika virus in *Aedes aegypti*. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 14(3), e0008047. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0008047>
26. Xu, L., Stige, L. C., Chan, K.-S., Zhou, J., Yang, J., Sang, S., Wang, M., Yang, Z., Yan, Z., Jiang, T., Lu, L., Yue, Y., Liu, X., Lin, H., Xu, J., Liu, Q., & Stenseth, N. C. (2017). Climate variation drives dengue dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(1), 113–118. <https://doi.org/10.1073/pnas.1618558114>
27. Xu, Z., Bambrick, H., Frentiu, F. D., Devine, G., Yakob, L., Williams, G., et al. (2020). Projecting the future of dengue under climate change scenarios: Progress, uncertainties and research needs. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 14(3), e0008118. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0008118>
28. Zhang, X., Mei, H., Nie, P., Hu, X., & Feng, J. (2025). Future climate predicts range shifts and increased global habitat suitability for 29 *Aedes* mosquito species. *Insects*, 16(5), 476. <https://doi.org/10.3390/insects16050476>