

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Guía para elaborar el informe final de investigaciones cofinanciadas por Digi 2023

Información General

Elaborar el informe final, con tipo de letra *Times New Roman* 12 puntos, interlineado 1 ½ y justificado. Utilice las Normas APA (*American Psychological Association*) 7a. edición para citas, referencias, tablas y figuras.

Formato de informe final (carátula)

Cambio climático y gestión del riesgo (nombre del programa universitario de investigación de la Digi)
Impacto del cambio climático en la transmisión del Dengue en Guatemala nombre del proyecto de investigación
4.8.63.195 Partida presupuestaria
Faculta de Medicina Veterinaria y Zootecnia unidad académica o centro no adscrito a unidad académica avaladora
Mayra Lissette Motta Padilla Ligia Elena Oliva Barrios Nelson Salomón Vásquez Elías Leticia Del Carmen Castillo Signor José Emilio González De León nombre del coordinador del proyecto y equipo de investigación contratado por Digi
 lugar y fecha de presentación del informe final dd/mm/año

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Contraportada (reverso de la portada)

Autoridades

Dra. Alice Burgos Paniagua
Directora General de Investigación

Nombre Coordinador(a) del Programa de Investigación

Autores

Nombre de la coordinadora del proyecto:
Mayra Lissette Motta Padilla

Nombre de los investigadores:
Leticia Del Carmen Castillo Signor
Nelson Salomón Vásquez Elías
José Emilio González De León

Nombre del auxiliar de investigación II
Ligia Elena Oliva Barrios

Colaboradores: anotar nombres apellidos e institución que representa
Silvia Zúñiga Veliz: Karolinska Institutet
Joxual Araque Pérez: Bio Box
Francisco Javier Hernández Escobar: Bio Box
Nancy Carolina González Pellecer: Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social.

Universidad de San Carlos de Guatemala, Dirección General de Investigación (Digi), 2023. El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la Digi de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria **4.8.63.195** en el Programa Universitario de Investigación **Cambio climático y gestión del riesgo**.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Formato de informe final (cuerpo del documento)

1 Índice general

1	Índice general.....	5
2	Resumen	9
3	Introducción	11
4	Antecedentes	13
5	Planteamiento del problema	15
6	Marco teórico.....	16
6.1.	Aplicación del modelo de Máxima Entropía	16
6.2.	Escenarios futuros y modelaciones climáticas.....	17
6.3.	Determinación del impacto del cambio climático por medio de la variabilidad de la temperatura en la dinámica de transmisión del dengue	18
6.4.	Modelos de circulación global (GCM), para el género Aedes.....	19
6.5.	Desarrollo del modelo predictivo de una alerta temprana para para la detección de brotes de dengue en Guatemala.....	20
7	Estado del arte	21
8	Objetivos (generales y específicos aprobados en la propuesta)	22
8.1.	General.....	22
8.2.	Específicos	23
9	Hipótesis (si aplica)	23
10	Materiales y métodos	23
10.1.	Área de estudio	23
10.2.	Índice de magnitud y duración de la ola de calor.....	24
10.3.	Distribución potencial por medio de máxima entropía	26
10.4.	Rendimiento de variables bioclimáticas y CMIP6.....	29
11	Aspectos éticos y legales (si aplica).....	30

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

12	Resultados y discusión	30
12.1	Resultados	30
12.1.1	Dinámica y tendencia de la transmisión del virus del Dengue en Guatemala.	30
12.1.2	Predicción en base a modelos actuales Índice de Magnitud y el Índice de Duración de la Ola de Calor	33
12.1.3	Proyecciones futuras CMIP6 para <i>Aedes aegypti</i> y <i>Ae. albopictus</i> (Años 2021-2060) ...	36
12.2	Discusión de resultados.....	49
12.2.1	Distribución espacial y temporal de los casos de Dengue (Panorama 2013-2024).....	49
12.2.2	Tendencias y picos de Dengue relacionados a la precipitación y temperatura (Escenario 2000-2024).....	50
12.2.3	Rangos bioclimáticos encontrados en los modelos futuros (2021-2060).....	53
12.2.4	Proyecciones de escenarios futuros <i>Aedes aegypti</i> (2021-2060)	56
12.2.5	Proyecciones de escenarios futuros <i>Aedes albopictus</i> (2021-2060).....	58
13	Conclusiones	60
14	Recomendaciones.....	61
15	Referencias.....	62
16	Apéndice	72
17	Vinculación.....	72
18	Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual	72
<p>En la filiación debe de anotarse la Universidad de San Carlos de Guatemala. Caso contrario no se concederá nuevos financiamientos de ninguna índole.</p>		
19	Aporte de la propuesta de investigación a los Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND) identificando su meta correspondiente:	73
<p>Indique concretamente cómo contribuyen los resultados de la investigación al alcance de las Prioridades Nacionales de Desarrollo identificando su meta correspondiente (https://www.pnd.gt/Home/NodosP1). Describir la principal repercusión social, académica o económica, puede ser teórica o aplicada. Si la investigación fue aplicada, identificar el grupo o parte de la sociedad que se benefició con los resultados; si fue básica describir el avance en la búsqueda o profundización del conocimiento.....</p>		
20	Orden de pago final (incluir únicamente al personal con contrato vigente al 31 de diciembre de 2023)	74

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

21	Declaración del Coordinador(a) del proyecto de investigación.....	74
22	Aval del Director(a) del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario	75
23	Visado de la Dirección General de Investigación	75

Indicé de Figuras

Figura 1. Área de influencia del estudio, A) Guatemala y sus departamentos seccionados para toma de muestras B) Países de Centroamérica (color blanco) en color Rojo se observa Guatemala (Macro localización).....	24
Figura 2. Esquema aplicado para estudio de caso de dengue en base a índice de magnitud y duración de la onda de calor.	26
Figura 3. Esquema de la metodología para extraer y medir el rendimiento de las variables bioclimáticas generadas.....	28
Figura 4. Esquema de la metodología para extraer y medir el rendimiento de las variables bioclimáticas generadas (Elaboración propia).	30
Figura 5. Datos generales sobre tendencia de casos de Dengue en Guatemala. a) Distribución de casos reportados por departamento; b) Meses con mayor número o incidencia de casos de Dengue.	31
Figura 6. Eventos temporales durante el crecimiento del dengue para Guatemala, a) tendencia de la precipitación y temperatura mensual desde 2012 al 2024. b) Aumento de casos de Dengue por año.	32
Figura 7. Rangos entre la temperatura, precipitación mensual, y casos de dengues (Puntos color naranja y rojos).	32
Figura 8. Rangos observados de mayores casos de dengue según temperatura y precipitación.....	33
Figura 9. Relación entre olas de calor, precipitación y casos de Dengue: (a) Índice compuesto y precipitación, (b) Distribución de magnitud de calor, (c) Duración de eventos climáticos	34
Figura 10. Correlación temporal entre factores climáticos y casos de Dengue. desfase mensual y máximo de relación.....	35
Figura 11. Contribuciones y permutación de las 4 variables más influyentes para Aedes Aegypti predichas para 2021-2040.	36
Figura 12. Correlaciones entre modelos CMIP6 utilizados para determinar la distribución de los alcances de los nichos ecológicos de la especie Aedes aegypti (2021-2040).	37
Figura 13. Modelación en base a escenarios climáticos de circulación general para Aedes aegypti (2021-2040).....	39
Figura 14. Distribución contribuciones y permutación de las 4 variables más influyentes para Aedes Aegypti (2060).....	40
Figura 15. Correlaciones entre modelos CMIP6 utilizados para determinar la distribución de los alcances de los nichos ecológicos de la especie Aedes aegypti (2040-2060).	41

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Figura 16 Modelación en base a escenarios climáticos de circulación general para Aedes albopictus (2040-2060).....	42
Figura 17 Modelación en base a escenarios climáticos de circulación general para Aedes albopictus (2021-2040).....	43
Figura 18 Modelación en base a escenarios climáticos de circulación general para Aedes albopictus (2021-2040).....	44
Figura 19 Modelación en base a escenarios climáticos de circulación general para Aedes albopictus (2021-2040).....	45
Figura 20 Contribuciones y permutación de las 4 variables más influyentes para Aedes Albopictus (2040-2060).....	46
Figura 21 Modelación en base a escenarios climáticos de circulación general para Aedes albopictus ((2040-2060).	47
Figura 22 Modelación en base a escenarios climáticos de circulación general para Aedes albopictus ((2040-2060).	48
Figura 23. Tendencias de casos de Dengue para Guatemala, anomalía en marzo del 2024 (Línea Naranja).	50

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

2 Resumen

El dengue representa un desafío prioritario para la salud pública en Guatemala, donde el cambio climático amplifica su transmisión mediante alteraciones en la temperatura y patrones de precipitación. Este estudio desarrolló modelos predictivos para *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus* utilizando datos meteorológicos y espaciales junto con reportes de casos de dengue. Se aplicaron análisis de regresión y Máxima Entropía (Maxent), integrando datos epidemiológicos, 20 variables bioclimáticas y proyecciones del CMIP6 (2040-2060) para los escenarios ACCESS-CM2, HadGEM3-GC31-LL y BCC-CSM2-MR y la magnitud e índice de la duración de la ola de calor - lag (R_o). Los modelos mostraron alta precisión (AUC 88–92) identificando las variables bioclimáticas correspondiente para ambas especies. Se identifican umbrales críticos: incrementos de 1–2 °C en temperaturas medias y estrés térmico prolongado (≥ 23.5 °C por 5–20 días) elevan el riesgo de brotes. Además, se determinó que temperaturas entre 15–30 °C, precipitaciones intermitentes y acumuladas de 250–300 mm/mes favorecen la proliferación de mosquitos. La estacionalidad de las precipitaciones y el aumento de la temperatura podrían favorecer la expansión del dengue en áreas previamente nichos ecológicos en 20 de los 22 departamentos del país. La evidencia sugiere que Totonicapán y Alta Verapaz tendrán mayor número de casos en el futuro. La validación del modelo en la colonización del mosquito proporciona una herramienta clave para el diseño de estrategias epidemiológicas efectivas y la mitigación de la propagación de la enfermedad.

Palabras clave: dengue, cambio climático, olas de calor, modelización predictiva, salud pública.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Dengue represents a major public health challenge in Guatemala, where climate change exacerbates its transmission through alterations in temperature and precipitation patterns. This study developed predictive models for *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* using meteorological and spatial data alongside dengue case reports. Regression analysis and Maximum Entropy (Maxent) methods were applied, integrating epidemiological data, 20 bioclimatic variables, and CMIP6 (2040–2060) projections for the ACCESS-CM2, HadGEM3-GC31-LL, and BCC-CSM2-MR scenarios, as well as the magnitude and duration index of heat waves – lag (R_o). The models exhibited high accuracy (AUC 88–92), identifying the corresponding bioclimatic variables for both species. Critical thresholds were determined: increases of 1–2°C in mean temperatures and prolonged thermal stress ($\geq 23.5^\circ\text{C}$ for 5–20 days) heightened the risk of outbreaks. Additionally, temperatures ranging between 15–30°C, intermittent precipitation, and accumulated rainfall of 250–300 mm/month were found to favor mosquito proliferation. The seasonality of precipitation and rising temperatures may drive dengue expansion into previously unaffected ecological niches across 20 of the 22 departments in the country. Evidence suggests that Totonicapán and Alta Verapaz will experience a higher number of cases in the future. The validation of the model in mosquito colonization provides a crucial tool for designing effective epidemiological strategies and mitigating disease spread.

Keywords: *dengue, climate change, heat waves, predictive modeling, public health.*

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

3 Introducción

El cambio climático (CC) influye significativamente en la propagación del virus del dengue a través del aumento en la temperatura, la precipitación y la urbanización, afectando el ciclo de vida del mosquito vector del género *Aedes* y la tasa de replicación del virus (Bhatia et al., 2022; Liu et al., 2023). Se proyecta que el aumento de las temperaturas globales ampliará el rango geográfico de transmisión del dengue, particularmente en las regiones templadas, al mejorar las tasas de reproducción, supervivencia y picaduras de mosquitos, y al acortar el período de incubación del virus (Liu et al., 2023).

Las precipitaciones influyen en la propagación del dengue al crear criaderos de mosquitos, aunque esta relación puede variar según la región. Los entornos urbanos, caracterizados por altas densidades de población y contenedores artificiales de agua, son cada vez más vulnerables a los brotes de dengue, exacerbados por el cambio climático y la urbanización (De Souza et al., 2023). Las variaciones climáticas estacionales también desempeñan un papel crucial, ya que los cambios en los patrones de temperatura y precipitación pueden alterar el momento y la intensidad de los brotes de dengue (Bhatia, et al., 2022). Si continúa el calentamiento global, se espera que aumente el riesgo de dengue, lo que requiere estrategias de salud pública adaptativas que consideren estos factores climáticos y socio ecológicos.

Guatemala es un lugar ejemplar para estudiar el impacto del clima en la transmisión del virus del dengue, debido a su combinación de diversidad climática, presencia endémica de dengue y susceptibilidad a la variabilidad climática. La amplia gama de zonas climáticas del país, desde tropicales hasta templadas, ofrece un laboratorio natural único para explorar cómo las diversas condiciones climáticas influyen en el ciclo de vida del mosquito *Aedes* y la dinámica de transmisión del dengue.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Esta variabilidad es crucial para comprender los posibles impactos del cambio climático global en las enfermedades transmitidas por vectores. La ocurrencia regular de brotes de dengue en Guatemala proporciona un rico conjunto de datos para analizar la relación entre las fluctuaciones climáticas y la incidencia de enfermedades. La experiencia del país con cambios estacionales pronunciados, así como los eventos de El Niño y La Niña, afecta la dinámica de la población de mosquitos y, en consecuencia, la propagación del dengue (García ,2023). Estos factores hacen de Guatemala un punto focal para la investigación sobre cómo los factores ambientales y climáticos impulsan la epidemiología de la fiebre del dengue.

Además, la rápida urbanización y los cambios ambientales en Guatemala han intensificado la proliferación de criaderos del mosquito Aedes, lo que pone de relieve la compleja interacción entre la actividad humana, el clima y la transmisión de enfermedades. Estudios como el de Oliver Mendoza- (Mendoza-Cano et al., 2023), sobre la evaluación de la relación entre los cambios anuales de temperatura superficial y la carga del dengue: implicaciones para el cambio climático y los resultados de salud global, han demostrado que la disponibilidad de datos longitudinales de los sistemas establecidos de vigilancia del dengue y monitoreo del clima respalda el desarrollo de modelos predictivos para el riesgo de este virus, esenciales para una planificación y respuesta efectivas en salud pública.

El diseño de nuestra propuesta de investigación se basa en desarrollar un sistema integrado de vigilancia en Guatemala con datos epidemiológicos de los brotes del dengue y los efectos del CC. Los hallazgos de nuestra investigación pueden informar las políticas e intervenciones de salud pública para mitigar el impacto del dengue frente al CC en curso. Esclarecer la relación entre los cambios de temperatura provocados por el CC, y los brotes del dengue, podrán ayudar a identificar regiones y poblaciones vulnerables que requieren intervenciones específicas y desarrollar estrategias de adaptación para minimizar el impacto de este virus en la salud pública de nuestro país.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

4 Antecedentes

En Guatemala, son escasos los estudios enfocados en la predicción de alertas tempranas para el dengue. No obstante, los avances alcanzados representan un valioso compendio de información que facilita la mejora y el ajuste de nuevos modelos predictivos. Un hito en este campo fue el primer informe completo titulado *“Cambio climático y vectores de dengue en Guatemala: modelaciones de escenarios presentes y futuros para la toma de decisiones epidemiológicas”*, elaborado por Lepe et al. (2017). Este estudio analiza cómo la distribución del mosquito vector podría expandirse hacia nuevos departamentos del país, emitiendo una alerta para 11 de los 22 departamentos guatemaltecos. En sus primeras etapas, los ajustes del modelo establecieron patrones con valores del Área Bajo la Curva (AUC) entre 0.7 y 0.8, lo que indica una capacidad de predicción moderada a alta.

Para Guatemala, el estudio de Soto, 2019 titulado “Relación espacial entre *Aedes aegypti* (Linnaeus, 1762) y la enfermedad de dengue en Guatemala” confirmaba que los casos de dengue no solo se daban en el pacífico y que posiblemente estaba más influenciado por los casos de *Ae. albopictus*, coincidiendo que se reportaban distribución potencial en 21 de 22 departamentos. Además, deja el espacio para realizar la extrapolación y validación de datos y traslape de ambas especies para cubrir sus rangos de distribución.

En el estudio *“Modelo epidémico para el estudio regional del Chinkungunya”* de Ponciano et al., 2018. Se desarrollan simulaciones numéricas, con la idea de optimizar parámetros biológicos y poblacionales, comparándolos con datos reportando. Las simulaciones caracterizan e interpretan los patrones de incidencia observada vs patrones predictores. Estos métodos pueden ajustarse y ser utilizados para predecir brotes futuros de enfermedades transmitidas por *Aedes aegypti* como el Dengue.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Con los rangos previstos, se empezaron a establecer forzantes climáticas para determinar algunos factores que podrían incidir sobre la proliferación del dengue o ambos vectores, la investigación de Ponciano et al., 2019, “*Dengue outbreaks pattern in southern Guatemala*”, se demostró que los brotes de dengue siguen un patrón periódico influenciado por las condiciones climáticas, evidenciando que la precipitación es el factor dominante en la dinámica de los brotes en 3 de las localidades de dicho estudio, respaldando y sometiendo los primeros modelos matemáticos que respaldan la incidencia del dengue en base al clima.

Otros estudios han permitido analizar las variaciones en los casos de dengue en Guatemala a lo largo del tiempo, incorporando registros de endemismo y la evolución del virus. La investigación titulada “*Epidemiology of Dengue Fever in Guatemala*” de Castillo-Signor et al. (2020) identificó diferencias en la tendencia de los casos de dengue a lo largo de los años, destacando que los serotipos DENV1 y DENV2 son los predominantes, aunque todos los serotipos han causado epidemias. El brote más grande se registró en 2010, con 1,080 casos de DENV2 reportados. La incidencia fue mayor entre los adultos durante los años epidémicos, con incrementos significativos en los brotes de DENV1 en 2005, 2007 y 2013, el brote de DENV2 en 2010 y el brote de DENV3 en 2003.

El estudio más reciente sobre el dengue en Guatemala, titulado “*Socioeconomic and environmental factors associated with dengue fever incidence in Guatemala: Rising temperatures increase dengue risk*” de Salim et al. (2024), analiza la influencia de factores ambientales y socioeconómicos en la incidencia de la enfermedad a nivel municipal. Sus hallazgos indican que un aumento de 1 °C y 2 °C en la temperatura mínima anual incrementa el riesgo de dengue, especialmente en municipios con temperaturas más altas como El Estor, Iztapa, Panzós y la Ciudad de Guatemala. Estos resultados sugieren que el cambio climático podría intensificar la incidencia del dengue en el país.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

5 Planteamiento del problema

A pesar de una disminución general en las tasas mundiales de dengue durante la última década, se observa una tendencia al alza persistente en algunas regiones hiper endémicas, aquellas regiones donde la transmisión de la enfermedad en el área de referencia es persistente pero temporal, especialmente esta tendencia destaca entre las personas de 14 a 70 años (Du et al.,2021; Tian et al., 2022). Estudios recientes han sugerido que el CC aumenta explícitamente las temperaturas superficiales secundarias al calentamiento global, lo que puede tener implicaciones para la dinámica de transmisión del dengue (Li et al., 2018; Tran et al.,2020; Li et al.,2023; Soneja et al., 2021).

En Guatemala el dengue es un virus hiper endémico y estacional, donde circulan todos sus serotipos existentes, la mayoría de las infecciones son causadas DENV1 Y DENV2, seguidas de por DENV3 y DENV4 (Castillo-Signor et al.,2020). La co-circulación de los cuatro serotipos de DENV aumentan el riesgo de segundas infecciones con un serotipo diferente (Mishra et al.,2016) lo que produce un mayor riesgo de dengue grave (Guzman et al.,2013). La variación global del clima de la Tierra (CC) causado principalmente por el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera de la Tierra (Chophel, 2022).

Las actividades humanas como la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural para la producción de energía y el transporte, son los principales contribuyentes a este aumento (Al-Ghussain, 2018). Estas actividades liberan dióxido de carbono (CO_2), el GEI más abundante, a la atmósfera (Yoro y Daramola, 2020). Además, la deforestación, los cambios en el uso de la tierra y los procesos industriales liberan otros GEI como el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), (Shakoor, 2021).

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Comprender la posible relación entre el CC y la transmisión del dengue es crucial para desarrollar estrategias efectivas de prevención y control (Rahman et al., 2019). Aunque muchos estudios han investigado la influencia de la temperatura en la aparición y distribución del dengue, aún hay que hacer análisis exhaustivos que abarquen muchos países durante un período prolongado (Mendoza- Cano et al 2023).

Esta investigación pretendemos evaluar la relación entre la temperatura superficial causada por el CC desde el primero de enero 1980 hasta el 31 de marzo y la carga de dengue en nuestro país en todas las regiones de Guatemala. Al examinar las tendencias de temperatura a largo plazo y su asociación con la carga del dengue, nuestra investigación contribuirá al conocimiento sobre el impacto del CC en la distribución y dinámica del dengue en Guatemala. Nuestros hallazgos tienen el potencial de informar e intervenir las políticas de salud pública destinadas a mitigar el impacto del dengue frente al CC en curso en los próximos años.

6 Marco teórico

6.1. Aplicación del modelo de Máxima Entropía

La modelización de la distribución de especies (SDMs) permite examinar la relación entre los registros de presencia y ausencia de especies en distintos sitios y las características ambientales y espaciales de cada lugar. Ampliamente utilizada en biogeografía, biología de la conservación y ecología (Franklin, 2010). En las últimas dos décadas, este campo ha experimentado avances significativos con el desarrollo de múltiples métodos para modelar especies a partir de datos recopilados de manera sistemática, como registros biológicos de presencia/ausencia. Además, la precisión de estos modelos ha mejorado con enfoques estadísticos, como los modelos lineales generalizados (GLMs) y los modelos aditivos generalizados (GAMs), así como con técnicas de aprendizaje automático (*machine learning*), incluyendo bosques aleatorios (*random forests*) y árboles de regresión potenciados (*boosted regression trees*, BRT), (Rivera et al., 2022).

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

El modelo de máxima entropía (MaxEnt) es muy utilizado para asociar las variables principales o bioclimáticas, que afectan la distribución de las especies, modelar las zonas potenciales actuales y futuras (Wang et al., 2023). Según Ahmadi, Maxent es el modelo más robusto debido a la variedad de algoritmos que ofrece. La elección del caso específico y una base de datos adecuada permiten obtener respuestas más precisas. Este autor describe ejemplos de modelos utilizando Maxent y otros softwares aplicados al estudio y conservación de nichos ecológicos (Ahmadi et al., 2019, 2023). Para las especies de insectos generalistas los modelos predicen de mejor manera el base a la configuración *Clog* (Araque, 2023)

En la actualidad se pueden discutir diferentes predicciones en base al método de máxima entropía, muchos investigadores combinan diferentes covariables para predecir la distribuciones actuales y futuras para entender los nichos ecológicos de los mosquitos y crear el análisis de riesgo en su región, pero cada característica de modelación será diferente en base a la especie en estudio (Zhan et al., 2023, López, 2019),

6.2. Escenarios futuros y modelaciones climáticas

Se hace referencia a los escenarios de cambio climático porque exploran trayectorias futuras hipotéticas de forzamiento radiativo climático, incluyendo trayectorias subyacentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), (IPCC, 2019). Los modelos climáticos que se presentan se convierten en estas posibles trayectorias proyectando diferentes eventos o estudios de casos sobre las variaciones de calentamiento global (Sherwood et al., 2020). Los modelos son esenciales, aunque presentan incertidumbres debido a diferencias en datos de referencia, cobertura terrestre y paradigmas de modelado, sin embargo, son potentes herramientas para prevenir riesgos. Es necesario avanzar en el análisis de escenarios y modelado para incluir mejor los costos ambientales y valores no monetarios en la toma de decisiones (IPCC, 2019).

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

En los escenarios (CMIP6) es importante explorar emisiones altas y bajas, el uso de escenarios extremos como el RCP8.5 debe ir acompañado de justificaciones claras y advertencias (Burgess et al., 2022). El modelado de escenarios puede aportar claridad a los análisis legales e informar el derecho internacional sobre cambio climático. Varios países han desarrollado escenarios climáticos específicamente para el sector salud, proyectando cambios en temperatura, presión atmosférica y precipitación (Lima et al., 2018). Estos enfoques diversos subrayan la importancia de adaptar las proyecciones climáticas a las necesidades específicas de investigación y políticas.

Las proyecciones futuras del cambio climático indican que la temperatura en Guatemala podría experimentar un aumento de entre 0.5°C y 3.5°C para el año 2050, con la posibilidad de alcanzar hasta 6°C para finales de siglo. Además, se prevé una disminución en la precipitación, con una posible reducción del 30% para finales del siglo. Esta situación subraya la vulnerabilidad de Guatemala no solo frente al cambio climático, sino también ante la variabilidad climática. La vulnerabilidad de las distintas regiones del país ante la variabilidad climática podría agravarse debido al cambio climático, es esencial evaluar la información climática y socioeconómica a nivel nacional y comunitario para identificar las vulnerabilidades y riesgos, así como para analizar los posibles impactos del clima en las comunidades (Rivera et al., 2019).

6.3. Determinación del impacto del cambio climático por medio de la variabilidad de la temperatura en la dinámica de transmisión del dengue

Existe una relación entre los cambios en las condiciones climáticas y la transmisión del dengue, la cual podría explicarse por la variabilidad climática. Los cambios en la temperatura y las precipitaciones afectarían la dinámica poblacional del mosquito transmisor del dengue. Un aumento en la temperatura reduciría el tiempo de incubación del virus, lo que incrementaría la

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

posibilidad de transmisión, mientras que las precipitaciones podrían generar más sitios de cría para el mosquito (Rúa, 2013).

Los efectos de la temperatura máxima sobre la incidencia del dengue en climas tropicales han sido ampliamente documentados (Iguchi et al., 2018; Wu et al., 2018), pero los estudios enfocados en las olas de calor y su relación con el aumento de la incidencia del dengue son limitados, especialmente en Centroamérica. Una ola de calor se define como un periodo sostenido de calor extremo, o por encima de un umbral determinado; en este estudio, se analiza su impacto sobre la incidencia del dengue. Las olas de calor pueden tener efectos distintos a los de las temperaturas extremas aisladas. Además, las olas de calor presentan un efecto inhibitorio general sobre la abundancia o población de mosquitos (Jia et al., 2019).

Todos los estudios relevantes han utilizado métricas diferentes, analizado un subconjunto de las características de las olas de calor en regiones específicas al caso de estudio seleccionando diferentes umbrales extremos durante períodos de tiempo variados. Esto dificulta una comprensión integral de cómo las olas de calor han cambiado a escalas regionales y globales (Jia et al., 2019). La ola de calor se basa en T_{mx} , ocurre una ola de calor cuando al menos tres días consecutivos superen el percentil 90 de T_{mx} de los días del calendario analizado. El percentil se calcula utilizando al menos 15 días de temperaturas máximas diarias durante los periodos de análisis. La frecuencia se definirá como la media de la intensidad en todos los días con ola de calor, siendo los días de duración el evento prolongado (Perking y Alexander, 2013).

6.4. Modelos de circulación global (GCM), para el género Aedes.

Los modelos GCM y escenarios futuros se requieren para abordar las incertidumbres en las proyecciones climáticas; los modelos de GCM de CMIP6 capturan con precisión la magnitud y frecuencia de los meses de temperatura extrema (cálidos o fríos) registrados en la mayoría de

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

las subregiones. Por ende, para obtener información climática detallada a escala local, es crucial implementar un enfoque de escalamiento, siendo el escalamiento estadístico la estrategia preferida para extraer datos regionales de los GCM (Zhang et al., 2023).

En Guatemala las simulaciones CMIP6 muestran un aumento significativo de temperatura y una notable disminución en la precipitación en todos los escenarios proyectados. Las regiones más afectadas serían el cinturón transversal norte y las zonas semiáridas, con posibles consecuencias graves para la agricultura y los ecosistemas, urge abordar mediante medidas de mitigación y adaptación para proteger a las comunidades vulnerables y conservar los recursos esenciales frente al cambio climático en Guatemala (Rivera, 2022).

En esta investigación, se utilizarán 4 modelos en base a los CMIP6, optando por el modelo del sistema de cambio climático del Centro Climático de Beijing (BCC-CSM2-MR), que es adecuado para modelar las circunstancias del cambio climático en China. El pronóstico del modelo BCC-CSM2-MR se utiliza en diversas Trayectorias Compartidas de Desarrollo Socioeconómico (SSP, por sus siglas en inglés). En comparación con las Trayectorias de Concentración Representativa (RCP, por sus siglas en inglés), las Trayectorias Compartidas de Desarrollo Socioeconómico (SSP) consideran los efectos de los elementos socioeconómicos y la utilización de la tierra en la progresión del cambio climático regional (Wang et al., 2023).

6.5. Desarrollo del modelo predictivo de una alerta temprana para para la detección de brotes de dengue en Guatemala

El número básico de reproducción, R_0 , permite evaluar el potencial de transmisión de los arbovirus y guiar las estrategias de control de enfermedades. R_0 mide el número de casos secundarios que se generarían a partir de un caso infeccioso en una población sin inmunidad. Si R_0 es mayor que 1, indica crecimiento epidémico; si es igual a 1, significa endemidad, y si

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

es menor que 1, la transmisión cesa. En las enfermedades transmitidas por vectores, R_0 depende de la densidad y supervivencia de vectores y huéspedes, así como de la probabilidad de transmisión, la tasa de contacto entre poblaciones y la duración de la infectividad (Smith et al., 2012).

Numerosos estudios han calculado el valor de R_0 para los arbovirus en zonas tropicales y subtropicales; sin embargo, pocos han realizado comparaciones de estas estimaciones de R_0 entre diferentes regiones climáticas. La capacidad vectorial de los virus transmitidos por mosquitos está fuertemente influenciada por la temperatura (Liu-Helmersson et al., 2016), lo que resalta la importancia de considerar las variaciones climáticas al evaluar el potencial de transmisión.

Algunos modelos permiten predecir casos de Susceptible–Infectado–Eliminado (SIR), Susceptible–Infectado–Susceptible (SIS) y Susceptible–Infectado (SI) para casos epidémicos. En el modelo SIR, los individuos infectados adquieren inmunidad permanente tras recuperarse, mientras que en el modelo SIS, regresan al grupo susceptible. En el modelo SI, los individuos infectados son infecciosos durante toda su vida. Este último modelo incluye dos compartimentos: el grupo susceptible, que aún no ha sido infectado, y el grupo infectado, cuyos miembros están contagiados, estos modelos exploran como se puede dar la propagación dinámica de enfermedades (Ahmetolan et al., 2022).

7 Estado del arte

Los nuevos problemas de salud humana, las enfermedades que surgen amenazan a los animales domésticos (por ejemplo, la peste porcina africana, la fiebre del Valle del Rift, la gripe), la fauna silvestre (por ejemplo, la gripe aviar, el virus Usutu, la micobacteriosis de los peces), los cultivos (por ejemplo, la enfermedad de la Sigatoka del banano, el brusone del trigo) y las plantas silvestres (por ejemplo, la muerte regresiva del fresno, el tizón del castaño), amenazan la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas. El cambio climático, la degradación

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

de los ecosistemas y la pérdida de biodiversidad son enormes desafíos por derecho propio, pero amenazan cada vez más la salud y el bienestar humanos a través de la disminución de la productividad agrícola, la pérdida de servicios ecosistémicos y los impedimentos a las actividades económicas y el crecimiento (Hayman et al., 2023).

En Guatemala, la vigilancia convencional de las enfermedades está aislada por sectores, con sistemas separados que abordan la salud de los seres humanos, los animales domésticos, las plantas cultivadas, la vida silvestre y el medio ambiente. Una vigilancia de la salud debe incluir investigación científica integrada de patógenos y los factores que impulsan la aparición de enfermedades para mejorar la prevención y la mitigación de los eventos de contagio (Hayman et al., 2023).

El Primer Reporte de Evaluación del Conocimiento sobre Cambio Climático en Guatemala enfatiza la necesidad que tiene nuestro país de cambiar la forma que abordamos los eventos extremos, esto significa pasar del modelo actual (reactivo) a un modelo basado en prevención y previsión; priorizando acciones enfocadas en las poblaciones, sectores y territorios más vulnerables (Castellanos et al., 2019). Nuestra investigación incluye un sistema integrado de vigilancia del cambio climático y epidemiológico que pasaría a formar parte de un enfoque integrado y unificador para equilibrar y optimizar de manera sostenible la salud de las personas, los animales y los ecosistemas, es decir desarrollar sistemas de vigilancia de «Una sola salud» (Hayman et al., 2023).

8 Objetivos (generales y específicos aprobados en la propuesta)

8.1. General

Desarrollar un sistema integrado de vigilancia que combine datos de salud humana, diseminación del vector *Aedes* y cambios ambientales para mejorar la detección temprana de brotes de dengue y facilitar una respuesta coordinada entre funcionarios de salud pública,

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

veterinarios, científicos ambientales y comunidades para identificar y mitigar los riesgos de manera oportuna en Guatemala.

8.2. Específicos

Evaluar la influencia del Cambio Climático en la proliferación del dengue en Guatemala a partir de datos históricos.

Desarrollar un modelo predictivo de brotes de dengue para Guatemala basado en la integración de los Índice de Magnitud e Índice de Duración de la Ola de Calor

Evaluar por medio de la variabilidad de la temperatura, eventos de calor extremo, vector *Aedes* y la proporción del dengue los periodos de mayor correlación con un mayor riesgo de transmisión para Guatemala hasta el año 2050.

9 Hipótesis (si aplica)

NO APLICA

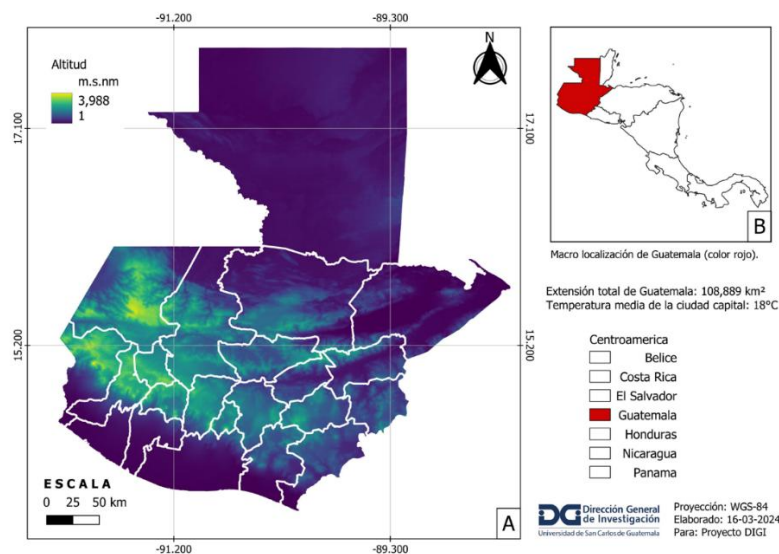
10 Materiales y métodos

10.1. Área de estudio

Se considero las bases de datos de Bioclimáticos (anuales), precipitación y temperatura (mensuales) para el recorte espacial de Guatemala entre las latitudes 14.5°N y 17°N, y las longitudes -92°W y -89.3°W. WGS-84 (Figura,1). Adicionalmente, se integraron datos provenientes de estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), así como del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social de Guatemala (Casos de Dengue).

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Figura 1. Área de influencia del estudio, A) Guatemala y sus departamentos seccionados para toma de muestras B) Países de Centroamérica (color blanco) en color Rojo se observa Guatemala (Macro localización).



Nota: (Elaboración propia, DEM en base a USGS-Earth Explorer)

10.2. Índice de magnitud y duración de la ola de calor

Se seleccionaron los registros de temperatura (máxima, mínima, media) y precipitación, a fin de establecer sus posibles vínculos con la incidencia de dengue. Los datos se basaron en fuentes climáticas de estaciones terrestres del INSIVUMEH siguiendo la metodología de (Lowe et al., 2018). La información, se organizó a nivel diario y departamental para, posteriormente, agruparse en escalas mensuales.

Para identificar eventos de calor extremo, se siguió el enfoque de percentiles propuesto por Zhang et al. (2011), estableciendo el *percentil 95* como umbral de ola de calor. Así, cada día

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

con temperatura máxima por encima de dicho umbral se consideró parte de un episodio extremo. A continuación, se calcularon dos índices: (i) Duración, definida como el número de días consecutivos por encima del umbral, y (ii) Magnitud, obtenida al promediar la temperatura máxima de los días clasificados como parte de la ola de calor.

A fin de cuantificar la relación entre las variables climáticas (p. ej., la magnitud de las olas de calor) y la incidencia de dengue con un retardo temporal (lag), se pueden calcular la correlación (Spearman) para cada posible desfase (ℓ) de tiempo. En el caso de Spearman, que se basa en rangos, la correlación con un desfase ℓ se definiría como:

$$\rho_s(\ell) = \rho_s(X_t, Y_{t+\ell}),$$

donde: ρ_s denota la correlación de Spearman, X_t es la variable climática (por ejemplo, “Índice de olas de calor”) en el tiempo, $Y_{t+\ell}$ son los casos de dengue en el instante $t+\ell$ (es decir, ℓ periodos después).

Para computar esta correlación de Spearman, primero se reemplazan los valores crudos por sus rangos y luego se obtiene la correlación de Pearson sobre dichos rangos (Zar, 1972).

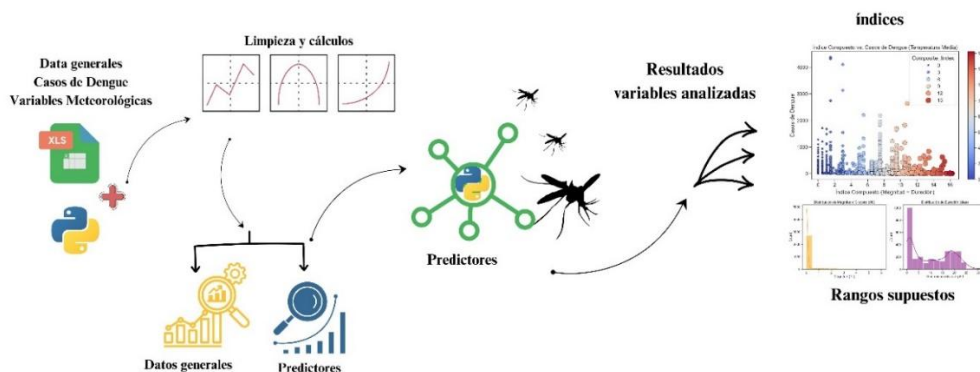
$$\rho_P(\mathbf{r}_X, \mathbf{r}_Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (r_{X_i} - \bar{r}_X)(r_{Y_i} - \bar{r}_Y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (r_{X_i} - \bar{r}_X)^2 \sum_{i=1}^n (r_{Y_i} - \bar{r}_Y)^2}},$$

Para integrar los datos fueron agregados por año y departamento, sumando los casos de dengue y calculando los promedios mensuales de las variables de interés. Este método de integración ha sido empleado en análisis espacio-temporales de dengue, donde se correlacionan datos de clima e incidencia para identificar tendencias (Bhatt et al., 2013). Para caracterizar la relación entre los factores meteorológicos y los casos de dengue, se emplearon gráficas de dispersión con ajuste lineal (regresiones simples), siguiendo prácticas por estudios que vinculan variables

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

climáticas con enfermedades vectoriales (Mordecai et al., 2017). La figura 2, explica de manera resumida el proceso metodológico realizado.

Figura 2. Esquema aplicado para estudio de caso de dengue en base a índice de magnitud y duración de la onda de calor.



Nota: (Diseño elaboración propia).

10.3. Distribución potencial por medio de máxima entropía

Los datos de presencia para ambas especies de mosquitos provienen de la base de datos de Lepe et al., 2017, siendo 176 observaciones para *Aedes aegypti* y 75 *Aedes Albopictus* respectivamente. Los modelos se construyeron en el programa Maxent (versión 3.4.4). Se incluyeron las 19 variables bioclimáticas y la elevación. Los resultados se importaron en QGIS Prizren (versión 3.34) para la elaboración de mapas de mayor calidad visual con el fin de representar zonas de traslape, ambos mapas se combinaron en QGIS y se convirtieron en vectores.

Se incluyeron 20 variables bioclimáticas para modelos desde 1980 hasta 2060, CMIP6 (Tabla, 1), descargadas desde [WorldClim](https://worldclim.org/) con una resolución de 30 segundos (~1 km²). Esta información proviene de datos de estaciones meteorológicas, modelos digitales de elevación y estimaciones satelitales, incluyendo precipitación derivada de la misión TRMM (Tropical

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Rainfall Measuring Mission). Estas bases se emplean ampliamente en investigaciones ecológicas y ambientales, así como en estudios de biodiversidad y cambio climático (Fick & Hijmans, 2017; Harris et al., 2020, Araque, 2023).

Tabla 1. Variables bioclimáticas asignadas para la modelación, tomados de WorldClim.org.

Código	Significancia del código de cada variable
Bio1	Temperatura media anual
Bio2	Rango diurno promedio (promedio mensual de la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima)
Bio3	Isotermicidad $(\text{Bio2}/\text{Bio7}) \times (100)$
Bio4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar $\times 100$)
Bio5	Temperatura máxima del mes más cálido
Bio6	Temperatura mínima del mes más frío
Bio7	Rango anual de temperatura (BIO5-BIO6)
Bio8	Temperatura media del trimestre más húmedo
Bio9	Temperatura media del trimestre más seco
Bio10	Temperatura media del trimestre más cálido
Bio11	Temperatura media del trimestre más frío
Bio12	Precipitación anual
Bio13	Precipitación del mes más lluvioso
Bio14	Precipitación del mes más seco
Bio15	Estacionalidad de la precipitación (coeficiente de variación)
Bio16	Precipitación del trimestre más lluvioso
Bio17	Precipitación del trimestre más seco
Bio18	Precipitación del trimestre más cálido
Bio19	Precipitación del trimestre más frío
ELV	Elevación/ Altura (m)

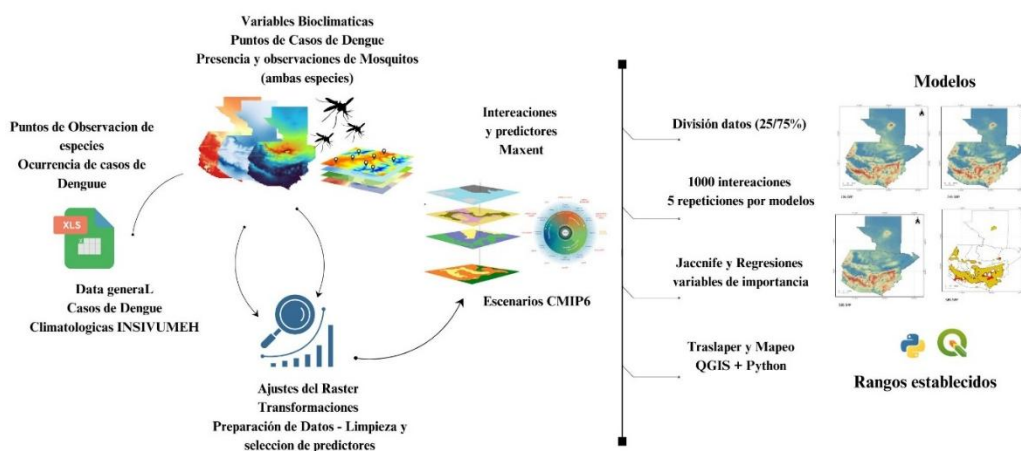
Para la salida de los modelos se empleó el algoritmo *Cloglog*, predeterminado en las versiones recientes de Maxent y considerado apropiado para estimar la probabilidad de presencia

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

(Phillips et al., 2017; Araque, 2023; Navarrete, 2024). Se activó la opción “random seed” para asignar aleatoriamente el 25% de los datos como prueba y el 75% para ensamble. Además, se utilizó el área bajo la curva ROC (AUC) para evaluar el desempeño del modelo.

Tras una primera ejecución, se eliminaron las variables con contribución menor a 1.5% en la permutación de importancia, repitiéndose el análisis y aplicando una prueba de Jackknife para verificar la relevancia de cada una de las variables (Fielding & Bell, 1997; Steven et al., 2017), estableciendo un total de 5000 mil interacciones en cada escenario climático, abordando 3 Modelos CMIP6 (ACCES-CM2, BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31.LL) y 3 escenarios (Ssp126, 245, 585), desde el año 1980 como base hasta el 2060, el resultado es un total de 90,000 interacciones por cada especie (*Aedes aegypti* y *Aedes albopictus*). Por último, se estableció una escala de clasificación para la probabilidad de presencia en los mapas resultantes, se dividió en: 0.0–0.6 (Inválido), 0.6–0.7 (Pobre), 0.7–0.8 (Bueno), 0.8–0.9 (Muy bueno) y 0.9–1 (Excelente), el resumen de la metodología se explica en la Figura, 3.

Figura 3. Esquema de la metodología para extraer y medir el rendimiento de las variables bioclimáticas generadas.



Nota: (Diseño elaboración propia).

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

10.4. Rendimiento de variables bioclimáticas y CMIP6

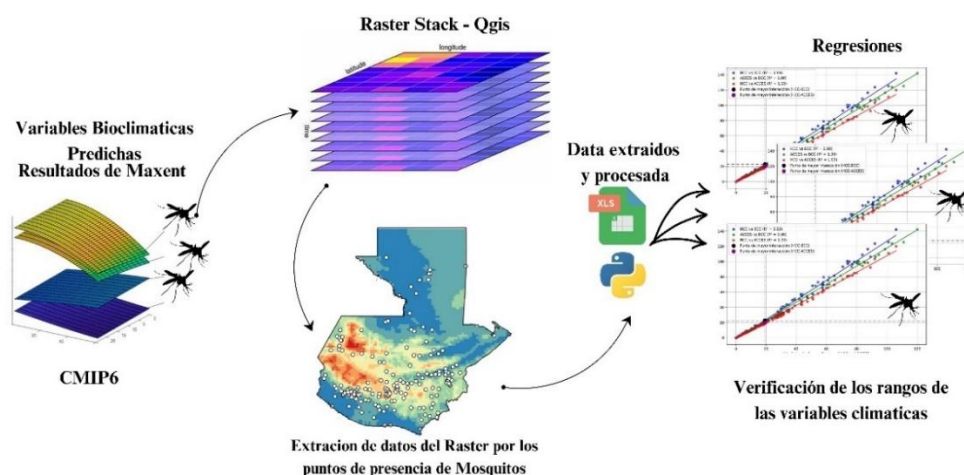
Para la extracción de los datos, se utilizaron los rásteres generados como resultado de MaxEnt, seleccionando las predicciones más precisas y las variables bioclimáticas que presentaban mayor interacción en la predicción para cada especie de mosquito, se utilizó un acoplamiento en cada escenario (Jukes et al., 2020) y variable bioclimática por medio del lenguaje de Python, dando como resultado las 5 variables de mayor importancia y permutación. Todos los rásteres generados se procesaron en QGIS en formato TIFF (Figura. 4).

Posteriormente, se realizó un acoplamiento de los modelos según su año de predicción y el modelo de circulación general (CMIP6) como alternativa para determinar la discrepancia entre cada modelo realizado, debido a que existen muchas metodologías que buscan mejorar las predicciones (Naish et al., 2014). Para ello, se empleó la calculadora ráster, dividiendo por el número total de capas de cada modelo. Con el ráster acoplado en una sola capa, se procedió a extraer los datos con base en los puntos de observación de ambas especies de mosquito: *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus*. Este proceso se llevó a cabo utilizando el plugin *Sample Point* (Figura, 4).

La información resultante se compiló en un archivo en formato CSV que contiene todos los datos de los modelos organizados según sus variables predictoras. Se determinaron los rangos en el cual las variables bioclimáticas pueden interactuar y afectar la distribución potencial de los mosquitos. Finalmente, con los datos recopilados, se utilizó un modelo de regresión lineal simple para estudiar las relaciones entre los modelos climáticos (ACCES-CM2, BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31.LL) para modelar relaciones lineales entre dos variables (Montgomery et al., 2012), (Figura. 4).

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Figura 4. Esquema de la metodología para extraer y medir el rendimiento de las variables bioclimáticas generadas (Elaboración propia).



11 Aspectos éticos y legales (si aplica)

Si la propuesta de investigación requirió opinión favorable de un comité de bioética debidamente constituido en la Usac, así como permisos, registros o licencias de instituciones del Estado (Idaeh, Conap, Marn, etc.), adjuntar lo correspondiente en este apartado.

12 Resultados y discusión

12.1 Resultados

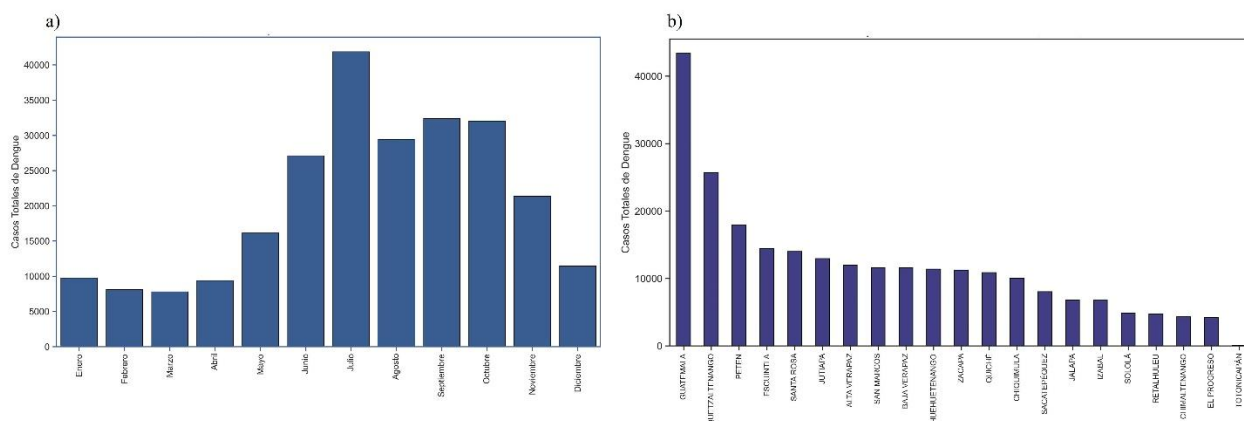
12.1.1 Dinámica y tendencia de la transmisión del virus del Dengue en Guatemala.

Espacialmente los mayores casos de dengue están distribuidos en el departamento de Guatemala (mayor cantidad de casos), seguido de Quetzaltenango, Petén, y Escuintla. Otros departamentos como Totonicapán y El Progreso tienen un menor número de casos, lo que podría deberse a factores climáticos menos favorables para el desarrollo del mosquito (Figura 5. Panel b).

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

La tendencia temporal desde 2013 hasta el 2023 reportada de casos de dengue en Guatemala se incrementa durante los meses de junio a octubre, con un pico máximo en julio. Este comportamiento coincide con la temporada de lluvias en el país, que favorece la acumulación de agua estancada, creando condiciones ideales para la oviposición y proliferación de *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus*. Durante los meses de noviembre a abril, los casos disminuyen considerablemente, debido a una reducción en las precipitaciones y temperaturas más bajas, factores que limitan la reproducción del vector (figura, 5. Panel a).

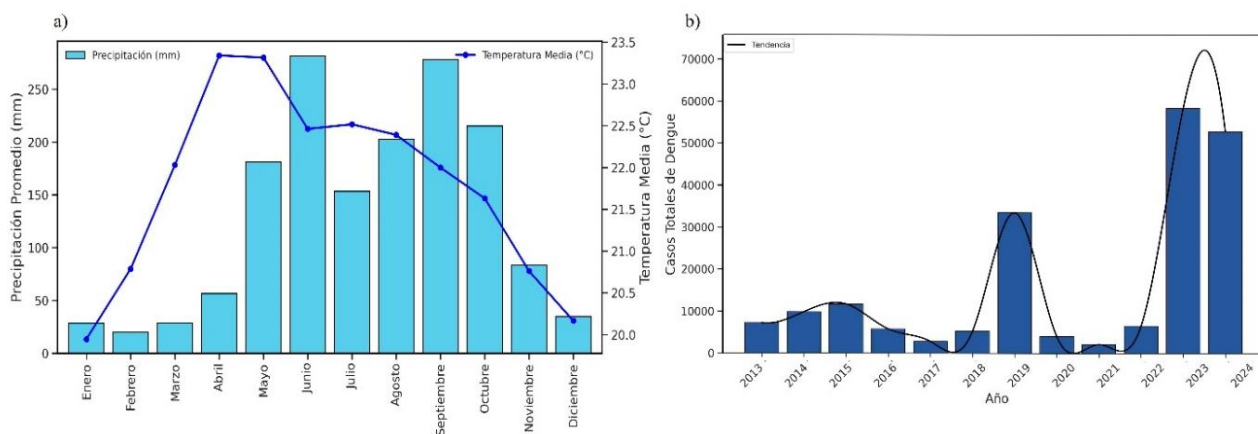
Figura 5. Datos generales sobre tendencia de casos de Dengue en Guatemala. a) Distribución de casos reportados por departamento; b) Meses con mayor número o incidencia de casos de Dengue.



En la Figura, 6 (panel a) muestra una interacción clara entre la precipitación y la temperatura durante los meses del año. Observamos que el mes de julio, es donde inicia del incremento de casos de dengue (Figura, 5), coincide con picos significativos de precipitación (250 mm) y temperaturas medias de alrededor de 23°C.

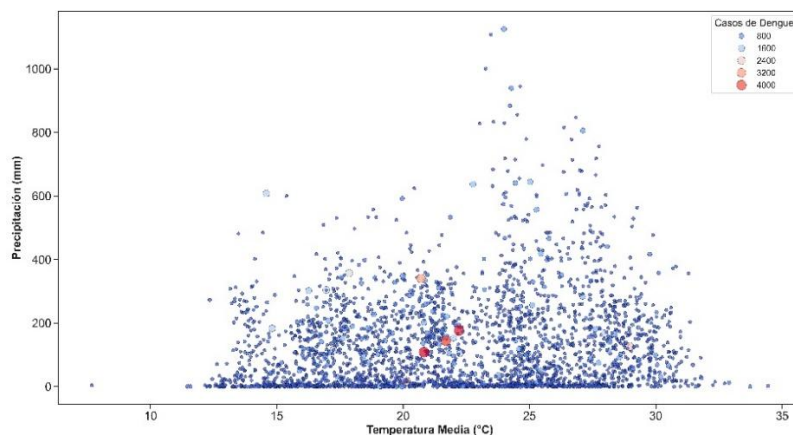
Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Figura 6. Eventos temporales durante el crecimiento del dengue para Guatemala, a) tendencia de la precipitación y temperatura mensual desde 2012 al 2024. b) Aumento de casos de Dengue por año.



La figura 7, confirma la relación multifactorial entre condiciones climáticas (temperatura y precipitación) y la incidencia de dengue, con menor densidad de brotes en condiciones de calor o lluvias más atípicas con mayor en intervalos templados-húmedos.

Figura 7. Rangos entre la temperatura, precipitación mensual, y casos de dengues (Puntos color naranja y rojos).

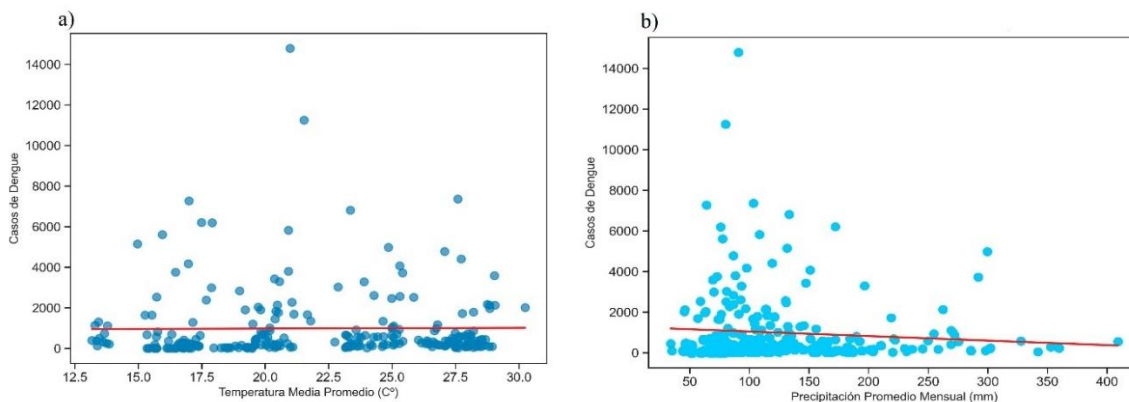


Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

12.1.2. Predicción en base a modelos actuales Índice de Magnitud y el Índice de Duración de la Ola de Calor

La figura 8, muestra que las lluvias excesivas precipitaciones por mes pueden disminuir el número de casos, explicados por los puntos de dispersión en el inciso b, los picos de dengue pueden ocurrir con precipitaciones medias (~100–200 mm), aunque hay picos por encima de 10,000 casos de Dengue en torno a ~100–150 mm de lluvia por mes. Con respecto a la Temperatura (media), la mayor parte de los casos de dengue (0–2000) se concentra en un rango de 15–25 °C, aunque existen picos de hasta >10 000 casos en valores alrededor de 20–25 °C.

Figura 8. Rangos observados de mayores casos de dengue según temperatura y precipitación.

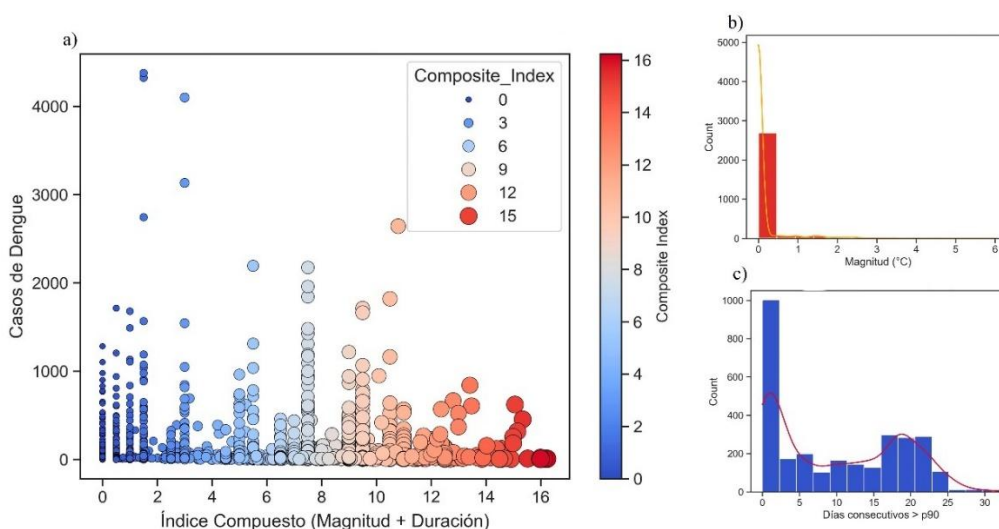


En la Figura 9, se ilustra la relación entre el índice compuesto de olas de calor (suma ponderada de la magnitud y duración por encima del percentil 90 de la temperatura media), la precipitación promedio y los casos de dengue en la misma ventana temporal (panel a). Además, se incluyen los histogramas de la magnitud (°C por encima del percentil 90, panel b) y la duración (días consecutivos > p90, panel c) de dichos eventos cálidos. El color de los puntos varía progresivamente de tonos azulados (índice compuesto bajo) a rojizos (índice compuesto alto), demostrando las olas de calor.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

La mayoría de brotes elevados de dengue (puntos por encima de 1000 casos) tienden a concentrarse en índices compuestos moderados y altos, también hay casos relevantes en valores bajos de índice. El estrés térmico prolongado (magnitud + duración) puede interactuar con otros factores epidemiológicos y climáticos. La mayor frecuencia de eventos ocurre en magnitudes moderadas, entre 1 y 2°C por encima del p90, lo cual incidirá para dar las condiciones óptimas en la supervivencia del mosquito y la transmisión del virus.

Figura 9. Relación entre olas de calor, precipitación y casos de Dengue: (a) Índice compuesto y precipitación, (b) Distribución de magnitud de calor, (c) Duración de eventos climáticos

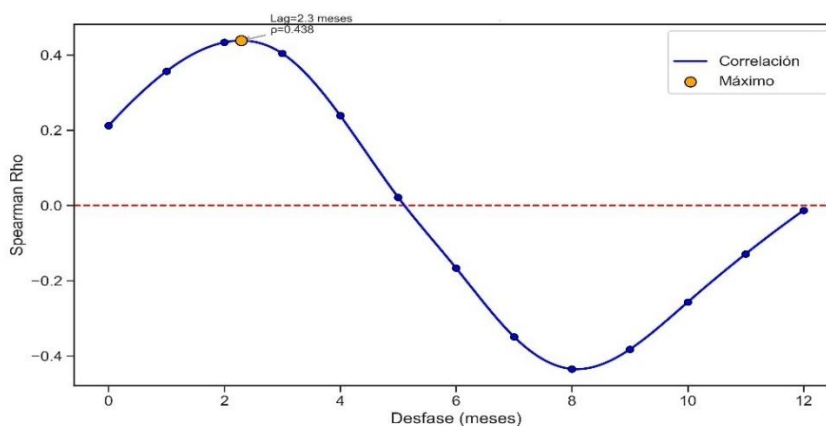


Los resultados evidencian que la mayoría de las olas de calor apenas superan el umbral (magnitud cercana a 0 °C) y suelen ser breves (0–5 días); no obstante, también se presentan episodios prolongados (15–20 días) y con magnitudes moderadas (1–3 °C). Puede existir un periodo de calor sostenido en la proliferación del vector *Aedes aegypti*, lo cual podría coincidir en rebrotes.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

La figura 10, muestra cómo la correlación de Spearman entre la temperatura media y los casos de dengue varía según el desfase (*lag*) en meses (0 a 12). Se observa un pico de correlación aproximadamente 2–3 meses podríamos esperar más incidencia de dengue cuando la temperatura media favorable para los mosquitos *Aedes aegypti* y *A. albopictus* sea alrededor de 24–30 °C. Hacia los 6–8 meses, la correlación llega a valores negativos, sugiriendo que tras ese lapso ya no se mantiene el efecto positivo de la temperatura sobre el brote; y cerca de 12 meses reaparece un leve repunte, posiblemente ligado a la estacionalidad anual.

Figura 10. Correlación temporal entre factores climáticos y casos de Dengue. desfase mensual y máximo de relación.



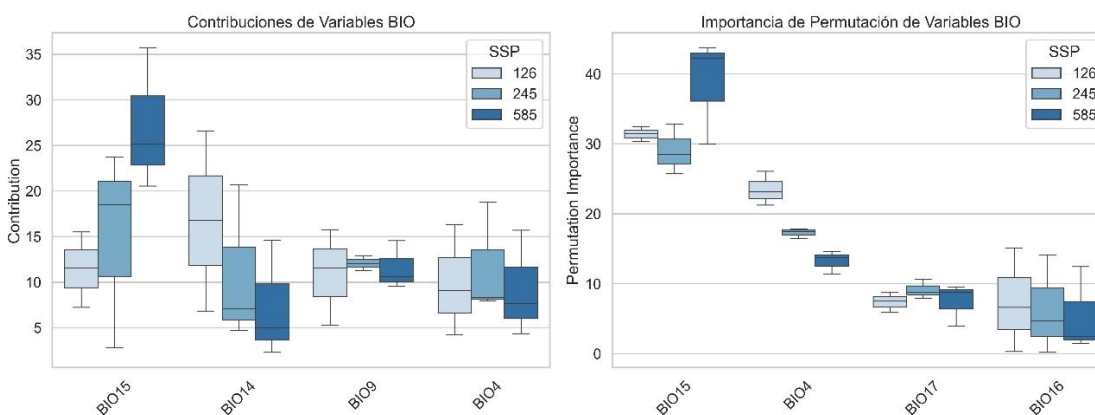
De la figura 10, podemos observar un desfase temporal significativo donde la correlación es de ($\rho \approx 0.43$) el desfase entre las variables ocurre de 2-3 meses. Los cambios en la precipitación y temperatura afectan directamente los casos de dengue, después de este lapso de tiempo se esperaría un rebrote. La disminución se da de 5 a 6 meses después del primer brote por las variables climáticas en estudio o cambios estacionales marcados. La periodicidad observada en el gráfico (patrón sinusoidal) sugiere que los efectos climáticos en la transmisión del dengue podrían estar modulados por ciclos anuales.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

12.1.3. Proyecciones futuras CMIP6 para *Aedes aegypti* y *Ae. albopictus* (Años 2021-2060)

Con los resultados generados por medios de los modelos de máxima entropía, se extrajeron las variables en base al rendimiento de cada modelo, siendo Bio4, Bio9, Bio14 y Bio15 para la especie *Aedes aegypti* las que más contribución demostraron, en base a la prueba Jackknife se utilizaron todos los modelos generados y se ajustó con las variables que más contribuyen para eventos futuros mostrando los años 2021 hasta el 2040 (Figura 11).

Figura 11. Contribuciones y permutación de las 4 variables más influyentes para *Aedes Aegypti* predichas para 2021-2040.



De la Figura 11, Bio15 es la variable que más contribución tiene ($P \approx 20\%$), (Estacionalidad de la precipitación) la variabilidad interanual de las lluvias puede favorecer el establecimiento y persistencia de *Aedes aegypti*. Picos de lluvia marcados, alternados con períodos de relativa sequía, tiende a generar criaderos temporales. Bio14 ($P \approx 11\%$), (Precipitación del mes más seco) precipitación mínima pero no nula durante la época más seca puede mantener criaderos residuales. Bio09 ($P \approx 13\%$), (Temperatura del trimestre más seco).

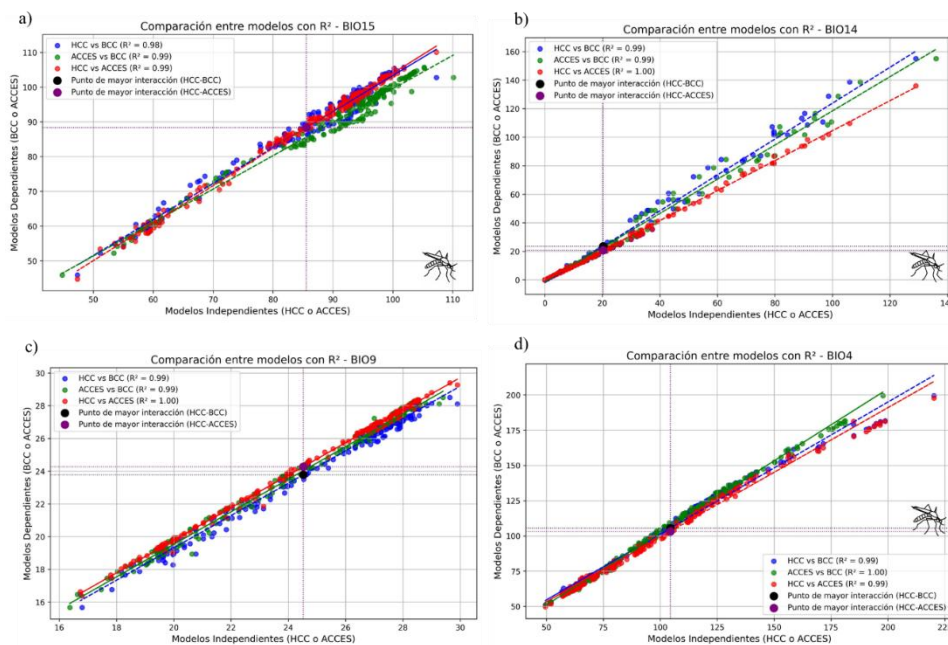
Si las temperaturas mínimas (durante la estación seca) no descienden lo bastante, el mosquito consigue mantener poblaciones base que luego se incrementan en la temporada lluviosa. Bio04

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

($P \approx 9\%$), (Estacionalidad de la temperatura). La amplitud térmica anual, marcada variabilidad puede limitar la colonización en zonas altas, pero en regiones con temperaturas moderadas todo el año, *Aedes aegypti* se mantiene activo.

Todos los Modelos de circulación general (GCM), CMIP6, para *Ae. aegypti* exhiben un coeficiente de determinación (R^2) muy elevado (~ 0.99 o 1.00). Esto sugiere: que presentan escasas discrepancias en cómo proyectan la variación bioclimática en el período 2021–2040. Se prevé que las variables clave (Bio15, Bio14, Bio09, Bio04) se comporten de manera similar en la mayoría de los GCM. De esta forma, las discrepancias en la distribución futura de *Aedes aegypti* obedecerán más a diferencias locales (microclimas, cobertura vegetal, urbanización) que a divergencias fuertes en la climatología global modelada.

Figura 12. Correlaciones entre modelos CMIP6 utilizados para determinar la distribución de los alcances de los nichos ecológicos de la especie *Aedes aegypti* (2021-2040).



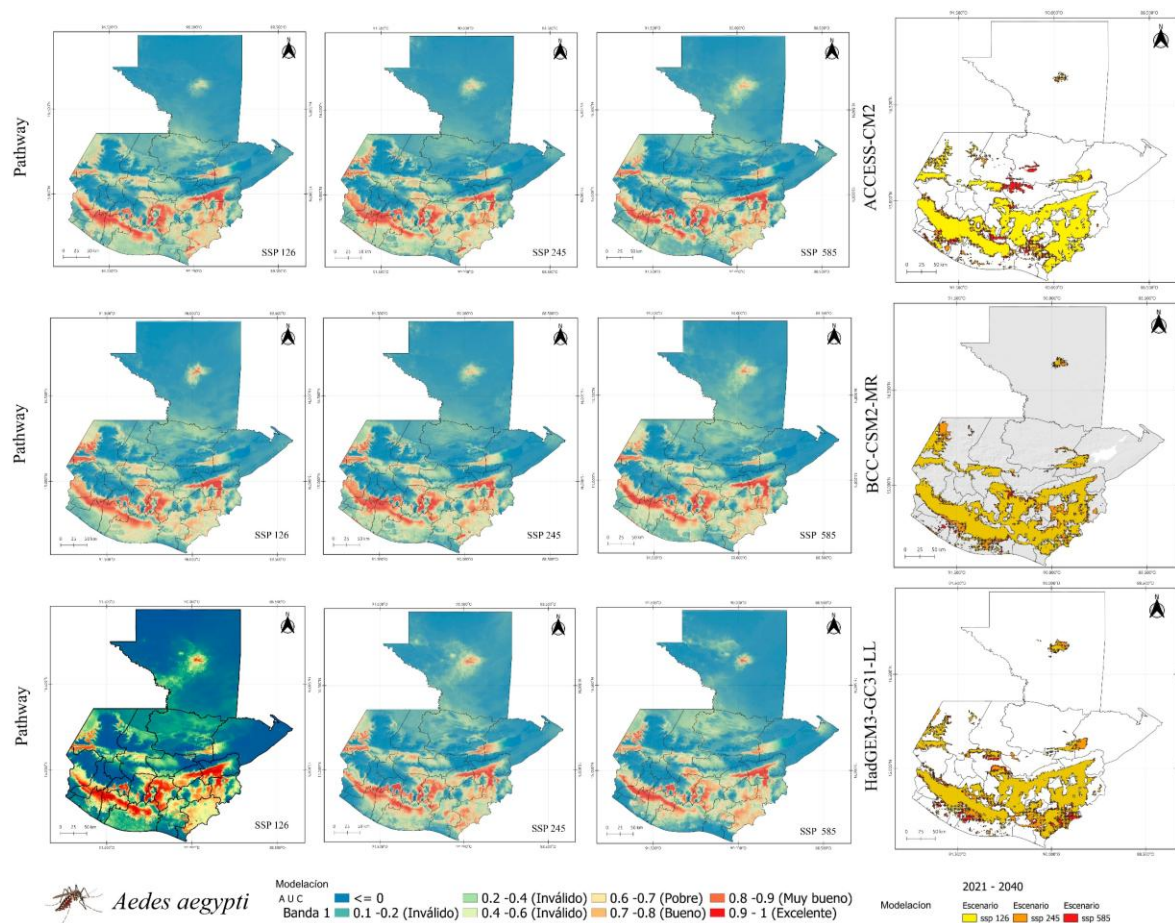
Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Las gradientes de color (rojo) en la Figura, 13, reflejan la idoneidad para la presencia del vector (valor de AUC= 0.9 a 1), bajo condiciones de emisiones más moderadas (SSP1-2.6), persisten zonas con idoneidad alta en áreas cálidas-húmedas (costa sur, región norte, algunos valles interiores). Bajo el escenario más extremo (SSP5-8.5), se aprecia una expansión de zonas rojas y naranjas (≥ 0.8 de idoneidad) hacia departamentos de altitud media.

Para *Ae. Aegypti* en los años 2021-2040. SSP1-2.6 (menor forzamiento) persiste un riesgo en los departamentos costeros y de baja altitud (Escuintla, Suchitepéquez, Retalhuleu, Santa Rosa, sur de San Marcos). Las áreas montañosas son menos idóneas, aunque existen “bolsas” de condiciones favorables en valles urbanos. SSP2-4.5 (moderado) se aprecia una ligera ampliación del rango de aptitud hacia regiones de altitud intermedia (entre 1,000 y 1,500 msnm), afectando sectores de Huehuetenango, Quiché y El Progreso. Aumentan las zonas con rangos de 0.7–0.8 de probabilidad, implicando un incremento gradual del área con condiciones “buenas” a “muy buenas”. SSP5-8.5 (alto forzamiento) el calentamiento más pronunciado promueve una expansión considerable de la idoneidad hacia el altiplano occidental y áreas montañosas del oriente, donde antes la limitante térmica evitaba la colonización. Áreas de Quiché, Baja Verapaz y Alta Verapaz, lo que sugiere la posibilidad real de brotes en sitios que previamente eran de menor riesgo.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

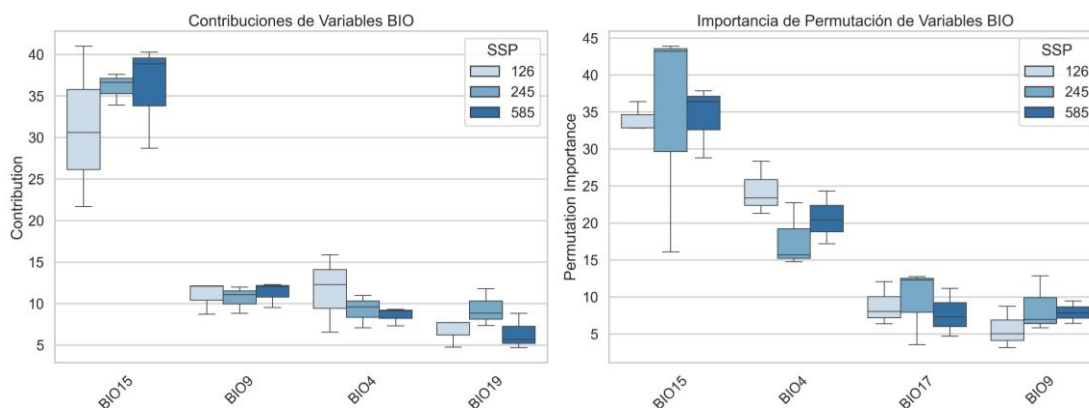
Figura 13. Modelación en base a escenarios climáticos de circulación general para *Aedes aegypti* (2021-2040).



En términos de variables bioclimáticas (Figura,14), se ratifica que la estacionalidad de la precipitación (Bio15) y la temperatura en el trimestre más seco (Bio09) siguen siendo factores críticos en la modelación de la presencia de *Aedes aegypti*. Para 2041–2060, los boxplots de contribución y permutación mantienen a Bio15 como la variable con el mayor peso, implicando que la alternancia entre periodos de lluvia y sequía (en magnitud e intensidad) afectara en el número de casos de Dengue.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Figura 14. Distribución contribuciones y permutación de las 4 variables más influyentes para *Aedes Aegypti* (2060).

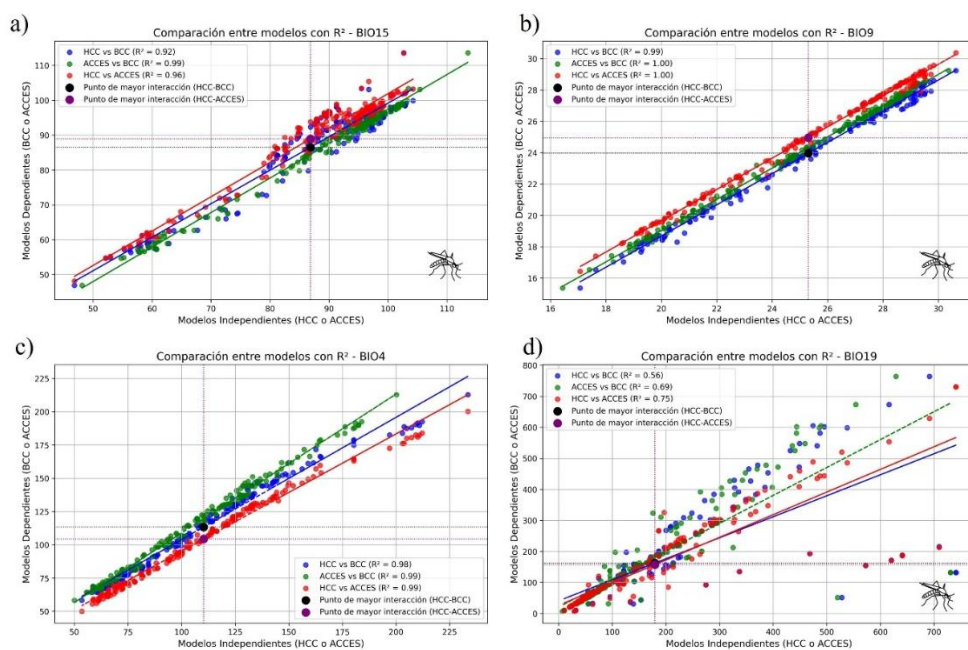


Para los años 2041-2060, aun todos los modelos de circulación general (GCM), CMIP6, para *Ae. aegypti* exhiben un coeficiente de determinación (R^2) muy elevado (~ 0.99 o 1.00). No son discrepantes y se pueden utilizar cualquiera de los 3 para simular otros efectos de distribución espacial (Figura, 15).

Las imágenes correspondientes a los modelos climáticos CMIP6, exhiben una clara tendencia de expansión de *Aedes aegypti* (Figura, 16) en relación con las proyecciones de 2021–2040. Zonas que ya se veían muy favorables (≥ 0.8 de idoneidad) en la franja costera y los valles cálido-húmedos del sur (Escuintla, Suchitepéquez, Retalhuleu, Santa Rosa) se mantienen como áreas de riesgo más elevados, con incrementos en la extensión espacial de dicha idoneidad.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Figura 15. Correlaciones entre modelos CMIP6 utilizados para determinar la distribución de los alcances de los nichos ecológicos de la especie *Aedes aegypti* (2040-2060).



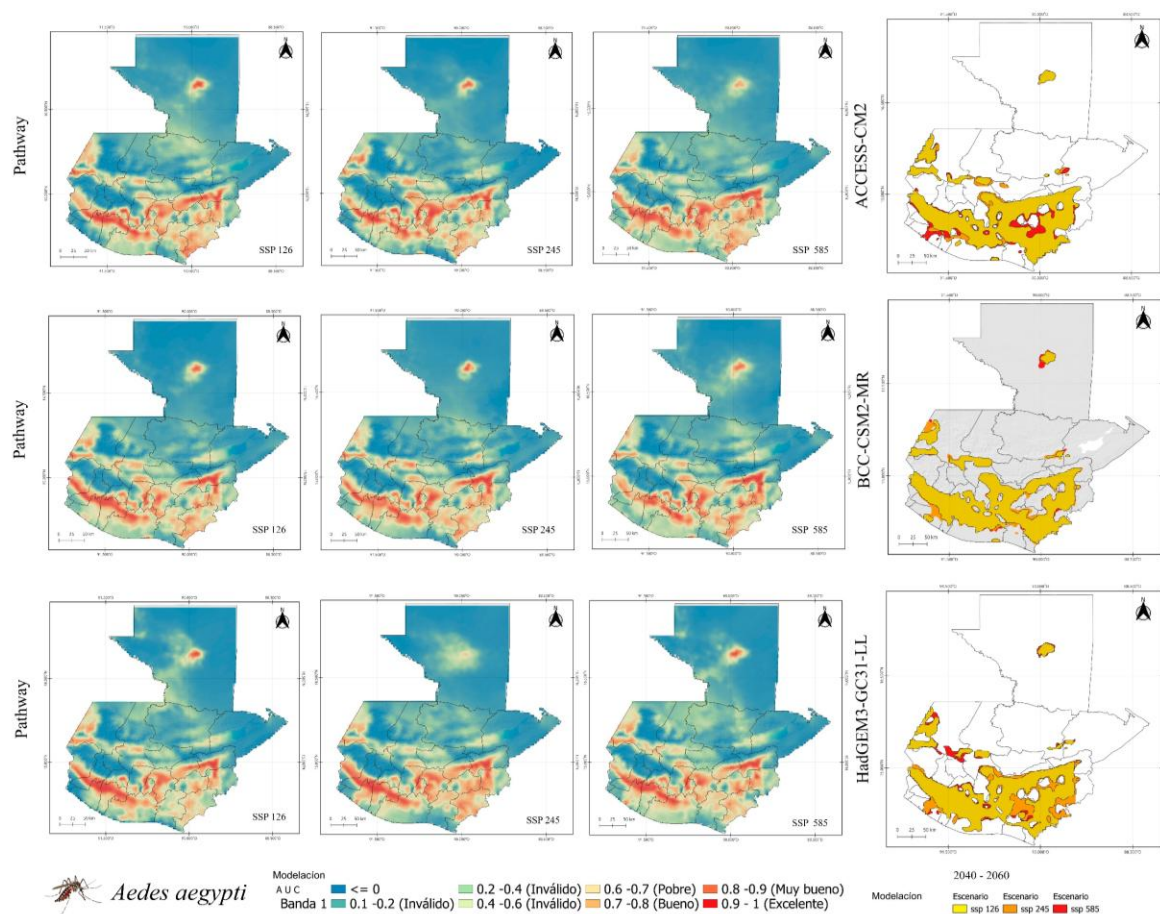
En departamentos de altitud media (Guatemala, Sacatepéquez, Chimaltenango, parte de Quiché, Baja Verapaz e incluso Totonicapán), los modelos señalan un aumento notable de la probabilidad de presencia de *Aedes aegypti* para 2041–2060, especialmente bajo escenarios de forzamiento climático medio y alto (SSP2-4.5 y SSP5-8.5).

Se observa que las áreas montañosas o mayores altitudes (>2,000 msnm) continúan siendo menos propicias debido a temperaturas mínimas frías, se observa que las islas de calor urbanas y los valles interiores podrían permitir la supervivencia de poblaciones larvarias, al menos durante varios meses al año. Existe mayor probabilidad de que la ventana epidemiológica del dengue —y potencialmente de otras arbovirosis— se ampliaría temporal y espacialmente en el altiplano guatemalteco (Figura, 16).

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

El corredor oriental (Zacapa, Chiquimula, Jalapa, El Progreso). Asimismo, en el norte (Petén, Alta Verapaz), (Figura, 16). Los escenarios de altas emisiones (SSP5-8.5) muestran un mayor avance de condiciones “muy buenas” a “excelentes” (≥ 0.8) para la expansión y zonas idóneas donde se pueda reproducir el mosquito, lo cual se puede vincular a un ascenso de las temperaturas mínimas y a una variabilidad mayor en la precipitación.

Figura 16 Modelación en base a escenarios climáticos de circulación general para *Aedes albopictus* (2040-2060).

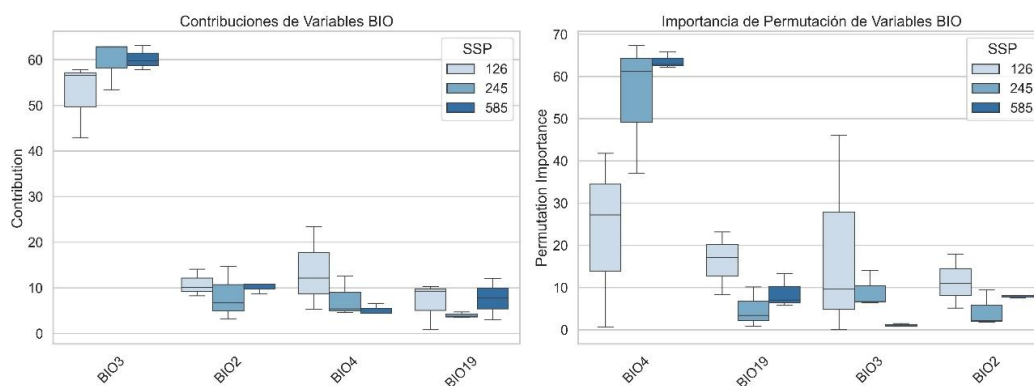


Cuatro variables destacan para *Ae. Albopictus* (Figura, 17): Bio03 (Isotermalidad) contribución dominante ($P \approx 40\%$) en la mayoría de escenarios. Lo cual indica que el vector prospera en

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

lugares donde la temperatura diurna no difiere en exceso de la temperatura anual. Bio04 (Estacionalidad de la temperatura); menor amplitud térmica anual, favorecería los ciclos de vida de los mosquitos. Bio02 (Rango diurno medio de temperatura). Una brecha pequeña entre el día y la noche (noches menos frías) beneficia la supervivencia de estadios inmaduros. Bio19 (Precipitación del trimestre más frío) lluvias moderadas en meses fríos pueden prevenir la desecación total de los recipientes, garantizando criaderos activos que podrían afectar.

Figura 17 Modelación en base a escenarios climáticos de circulación general para *Aedes albopictus* (2021-2040).

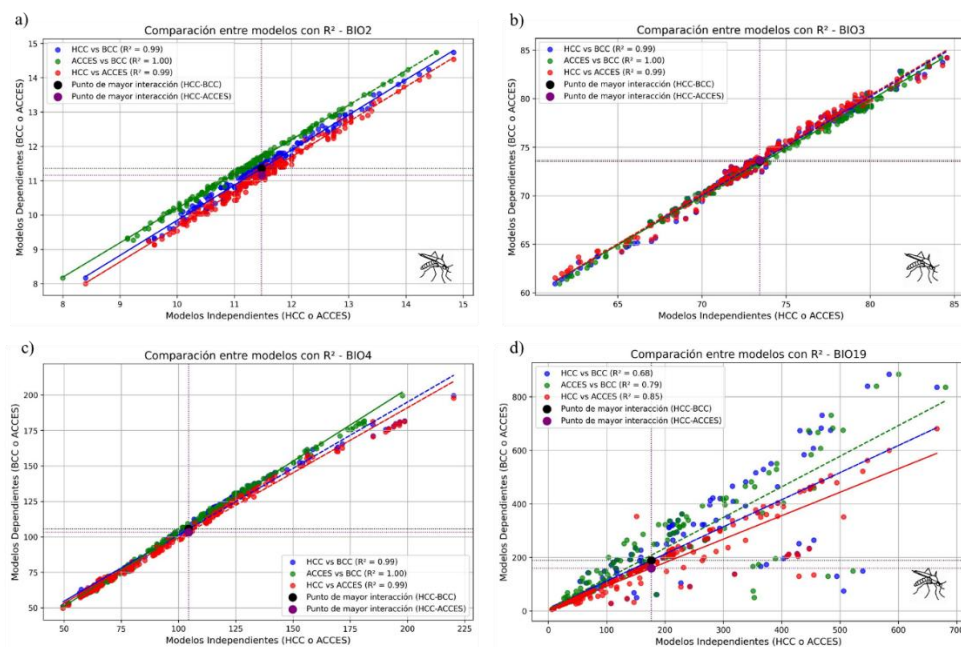


La figura 18, describe las correlaciones entre tres modelos climáticos principales para diferentes variables bioclimáticas, con intención de verificar si un modelo difiere o es diferente de otro, en base a las variables bioclimáticas: Bio02 (Rango diurno medio de temperatura), Bio03 (Isotermalidad), Bio04 (Estacionalidad de la temperatura) y Bio19 (Precipitación del trimestre más frío). Los modelos utilizados entre ellos tienen alta consistencia en las variables de temperatura (Bio02, Bio03, Bio04), con coeficientes de determinación que rondan 0.98–1.00. Se puede tener confianza en los mapas de dispersión de mosquitos presentada.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Sin embargo, los planes de prevención deben considerar la incertidumbre adicional de Bio19 (especialmente en altiplanos, zonas secas y regiones norteñas), donde un ligero aumento de lluvia en el trimestre frío podría cambiar de forma significativa la disponibilidad de criaderos (Este aspecto es esencial de cara a la vigilancia epidemiológica y la planificación de campañas de control vectorial).

Figura 18 Modelación en base a escenarios climáticos de circulación general para *Aedes albopictus* (2021-2040).



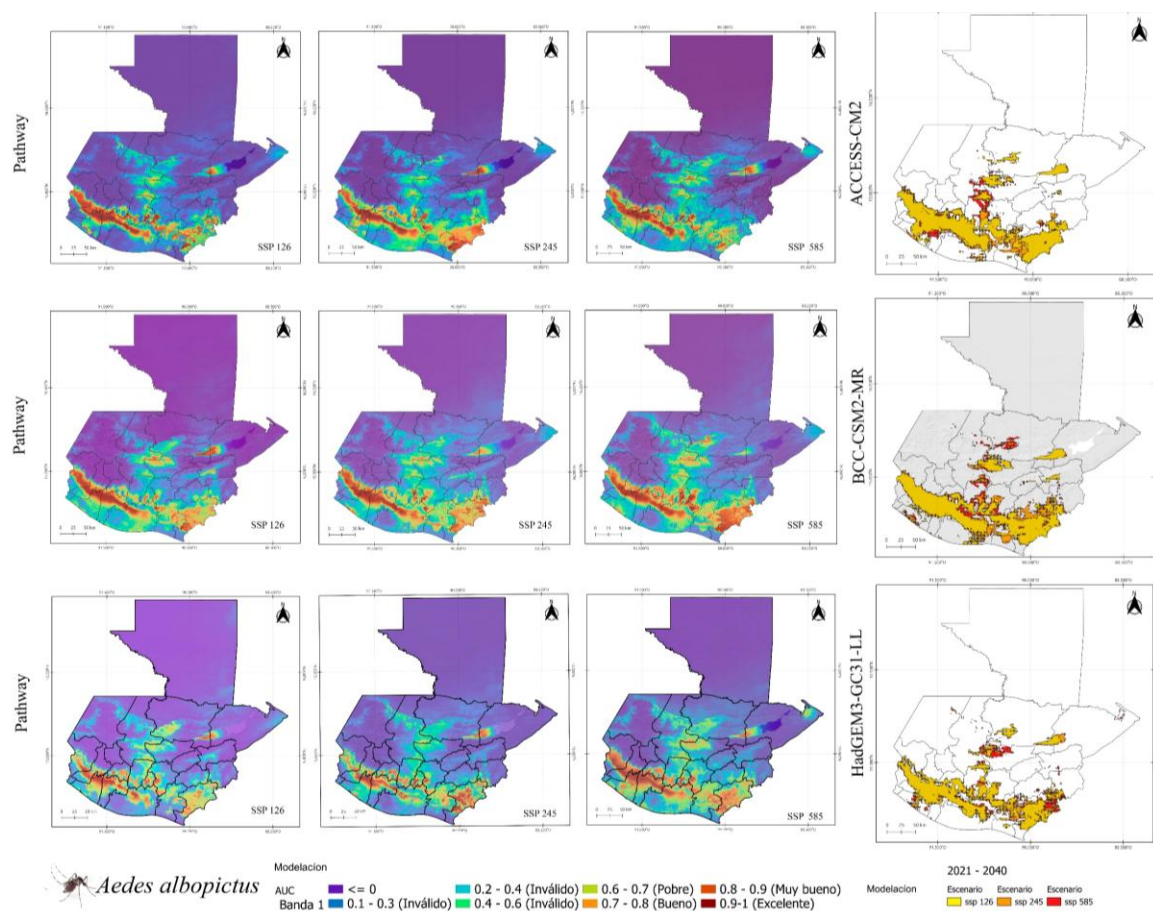
Las proyecciones basadas en los modelos climáticos CMIP6 (ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL) en cada escenario de emisiones (SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5) muestran que *Aedes albopictus* tiene idoneidad alta (≥ 0.8 de AUC) en las regiones cálido-húmedas de baja altitud, abarcando los departamentos de la costa del Pacífico (Escuintla, Suchitepéquez, Retalhuleu, Santa Rosa) y las áreas aledañas al sur de San Marcos.

La franja costera, exhibe condiciones propicias debido a las temperaturas mínimas que rara vez descienden de 15–20 °C. El total de los modelos (Figura, 19), para 2021–2040 se consolida

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

la presencia de *Aedes albopictus* en áreas cálidas-húmedas de baja altitud y se observa una expansión progresiva hacia zonas de altitud media.

Figura 19 Modelación en base a escenarios climáticos de circulación general para *Aedes albopictus* (2021-2040).

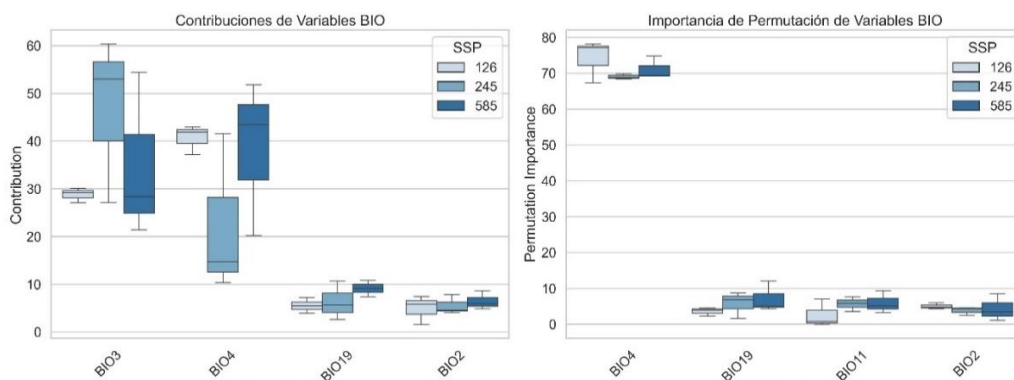


A diferencia de *Ae. aegypti*, con *Ae. albopictus* las variables bioclimáticas Bio03 (Isotermalidad), Bio04 (Estacionalidad de la temperatura), Bio02 (Rango diurno medio) y Bio19 (Precipitación en el trimestre más frío) se mantienen como factores dominantes. En resumen, sugeriría que tanto como una menor variación térmica beneficia el desarrollo de las fases inmaduras y reduce la mortalidad de huevos, impulsando la colonización en altitudes

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

mayores, incidiendo en la capacidad del mosquito para sobrevivir en meses de menor precipitación y amortiguar el estrés térmico diario (Figura, 20).

Figura 20 Contribuciones y permutación de las 4 variables más influyentes para *Aedes Albopictus* (2040-2060).

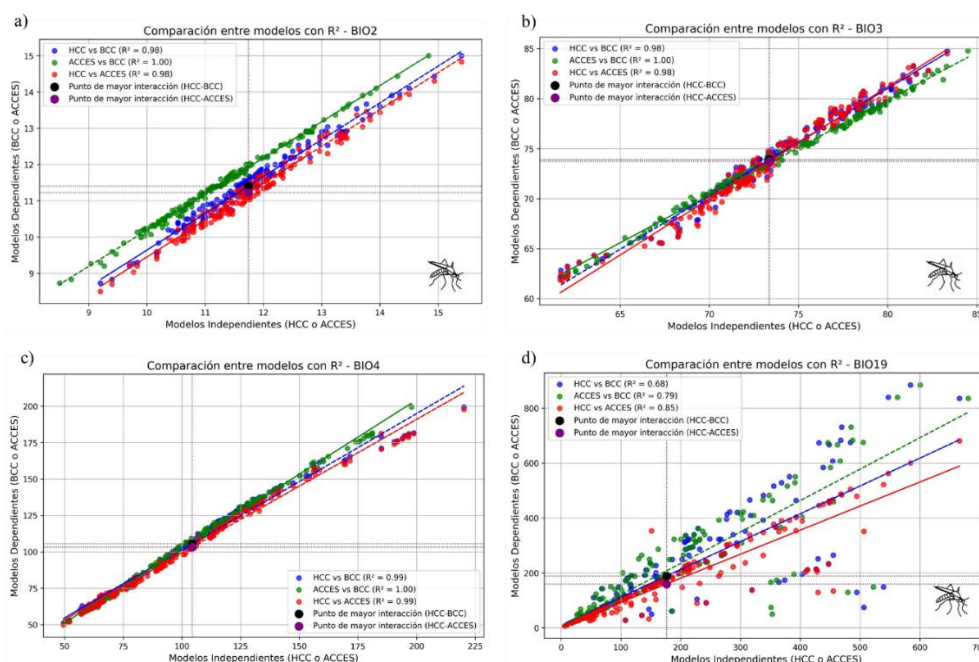


Los resultados tienen fuerte concordancia (Figura, 21) entre modelos climáticos en lo referente a las variables de temperatura (Bio02, Bio03, Bio04) para los años 2041-2060 son las mismas variables en *Ae. albopictus* en contraste con *Ae. aegypti*. Se implica que la proyección de la amplitud térmica (diurna y anual) y de la uniformidad de las temperaturas (isotermalidad) está bien representada por los GCM, reforzando la confiabilidad de los mapas de distribución potencial de vectores basados en dichas variables.

En cambio, la precipitación del trimestre frío (Bio19) muestra mayor dispersión entre los modelos, es más complejo modelar eventos de lluvia en meses tradicionalmente secos. Pequeñas discrepancias en la frecuencia de precipitaciones pueden generar diferencias en la estimación de criaderos disponibles, influyendo en la permanencia de huevos y larvas. Por tanto, si bien las variables térmicas apuntan a un escenario relativamente robusto, la incertidumbre en las proyecciones de precipitación exige cautela al extrapolar las implicaciones epidemiológicas.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Figura 21 Modelación en base a escenarios climáticos de circulación general para *Aedes albopictus* ((2040-2060).



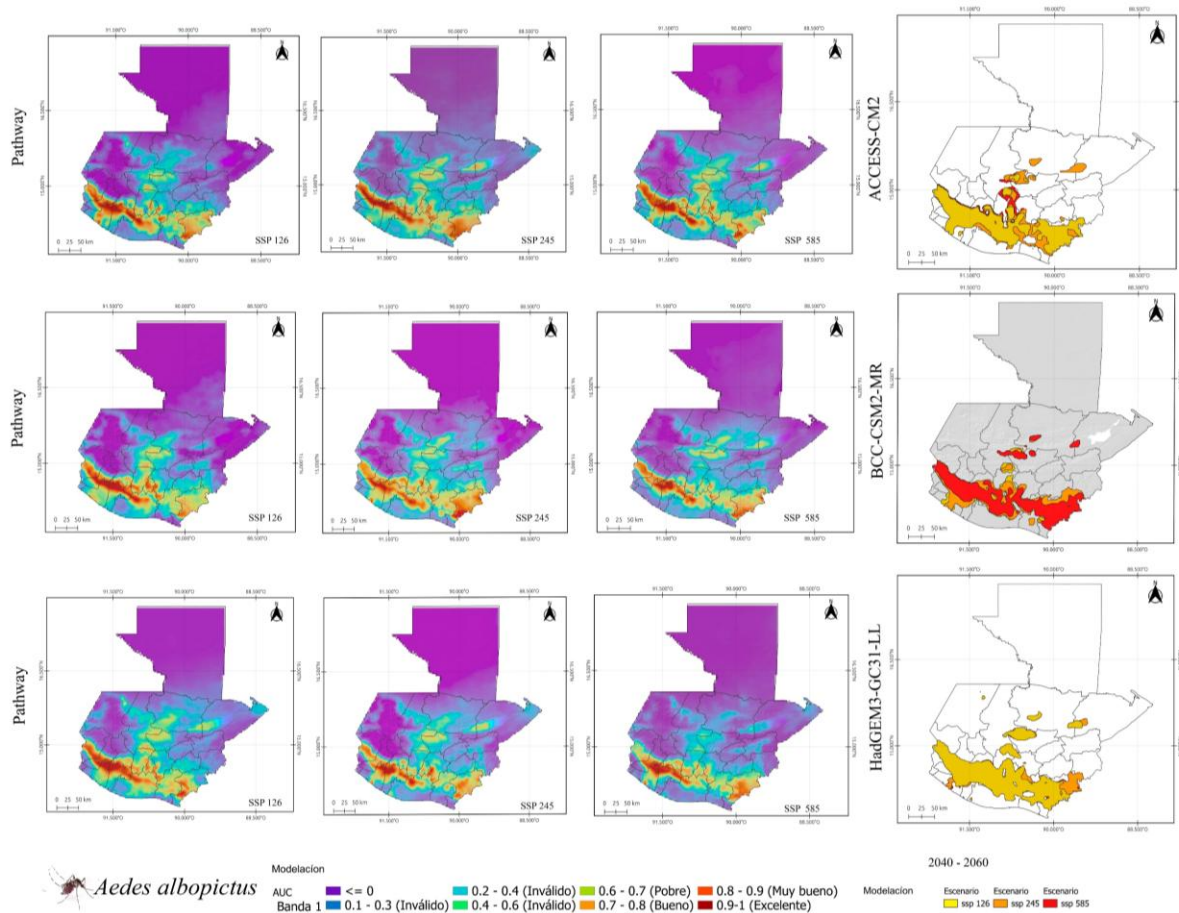
Las proyecciones de los modelos CMIP6 (ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL) bajo escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5 demuestran que existe expansión notable de *Aedes albopictus* en relación con 2021–2040, tanto en términos de extensión geográfica como de intensidad (valores de AUC). Regiones de baja altitud (Costa Sur, Valles Cálido-Húmedos) departamentos como Escuintla, Suchitepéquez, Retalhuleu y Santa Rosa consolidan condiciones “excelentes” (≥ 0.9 de AUC) en todos los escenarios, con un ascenso progresivo hacia zonas colindantes (sur de San Marcos, suroeste de Jutiapa). Se puede prolongar las fases de vidas del mosquito siendo más activos.

Altiplano central y occidental (Guatemala, Sacatepéquez, Chimaltenango, Quetzaltenango, Totonicapán) en valles urbanos y microclimas semi-cálidos por encima de 1,400–1,600 msnm, se observan expansiones (Figura,22). Región oriental (Zacapa, Chiquimula, Jalapa, El Progreso) Se proyecta un aumento de áreas “buenas” a “muy buenas” (0.7–0.9). Zona Norte

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

(Petén, Alta Verapaz, parte de Quiché) Los escenarios de forzamiento medio y alto (SSP2-4.5, SSP5-8.5) sugieren un ensanchamiento de zonas con $AUC \geq 0.8$. Las temperaturas mínimas cada vez menos restrictivas y la alta humedad relativa facilitan ciclos de cría casi continuos.

Figura 22 Modelación en base a escenarios climáticos de circulación general para *Aedes albopictus* ((2040-2060).



Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

12.2 Discusión de resultados

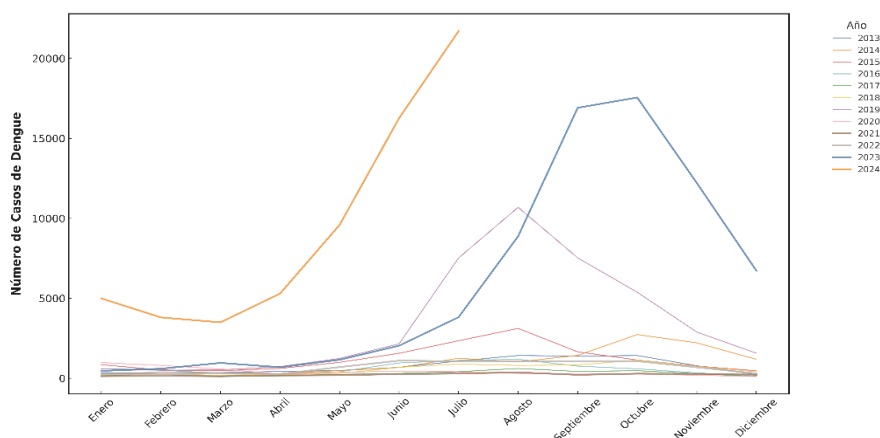
12.2.1. Distribución espacial y temporal de los casos de Dengue (Panorama 2013-2024)

El Departamento de Guatemala se destaca por reportar más de 40,000 casos en el período analizado, lo que coincide con su alta densidad demográfica y urbanización (riesgo de contagio). El riesgo de contagio será más prominente por las diferencias geográficas y estacionales pueden entenderse mediante la adaptación de *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus* a climas cálidos-húmedos (Figura, 5). En regiones de mayor altitud o con climas más fríos, la actividad de ambas especies se ve reducida, salvo que existan microclimas específicos que permitan su supervivencia (Furuya-Kanamori et al., 2016). Sin embargo, *Ae. albopictus* es reconocido por su gran plasticidad ecológica y su capacidad de colonizar ambientes con temperaturas más bajas que *Ae. aegypti*, lo que incrementa su potencial para dispersarse en zonas montañosas o templadas (Bouzid et al., 2014).

Se observa un pico estacional muy marcado entre junio y octubre (Figura 5), con un máximo en julio, superando los 40,000 casos acumulados. En los meses secos (noviembre-abril), hay un descenso notable de casos, lo que coincide con una disminución de la precipitación y, por ende, de los sitios de cría del mosquito. Aunque estos picos fueron parecidos durante 2013 al 2023. Los Reportes hasta junio del año 2024 han cambiado los rangos (Figura, 23), se aprecia un aumento significativo en 2023 y 2024, potencialmente relacionado con patrones anómalos de precipitación y temperatura, así como cambios en la efectividad de campañas de control vectorial.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Figura 23. Tendencias de casos de Dengue para Guatemala, anomalía en marzo del 2024 (Línea Naranja).



Al respecto de Patrones anómalos Paris y Salguero, 2022. Identificaron que la Oscilación Madden-Julian (OMJ) influye significativamente en los patrones de lluvia en la Costa Sur de Guatemala. Mediante análisis de frecuencias, transformada wavelet y espectro de potencia, existe una variabilidad en las precipitaciones asociada a los ciclos de la OMJ, entre 20 y 60 días. Los resultados muestran un comportamiento dual, con periodos que promueven un aumento en las precipitaciones y otros que inhiben las lluvias en esta región del país (entre los meses de julio y agosto). Las lluvias intermitentes podrían ser los factores claves para los rebrotes de casos (mayor probabilidad de supervivencia del mosquito), sumado a la posible relajación de medidas preventivas (Velasco-Salas et al., 2020). Con los datos en este estudio se observan estos mismos patrones para el aumento de casos de dengue.

12.2.2. Tendencias y picos de Dengue relacionados a la precipitación y temperatura (Escenario 2000-2024)

De la precipitación se puede observar que los meses de mayor lluvia (mayo, junio, julio, con ≥ 250 mm), (Figura, 6), se mantienen temperaturas medias de ~ 23 °C, lo que favorece el desarrollo de sitios de cría para *Ae. aegypti* y *Ae. albopictus*, el patrón de las temperaturas

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

coincide con las reportadas para incidencias de mosquitos por Lepe et al., 2016. No obstante, lluvias muy intensas pueden lavar los recipientes donde se acumule agua, también arrastrar larvas las larvas de mosquitos, fenómeno descrito como “*flushing effect*” (Caminade et al., 2017). Como condiciones entenderíamos que los niveles de mayor precipitación ayudaran a reducir el número de mosquitos en estado larval.

Dentro de los rangos para los brotes se confirman (Figura 7 y 8), que el rango óptimo de la temperatura media oscila entre 20–25 °C y la precipitación promedio mensual entre 100–200 mm coincide con las investigaciones a nivel mundial de Laporta et al., 2023, aunque el desarrollo no solo esta influencia por estas variables (Lega et al., 2017). En dicho intervalo, el tiempo de desarrollo larvario se acorta notablemente, y la longevidad de las hembras adultas se incrementa, resultados similares a las etapas inmaduras de la especie *Ae. albopictus* (Cai et al., 2023). Los rangos que se establecen son en base a los periodos actuales según el registro de índice de Dengue en Guatemala (2013-2024), (Figura, 8). Con respecto a las dos especies de mosquitos difieren en su tolerancia a la temperatura, *Ae. albopictus* presenta un rango más amplio en latitudes más altas (Dickens et al., 2018); como Totonicapan, que presento menores casos de Dengue reportados (Figura, 5).

Los resultados del Índice Compuesto que combina la magnitud de la ola de calor (°C por encima del percentil 90) y la duración (días consecutivos >p90), (Figura, 9). Brotes por encima de 1000 casos se concentran con índices moderados (1–2 °C por encima de la media) y duraciones de 5–20 días. Lo que significaría que *Ae. aegypti* y *Ae. albopictus* pueden experimentar ciclos de desarrollo más rápidos bajo calor sostenido (sin poco cambio o variación), incrementando la densidad vectorial en un corto periodo, explicado por Marini et al., 2020, donde se completaron los rangos promedio de ciclos gonotróficos en mosquitos hembra a 25 y 30 °C (*Ae. albopictus*), coincidiendo con rangos similares donde hay más casos de Dengue para Guatemala.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Se debe de considerar, que sí hay un aumento en la temperatura de los departamentos donde los casos de dengue son menores (El progreso, Totonicapán, Chimaltenango, Retalhuleu, Sololá, Izabal) aumentara el número de casos como el área para que *Ae. Aegypti* se puede reproducir y sobrevivir. Liu-Helmersson et al., (2016) señalan que, ante temperaturas por encima de 25–28 °C (similares a las que se han predicho en el modelo Dengue/Temperatura y Precipitación).

La tasa de supervivencia de *Ae. aegypti* puede disminuir. *Ae. albopictus*, por su parte, tolera un rango algo más amplio, pero también sufre estrés cuando la precipitación es extremadamente alta, siendo también el factor importante de las áreas urbanas y temporadas de calor, los que afectaran de manera directa la proliferación (de-Azevedo. 2018). Siendo estados inmaduros del mosquito de interés a analizar para evitar mayor incidencia y control sobre estos departamentos.

La curva de *Lag* que se creó (Figura, 10), nos permite correlacionar si este patrón sigue una distribución con el ciclo de vida de los mosquitos, un desfase (lag) de 2–3 meses fue el resultado entre la variabilidad climática (temperatura, precipitación) y la incidencia de dengue ($\rho \approx 0.43$). Indicando que la viabilidad de huevos y larvas se materializa en brotes luego de un período de incubación extrínseca y de la dinámica de transmisión humano-vector-humano (Liu-Helmersson et al., 2016). La detección del lag, puede ser útil para que las autoridades sanitarias y a la comunidad refuercen acciones preventivas (eliminación de criaderos, campañas de fumigación, sensibilización ciudadana)

El comportamiento de la curva apoya la idea de que existe un retraso biológico y epidemiológico entre las condiciones climáticas favorables (temperatura y precipitación en intervalos óptimos) y el aumento en la incidencia de dengue. Este intervalo de 2–3 meses concuerda con el ciclo de desarrollo del vector, la duración de su fase infectiva y la dinámica de transmisión entre el ser humano y el mosquito (Dickens et al., 2018). El valor de ρ

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

(*Spearman*) indica una correlación moderada pero consistente, lo que implica que el clima es un factor influyente, pero no el único determinante (también inciden la densidad poblacional, control vectorial, comportamientos sociales, entre otros) los cuales se deberían de analizar, pues la asociación con variables climáticas solo muestra cierto grados de tendencia, al igual que si solo se aplicaran socio-económicas (Salim et al., 2024), Guatemala es muy diverso en cultura y turismo.

12.2.3. Rangos bioclimáticos encontrados en los modelos futuros (2021-2060)

Los modelos concuerdan ampliamente (ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL), ($R^2 > 0.95$) al proyectar Bio02, Bio03 y Bio04 (temperaturas), lo que señala una buena relación en los parámetros térmicos, el calentamiento sostenido y una variación moderada de las temperaturas diarias/anuales, beneficiando la sobrevivencia de ambos vectores (mosquitos). Rango diurno reducido (noches menos frías, días no tan calurosos) facilita la supervivencia de huevos y larvas de los mosquitos *Aedes aegypti* se beneficia cuando las noches no descienden por debajo de $\sim 15^\circ\text{C}$, acortando el ciclo larvario (Guzmán y Harris, 2015). *Aedes albopictus* tolera incluso rangos diurnos ligeramente mayores, pero si la temperatura nocturna no baja en exceso, mantiene criaderos activos en zonas medianamente frías (Bouzid et al., 2014), (Tabla, 2).

De las precipitaciones (Bio14, Bio15, Bio19), se puede distinguir que las diferencias de entre 20-30 mm, pueden determinar la supervivencia de larvas en zonas secas (Zacapa, Chiquimula o valles del altiplano), variabilidad de lluvias a lo largo del año; pueden causar efectos en brotes: promueven aumentos poblacionales de mosquitos. No obstante, si la sequía dura demasiados meses, los criaderos pueden reducirse, interrumpiendo la transmisión (Reiter, 2001). Un mínimo de $\sim 50\text{--}100$ mm en la estación fría puede mantener depósitos de agua, generando escenarios con mayor o menor persistencia de huevos/larvas. *Aedes albopictus* es especialmente sensible a este factor para ascender a altitudes más frías, siempre que haya algo de agua residual, las capacidades de colonizar son mayores (Kraemer et al., 2019), (Tabla, 2).

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

A continuación, en la Tabla 2, se hace un resumen de los valores aproximados que se encontraron en promedio para los modelos con las implicaciones que podrían tener en base a los rangos establecidos, las mayorías de rangos coinciden con otros trabajos, Lamy et al., 2023, destacó la importancia de la temperatura para la supervivencia y la incubación extrínseca del virus en vectores como *A. aegypti* Reiter (2001), demuestra que la estacionalidad, en el caso del modelo nuestro (Bio04, Bio15) influye en la temporalidad de los brotes de dengue y otros arbovirus; sequías prolongadas pueden interrumpir la transmisión, pero ciclos marcados de lluvia/sequía producen brotes Brady et al., (2013), en este documento se enfatiza el rol de la precipitación mínima y otras variables (Bio14, Bio19) que permite criaderos durante la época seca.

La estacionalidad de la precipitación incrementa la variabilidad interanual y promueve picos epidémicos intensos Bouzid et al., (2014), Argumenta que *A. albopictus* tiene mayor plasticidad térmica y puede colonizar regiones templadas si hay agua suficiente como el caso de (Bio14, Bio19). Lima et al., 2018 muestran que lluvias mínimas en el periodo frío puede sostener la persistencia invernal del vector, evitando su desaparición y permitiendo que los brotes resurjan, siendo la precipitación la que influya. Kraemer et al., (2019) evidencia con modelos y mapas predictivos la expansión de *A. albopictus* está ligada al cambio climático.

Tabla 2. Rangos de las variables climáticas de cada escenario CMIP6 en este estudio.

Período	aproximado en modelos	Valores relevantes encontrados para Aedes	Variable
2021 2040	8–14 °C (±1 según región)	Rango diurno $\leq 10\text{--}12$ °C condiciones estables día/noche, favoreciendo supervivencia de <i>A. aegypti</i> en zonas de baja altitud. <i>Ae. albopictus</i> tolera incluso rangos de altitud mayores (Lamy et al., 2023), pero noches “no tan frías” mantienen su reproducción.	Bio02 (Rango diurno de
2041 2060	9–15 °C	El incremento adicional de 1 °C en la mínima nocturna extiende la ventana de transmisión a regiones altiplánicas ($\geq 1,400$ msnm).	Temperatura)

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Período	aproximado en modelos	Valores relevantes encontrados para Aedes	Variable
	(±1–2 en escenarios altos)	Ambos vectores se benefician de menor estrés térmico nocturno (Guzmán y Harris, 2015, Lamy et al., 2023).	
2021 2040	60–80 (índice)	A mayor isothermalidad (≥ 70), menor variación térmica (Bouزيد et al., 2014), facilitando la persistencia continua de huevos/larvas. Principalmente influye en <i>A. albopictus</i> , con plasticidad para ambientes más fríos.	Bio03 (Isothermalidad)
2041 2060	65–85 (en algunos modelos)	Escenarios de forzamiento alto (SSP5-8.5) proyectan isothermalidad elevada: menor contraste estacional, mayor oportunidad de brotes sostenidos de dengue.	
2021 2040	50–200 (variando según altitud)	Una estacionalidad de 50–100 indica climas relativamente uniformes alta aptitud para ambos vectores (Guzmán & Harris, 2015). En regiones con > 150 , hay marcados inviernos que pueden reducir temporalmente la población.	Bio04 (Estacionalidad de la temperatura)
2041 2060	60–225 (escenarios altos muestran > 180)	El calentamiento en Guatemala puede permitir la expansión altitudinal de <i>A. aegypti</i> y <i>A. albopictus</i> . Oscilaciones muy altas (≥ 200) aún suponen riesgo de interrupciones, pero menos severas que en décadas pasadas.	
2021 2040	0–110 mm (rara vez ~120–140 en zonas muy húmedas)	Si este valor ≥ 20 –30 mm (diario), los criaderos pueden persistir incluso en el mes más seco. Diferencias de ~30 mm entre modelos cambian la clasificación de “pobre” a “moderada” idoneidad, sobre todo en oriente y altiplano bajo.	Bio14 (Precipitación del mes más seco)
2041 2060	0–120 mm (± 20 –30 según escenarios)	Con mayores emisiones, algunas zonas secas podrían recibir ligeros aumentos de <i>A. albopictus</i> porque se establece en valles semiáridos. <i>A. aegypti</i> depende fuertemente de estos valores para no perder criaderos en meses secos.	
2021 2040	40–100 (≤ 110 en regiones con ciclos muy marcados)	Una alta estacionalidad (≥ 80) genera brotes intensos en la temporada lluviosa, pero la sequía posterior puede cortar la transmisión. La distribución de ambos vectores con picos epidémicos localizados se puede manifestar (Brady et al., 2013).	Bio15 (Estacionalidad de la precipitación)

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Período	aproximado en modelos	Valores relevantes encontrados para <i>Aedes</i>	Variable
2041 2060	50–110	Los escenarios (SSP5-8.5) mantienen o aumentan la variabilidad de las lluvias, con picos más extremos. <i>A. albopictus</i> aprovecha períodos de lluvia puntuales para colonizar zonas templadas.	
2021 2040	0–500 mm (hasta ~600 en zonas tropicales)	Valor crítico para la supervivencia invernal de huevos/larvas (Lamy et al., 2023), <i>A. aegypti</i> requiere que no se seque por completo; <i>A. albopictus</i> puede tolerar un poco más de aridez, pero se expande más si Bio19 \geq 100 mm.	Bio19 (Precipitaciones en el trimestre más frío)
2041 2060	0–600+ mm (discrepancias de hasta ~100 mm)	La incertidumbre más alta se concentra en ($R^2 \sim 0.60-0.85$). Un salto de 50–100 mm puede convertir áreas “marginales” en “buenas” (≥ 0.7 de idoneidad), impulsando la colonización altitudinal.	

12.2.4. Proyecciones de escenarios futuros *Aedes aegypti* (2021-2060)

Los modelos CMIP6 seleccionados en este estudio (ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL) en los escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5, para los períodos 2021–2040 como para 2041–2060, indican un incremento sostenido de la idoneidad Guatemala (Nuevas zonas donde antes no existía el mosquito) para *Aedes aegypti*.

Existen posibilidades que persistirán y aumenten casos de dengue, en regiones costeras y de baja altitud (Boca-costa), departamentos como Escuintla, Suchitepéquez, Retalhuleu, Santa Rosa y sur de San Marcos, resultados que son muy parecidos a la distribución en el avance de los casos de dengue reportados en Guatemala (Castillo-Signor et al., 2020): En ambas ventanas temporales (2021 hasta 2060), los modelos coinciden en mantener valores de idoneidad muy altos ($AUC \geq 0.85$) en la llanura costera del Pacífico y los valles adyacentes.

La combinación de temperaturas mínimas moderadas (≥ 20 °C) y precipitaciones estacionales propicia la presencia de criaderos. Bajo escenarios de emisiones más elevadas (SSP2-4.5 y

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

SSP5-8.5), se prevé una expansión horizontal de las zonas de idoneidad ≥ 0.9 , cubriendo porciones más amplias en la frontera entre Escuintla–Suchitepéquez o Santa Rosa–Jutiapa, esto puede deberse a que en estas zonas existen variaciones en la precipitación (Paris y Salguero, 2022) y los rangos de temperatura en algunos departamentos ha ido en aumento desde 1970 hasta el 2021 (Ochoa-Orozco et al., 2022)

De la expansión altitudinal en el altiplano central y occidental, en los departamentos de Guatemala, Sacatepéquez, Chimaltenango, Sololá, Quetzaltenango, Totonicapán: Durante 2021–2040, se observan parches de idoneidad moderada (0.6–0.8) en valles o microcuencas urbanas (por ejemplo, la ciudad de Guatemala y áreas conurbadas). Hacia 2041–2060, se observa (Figura, 13 y 16) un desplazamiento altitudinal del vector, con idoneidad de 0.7–0.8 incluso en zonas que rondan los 1,500–1,800 msnm. El ascenso de la temperatura mínima — ya sea por el propio cambio climático o por el efecto de isla de calor urbana— puede reducir la barrera térmica que limita la reproducción de *Aedes aegypti* (Laporta et al., 2023).

Además, si las lluvias se vuelven más irregulares pero intensas en periodos cortos, aparecen criaderos temporales que facilitan picos epidémicos localizados. Municipios con baja tasa de dengue (por estar en clima templado a frío) podrían enfrentar brotes inesperados. Un fenómeno que se ha venido dando durante los últimos 20 años con evidencias, es que las temperaturas máximas han ido en aumento, principalmente en periodos caniculares (Julio, mes de mayor proliferación de Mosquitos), (Ochoa-Orozco et al., 2022). Por esta razón se ve el aumento en la distribución de los nichos ecológicos de la especie *Ae. Aegypti*.

El escenario SSP1-2.6 (bajo) muestra incrementos más moderados, mientras que SSP5-8.5 (alto) revela una expansión marcada hacia altitudes mayores y latitudes más frías, con valores de idoneidad “excelentes” (≥ 0.9) en zonas que antes se consideraban marginales. El aumento de las temperaturas mínimas en el altiplano y regiones orientales reduce la barrera para la

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

supervivencia de huevos y larvas, extendiendo el hábitat efectivo del mosquito (Knudsen et al., 2021).

12.2.5. Proyecciones de escenarios futuros *Aedes albopictus* (2021-2060)

Los modelos CMIP6 seleccionados en este estudio (ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR, HadGEM3-GC31-LL) en los escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5. Región Oriental (Zacapa, Chiquimula, Jalapa, El Progreso) Se proyecta un aumento de áreas que el mosquito puede colonizar (0.7–0.9), ligadas a la combinación de altas temperaturas diurnas. Bajo SSP5-8.5, la idoneidad se incrementa aún más. Estudios recientes indican cambios climáticos significativos en Guatemala y Centroamérica.

Las tendencias de temperatura muestran un calentamiento general, con incrementos de 1-2°C observados en algunas regiones de Guatemala durante el período de sequía de mediados de verano (Ochoa-Orozco et al., 2022), aunque hay variaciones entre modelos sobreestimando, es difícil predecir otros fenómenos naturales (Rivera et al., 2021) , se tendrá que analizar estacionalidades de la precipitación y analizar cómo puede influir El Niño y La Niña, los cuales en los modelos podría sobre estimar poblaciones tales como en el caso de *Ae. aegypti* y *Ae. albopictus*.

De 2021 al 2060, se aprecia una expansión horizontal de las zonas con $AUC \geq 0.8$ hacia departamentos con altitud media, sobre todo en el corredor central (Chimaltenango, Guatemala) y el altiplano sur-occidental (Quetzaltenango, Sololá). Bajo SSP5-8.5, la franja costera se consolida como zona de riesgo extremo (≥ 0.9), destacando áreas como Escuintla, Retalhuleu y Suchitepéquez, donde la alta humedad y las mínimas en torno a 20–23 °C facilitan la densidad vectorial. Las zonas de estas proyecciones son parecidas a las mencionadas, por que para el año 2050, se proyecta que la temperatura aumente en 0.5 °C y 2.5 °C en Guatemala, además se espera disminución en la precipitación de 0 a 10 % en el sur, el altiplano occidental

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

y Huehuetenango, Quiché, Baja Verapaz y el oeste de Alta Verapaz, y de 10 a 20 % en la región central y el nororiente, que afectan diversas zonas de vida ecológica del país (Rivera et al., 2019)

La extensión o nuevas áreas de colonización en ambas especies (*Ae. aegypti* y *Ae. albopictus*) se reflejan en las figuras 19 y 22, es muy consistente decir que el clima influye en la ecología del dengue al afectar la dinámica de los vectores, el desarrollo del virus y las interacciones entre humanos y mosquitos (Morin et al., 2013). Pero la relación entre dengue y factores climáticos es muy compleja, hay que destacar factores sociales, económicos y rangos de edades para predecir con más precisión.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

13 Conclusiones

a) Se estima que 20 de los 22 departamentos serán afectados por el dengue, y actualmente se han reportado casos en regiones no previstas, como Totonicapán y Alta Verapaz. Más del 80 % de los casos han aumentado en los últimos cinco años (2019-2023), con una fuerte influencia de la estacionalidad de la precipitación y las olas de calor (picos de casos Junio y septiembre). Sin embargo, para un análisis más preciso de los posibles contagios, se debe incluir variables sociales y rangos de edad. A través de mapas, se han identificado áreas con alto potencial de propagación para futuras investigaciones (AUC= 0.8 a 0.9). Los modelos climáticos basados en CMIP6 que se utilizaron en este estudio no presentan diferencias significativas. La comparación de estos modelos revela variables bioclimáticas clave que podrían optimizar la precisión de los algoritmos de simulación. Es fundamental analizar las zonas más propensas a la colonización del mosquito para implementar estrategias epidemiológicas eficaces y mitigar la propagación de la enfermedad.

b) Se desarrollo un modelo predictivo con las olas de calor en base al Percentil 90, determinando que sí existe un aumento de 1 a 2 C en zonas donde antes no se registraban muchos brotes (El progreso, Totonicapán, Chimaltenango, Retalhuleu, Sololá, Izabal) pueden aumentar si se mantienen olas de calor constante de 5–20 días a partir de los 23.5 °C, significaría que *Ae. aegypti* y *Ae. albopictus* pueden experimentar ciclos de desarrollo más rápidos bajo por ende mayor riesgo de contagio. Se observa un pico a los 2–3 meses esperando mayor incidencia de dengue cuando la temperatura media favorezca la biología de *Aedes aegypti* y *A. albopictus*. Hacia los 6–8 meses, la correlación llega a valores negativos, sugiriendo que tras ese lapso ya no se mantiene el efecto positivo de la temperatura sobre el brote; y cerca de 12 meses reaparece un leve repunte (Enero puede aumentar), ligado a la estacionalidad anual.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

c) Las precipitaciones de 250mm a 300mm por mes favorecen que aumenten la población de mosquitos, precipitaciones mayores pueden reducir el número de casos, además se establece un rango 25–28 °C (predicho en el modelo Dengue/Temperatura y Precipitación), que marca la constante de proliferación de mosquitos y aumento de riesgo de contagio. Los modelos de estacionalidad de la onda de calor y predicciones por medio de máxima entropía, determinan rangos similares además las variables bioclimáticas concuerdan con los rangos estimados en la onda de calor. Siendo necesario tomar acciones, se observan que en los escenarios SSP5-8.5 ambas especies de mosquitos obtendrán más espacio fisiográfico para su colonización.

14 Recomendaciones

Realizar vigilancia y monitoreo entomológico ampliado según las proyecciones: *Ae. albopictus* estará distribuyéndose en rangos altitudinales mayores lo cual permitirá que aparezca en departamentos con menor tradición de dengue, urge ampliar la red de ovitrampas y larvitrapas en ciudades como Quetzaltenango, Totonicapán, Cobán y sectores periurbanos de la ciudad de Guatemala. La vigilancia debe integrar la detección molecular de virus (dengue, Zika) para anticipar brotes y coordinar acciones de fumigación focalizada.

Alertas Tempranas: Coordinar con instituciones que monitorean la precipitación y la temperatura (ej. INSIVUMEH en Guatemala) para detectar anomalías (fenómenos El Niño y La Niña) o picos de calor que favorezcan el salto demográfico de la especie. Diseñar indicadores de “*Riesgo Arboviral*” que combinen precipitación prevista, temperaturas mínimas y densidad vectorial histórica, permitiendo a las autoridades prepararse con antelación.

Investigación: ahondar en la interacción ecológica entre *Ae. aegypti* y *Ae. albopictus*, dado que ambas especies comparten nichos y podrían influir recíprocamente en la dinámica de transmisión viral con riesgos de otras enfermedades no solo de Dengue sino de Zika y Chinkungunya. Es necesario que el ministerio de salud registre los datos diarios para establecer patrones de correlación más precisos en base a los datos meteorológicos.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

15 Referencias

Ahmetolan, S., Bilge, A. H., Demirci, A., & Peker Dobie, A. (2022). A Susceptible–Infectious (SI) model with two infective stages and an endemic equilibrium. *Mathematics and Computers in Simulation*, 194, 19–35. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2021.11.003>

Ahmadi, M., Hemami, M. R., Mohammad, K. F., y Shabani, F. (2023). MaxEnt brings comparable results when the input data are being completed: Model parameterization of four species distribution models. *Ecology and Evolution*, 13(1). <https://doi.org/10.1002/ece3.9827>

Ahmadi, M., Hemami, M.-R., Kaboli, M., Malekian, M., y Zimmermann, N. E. (2019). Extinction risks of a Mediterranean neo-endemism complex of mountain vipers triggered by climate change. *Scientific Reports*, 9(1), 1–12

Al-Ghussain, L. (2018). Global warming: review on driving forces and mitigation. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38(1), 13–21. <https://doi.org/10.1002/ep.13041>

Araque Pérez, J. (2023). Distribución potencial de *Tropidacris cristata dux* (Drury, 1773) y una de sus plantas hospederas, *Quassia amara* (L.). *Revista nicaragüense de entomología*, 318, 1–28. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10278396>

Bhatia, S., Bansal, D., Patil, S. H., Pandya, S., Ilyas, Q. M., y Imran, S. (2022, May 27). A Retrospective Study of Climate Change Affecting Dengue: Evidences, Challenges and Future Directions. *Frontiers in Public Health*. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.884645>

Bhatt, S., Gething, P. W., Brady, O. J., Messina, J. P., Farlow, A. W., Moyes, C. L., Drake, J. M., Brownstein, J. S., Hoen, A. G., Sankoh, O., Myers, M. F., George, D. B., Jaenisch, T., Wint, G. R., Simmons, C. P., Scott, T. W., Farrar, J. J., & Hay, S. I. (2013). The global distribution and burden of dengue. *Nature*, 496(7446), 504–507. <https://doi.org/10.1038/nature12060>

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Bouzid, M., Colón-González, F. J., Lung, T., Lake, I. R., y Hunter, P. R. (2014). Climate change and the emergence of vector-borne diseases in Europe: Case study of dengue fever. *BMC Public Health*, 14, 781. <https://doi.org/10.1186/1471-2458-14-781>

Bouzid, M., Colón-González, F. J., Lung, T., Lake, I. R., y Hunter, P. R. (2014). Climate change and the emergence of vector-borne diseases in Europe: Case study of dengue fever. *BMC Public Health*, 14(1), 781. <https://doi.org/10.1186/1471-2458-14-781>

Burgess, M. G., Pielke, R., y Ritchie, J. (2022). Catastrophic climate risks should be neither understated nor overstated. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(42), e2214347119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2214347119>

Cai, X., Zhao, J., Deng, H., y others. (2023). Effects of temperature, relative humidity, and illumination on the entomological parameters of *Aedes albopictus*: An experimental study. *International Journal of Biometeorology*, 67(4), 687–694. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02446-y>

Caminade, C., Turner, J., Metelmann, S., Hesson, J. C., Blagrove, M. S. C., Solomon, T., Morse, A. P., y Baylis, M. (2017). Global risk model for vector-borne transmission of Zika virus reveals the role of El Niño 2015. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(1), 119–124. <https://doi.org/10.1073/pnas.1614303114>

Castillo Signor, L. d. C., Edwards, T., Escobar, L. E., Mencos, y., Matope, A., Castaneda-Guzman, M., y et al. (2020). Epidemiology of dengue fever in Guatemala. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 14(8), e0008535. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0008535>

Castellanos (Ed.). (2019). *Primer Reporte de Evaluación del conocimiento sobre el Cambio Climático en Guatemala* (1st ed.). Sistema Guatemalteco de Ciancias del Cambio Climático (SGCCC).

Chophel, Y (2022). Global Warming and Climate Change (GWCC) Realities. In *The Nature, Causes, Effects and Mitigation of Climate Change on the Environment*; IntechOpen: London, UK; Volume 3

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

de Azevedo, T. S., Bourke, B. P., Piovezan, R., y Sallum, M. A. M. (2018). The influence of urban heat islands and socioeconomic factors on the spatial distribution of *Aedes aegypti* larval habitats. *Geospatial Health*, 13(1), e623. <https://doi.org/10.4081/gh.2018.623>

De Souza, R. L., Nazaré, R. J., Argibay, H. D., Pellizzaro, M., Anjos, R. O., Portilho, M. M., Jacob-Nascimento, L. C., Reis, M. G. D., Kitron, U., y Ribeiro, G. S. (2023). Density of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) in a low-income Brazilian urban community where dengue, Zika, and chikungunya viruses co-circulate. *Parasites & Vectors*. <https://doi.org/10.1186/s13071-023-05766-5>

Dickens, B. L., Sun, H., Jit, M., Cook, A. R., y Carrasco, L. R. (2018). Determining environmental and anthropogenic factors which explain the global distribution of *Aedes aegypti* and *Ae. albopictus*. *BMJ Global Health*, 3(1), e000801. <https://doi.org/10.1136/bmjgh-2018-000801>

Du, M., Jing, W., Liu, M., y Liu, J. (2021). The Global Trends and Regional Differences in Incidence of Dengue Infection from 1990 to 2019: An Analysis from the Global Burden of Disease Study 2019. *Infectious diseases and therapy*, 10(3), 1625–1643. <https://doi.org/10.1007/s40121-021-00470-2>

Fick, S.E. y Hijmans, R.J. (2017). WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302-4315.

Fielding, A. H., y Bell, J. F. (1997). A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation*, 24(1), 38–49.

Furuya-Kanamori, L., Liang, S., Milinovich, G., Soares Magalhaes, R. J., Clements, A. C., Hu, W., Brasil, P., Frentiu, F. D., Dunning, R., y Yakob, L. (2016). Co-distribution and co-infection of chikungunya and dengue viruses. *BMC Infectious Diseases*, 16(1), 84. <https://doi.org/10.1186/s12879-016-1417-2>

Franklin, J. (2010). *Model evaluation and implementation*. In *Mapping species distributions: Spatial inference and prediction* (pp. 207–208). Cambridge University Press.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

García, Y. E., Chou-Chen, S. W., Barboza, L. A., Daza-Torres, M. L., Montesinos-López, J. C., Vásquez, P., Calvo, J. G., Nuño, M. A., y Sánchez, F. (2023). Common patterns between dengue cases, climate, and local environmental variables in Costa Rica: A wavelet approach. *PLOS Global Public Health*. <https://doi.org/10.1371/journal.pgph.0002417>

Guzman, M. G., Alvarez, M., y Halstead, S. B. (2013). Secondary infection as a risk factor for dengue hemorrhagic fever/dengue shock syndrome: an historical perspective and role of antibody-dependent enhancement of infection. *Archives of virology*, 158(7), 1445–1459. <https://doi.org/10.1007/s00705-013-1645-3>

Guzman, M. G., y Harris, E. (2015). Dengue. *The Lancet*, 385(9966), 453–465. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)60572-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)60572-9)

Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P. D., y Lister, D. H. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 7(1), 109.

Hayman, D. T., Adisasmito, W. B., Almuhairi, S., Behraves, C. B., Bilivogui, P., Bukachi, S. A., Casas, N., Becerra, N. C., Charron, D. F., Chaudhary, A., Ciacci Zanella, J. R., Cunningham, A. A., Dar, O., Debnath, N., Dungu, B., Farag, E., Gao, G. F., Khaitsa, M., Machalaba, C., . . . Koopmans, M. (2023). Developing One Health surveillance systems. *One Health*, 17, 100617. <https://doi.org/10.1016/j.onehlt.2023.100617>

Iguchi, J.A., Seposo, X.T. & Honda, Y. Meteorological factors affecting dengue incidence in Davao, Philippines. *BMC Public Health* 18, 629 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12889-018-5532-4>

IPCC. (2019). *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* (P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas,

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, & J. Malley, Eds.). Consultado, Noviembre 2024, disponible en línea: [Special Report on Climate Change and Land — IPCC site](#)

Jia, P., Liang, L., Tan, X., Chen, J., y Chen, X. (2019). Potential effects of heat waves on the population dynamics of the dengue mosquito *Aedes albopictus*. *PLOS Neglected Tropical Diseases*, 13(7), e0007528. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0007528>

Juckes, M., Taylor, K. E., Durack, P. J., Lawrence, B., Mizielinski, M. S., Pamment, A., Peterschmitt, J.-Y., Rixen, M., y Sénési, S. (2020). The CMIP6 Data Request (DREQ, version 01.00.31). *Geoscientific Model Development*, 13(1), 201–224. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-201-2020>

Kraemer, M. U. G., Reiner, R. C., Jr, Brady, O. J., Messina, J. P., Gilbert, M., Pigott, D. M., Yi, D., Johnson, K., Earl, L., Marczak, L. B., Shirude, S., Davis Weaver, N., Bisanzio, D., Perkins, T. A., Lai, S., Lu, X., Jones, P., Coelho, G. E., Carvalho, R. G., Van Bortel, W., ... Golding, N. (2019). Past and future spread of the arbovirus vectors *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*. *Nature Microbiology*, 4(5), 854–863. <https://doi.org/10.1038/s41564-019-0376-y>

Lamy, K., Tran, A., Portafaix, T., Leroux, M. D., y Baldet, T. (2023). Impact of regional climate change on the mosquito vector *Aedes albopictus* in a tropical island environment: La Réunion. *Science of The Total Environment*, 875, 162484.

Laporta, G. Z., Potter, A. M., Oliveira, J. F. A., Bourke, B. P., Pecor, D. B., y Linton, Y. M. (2023). Global distribution of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* in a climate change scenario of regional rivalry. *Insects*, 14(1), 49. <https://doi.org/10.3390/insects14010049>

Lega, J., Brown, H. E., y Barrera, R. (2017). *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) abundance model improved with relative humidity and precipitation-driven egg hatching. *Journal of Medical Entomology*, 54(5), 1375–1384. <https://doi.org/10.1093/jme/tjx077>

Lepe López, M. A., Dávila, M., Canet, M., Lopez, Y., Flores, E., Dávila, A., y Escobar, L. E. (2017). Distribución de *Aedes aegypti* y *Aedes albopictus* en Guatemala 2016. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 4(1), 21–31. <https://doi.org/10.36829/63CTS.v4i1.239>

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Li, C., Liu, Z., Li, W., Lin, Y., Hou, L., Niu, S., Xing, Y., Huang, J., Chen, Y., Zhang, S., Gao, X., Xu, Y., Wang, C., Zhao, Q., Liu, Q., Ma, W., Cai, W., Gong, P., y Luo, Y. (2023, May). Projecting future risk of dengue related to hydrometeorological conditions in mainland China under climate change scenarios: a modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 7(5), e397–e406. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(23\)00051-7](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(23)00051-7)

Li, C., Lu, Y., Liu, J., y Wu, X. (2018, May). Climate change and dengue fever transmission in China: Evidences and challenges. *Science of the Total Environment*, 622–623, 493–501. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.326>

Lima, S. F. S., Barrozo, L. V., y Mataveli, G. A. V. (2018). Temperatura da superfície e precipitação que influenciam na incidência do *Aedes aegypti* em São Paulo. *Revista do Departamento de Geografia*, spe, 174–183. <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.145697>

Liu-Helmersson, J., Quam, M., Wilder-Smith, A., Stenlund, H., Ebi, K., Massad, E., y Rocklöv, J. (2016). Climate change and *Aedes* vectors: 21st-century projections for dengue transmission in Europe. *EBioMedicine*, 7, 267–277.

Liu-Helmersson, J., Quam, M., Wilder-Smith, A., Stenlund, H., Ebi, K., Massad, E., y Rocklöv, J. (2016). Climate change and *Aedes* vectors: 21st century projections for dengue transmission in Europe. *eBioMedicine*, 7, 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2016.03.046>

Liu, Z., Zhang, Q., Li, L., He, J., Guo, J., Wang, Z., Huang, Y., Xi, Z., Yuan, F., Li, Y., y Li, T. (2023, September 21). The effect of temperature on dengue virus transmission by *Aedes* mosquitoes. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2023.1242173>

Lowe, R., Gasparrini, A., Van Meerbeeck, C. J., Lippi, C. A., Mahon, R., Trotman, A. R., et al. (2018). Nonlinear and delayed impacts of climate on dengue risk in Barbados: A modelling study. *PLoS Medicine*, 15(7), e1002613. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002613>

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Marini, G., Manica, M., Arnoldi, D., Inama, E., Rosà, R., y Rizzoli, A. (2020). Influence of temperature on the life-cycle dynamics of *Aedes albopictus* populations established at temperate latitudes: A laboratory experiment. *Insects*, 11(11), 808.

Mendoza-Cano, O., Trujillo, X., Huerta, M., Ríos-Silva, M., Lugo-Radillo, A., Benites-Godínez, V., Bricio-Barrios, J. A., Ríos-Bracamontes, E. F., Uribe-Ramos, J. M., Baltazar-Rodríguez, G. M., y Murillo-Zamora, E. (2023,). Assessing the Relationship between Annual Surface Temperature Changes and the Burden of Dengue: Implications for Climate Change and Global Health Outcomes. *Tropical Medicine and Infectious Disease*.
<https://doi.org/10.3390/tropicalmed8070351>

Mishra, B., Turuk, J., Sahu, S., Khajuria, A., Kumar, S., Dey, A., y Praharaj, A. (2016, April). Co-circulation of all four dengue virus serotypes with concurrent infections in a single dengue season. *International Journal of Infectious Diseases*, 45, 446.
<https://doi.org/10.1016/j.ijid.2016.02.947>

Montgomery, D.C., Peck, E.A. y Vining, G.G. (2012) *Introduction to Linear Regression Analysis*. Vol. 821, John Wiley & Sons, Hoboken

Mordecai, E. A., Cohen, J. M., Evans, M. V., Gudapati, P., Johnson, L. R., Lippi, C. A., Miazgowicz, K., Murdock, C. C., Rohr, J. R., Ryan, S. J., Savage, V., Shocket, M. S., Stewart Ibarra, A., Thomas, M. B., y Weikel, D. P. (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>

Morin, C. W., Comrie, A. C., y Ernst, K. C. (2013). Climate and dengue transmission: evidence and implications. *Environmental Health Perspectives*, 121(11–12), 1264–1272.
<https://doi.org/10.1289/ehp.1306556>

Naish, S., Dale, P., Mackenzie, J. S., McBride, J., Mengersen, K., y Tong, S. (2014). Climate change and dengue: A critical and systematic review of quantitative modelling approaches. *BMC Infectious Diseases*, 14(1), Article 167. <https://doi.org/10.1186/1471-2334-14-167>

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Navarrete, J., y Hernández, B. (2024). Distribución potencial de *Syrnia hypnois* Hübner, 1821 y *Feigeria magna* (Gmelin, 1789): Nuevos reportes para la fauna lepidóptera de Nicaragua (Erebidae). *Revista Nicaragüense de Entomología*, 355, 1–38.

<https://doi.org/10.5281/zenodo.13765752>

Ochoa-Orozco, W., Rivera, P., y Herrera, E. (2022). Comportamiento meteorológico durante la sequía de medio verano en Guatemala. *Ciencia, Tecnología Y Salud*, 9(2), 150–165.

<https://doi.org/10.36829/63CTS.v9i2.1284>

Phillips, S. J., Anderson, R. P., Dudík, M., Schapire, R. E., y Blair, M. E. (2017). Opening the black box: An open-source release of Maxent. *Ecography*, 40(7), 887–893.

<https://doi.org/10.1111/ecog.03049>

Perkins, S. E., y Alexander, L. V. (2013). On the measurement of heat waves. *Journal of Climate*, 26(13), 4500–4517. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1>

Ponciano, J. A., Chang, J. D., & Quiroa, F. (2018). Modelo epidémico para el estudio regional de la chikungunya. *Ciencia, Tecnología Y Salud*, 5(1), 63–72.

<https://doi.org/10.36829/63CTS.v5i1.412>

Ponciano, J. A., Polanco, W., & Barrios, M. (2019). Dengue outbreaks pattern in southern Guatemala. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 6(2), 158–170.

<https://doi.org/10.36829/63CTS.v6i2.631>

Rahman, M. S., Overgaard, H. J., Pientong, C., Mayxay, M., Ekalaksananan, T., Aromseree, S., Phanthanawiboon, S., Zafar, S., Shipin, O., Paul, R. E., Phommachanh, S., Pongvongsa, T., Vannavong, N., y Haque, U. (2021). Knowledge, attitudes, and practices on climate change and dengue in Lao People’s Democratic Republic and Thailand. *Environmental Research*, 193, 110509. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110509>

Reiter, P. (2001). Climate change and mosquito-borne disease. *Environmental Health Perspectives*, 109(Suppl 1), 141–161. <https://doi.org/10.1289/ehp.01109s1141>

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Rivera, P. F., Bardales Espinoza, W. A., y Ochoa, W. (2019). Escenarios futuros de cambio climático para Guatemala. En E. J. Castellanos, A. Paiz-Estévez, J. Escribá, M. Rosales-Alconero, y A. Santizo (Eds.), Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala (pp. 40–61). Guatemala: Editorial Universitaria UVG.

Rivera, P; Ochoa, W; y Gonzalez, B. (2021). Simulation of seasonal temperature and precipitation during the period 1998-2000 in Central America using a Regional Climate Model RegCM. *Ciencia, Tecnología y Salud*, 8. <https://doi.org/10.36829/63CTS.v8i1.764>.

Rivera, C., Funes-Hernández, K., Merino-Villalta, J., y Beltrán-Sánchez, A. (2022). Guía para el modelo de distribución de especies por máxima entropía: Estudio de caso de la "lora nuca amarilla" (*Amazona auropalliata*) en El Salvador. *Revista Minerva*, 4(2), 125-142. <https://doi.org/10.5377/revminerva.v4i2.12402>

Rúa-Uribe, G. L., Suárez-Acosta, C., Chauca, J., Ventosilla, P., & Almanza, R. (2013). Modelado del efecto de la variabilidad climática local sobre la transmisión de dengue en Medellín (Colombia) mediante análisis de series temporales. *Biomedica*, 33(Sup1), 142-152. <https://revistabiomedica.org/index.php/biomedica/article/view/1444>

Shakoor, A., Ashraf, F., Shakoor, S., Mustafa, A., Rehman, A., y Altaf, M. M. (2020). Biogeochemical transformation of greenhouse gas emissions from terrestrial to atmospheric environment and potential feedback to climate forcing. *Environmental Science and Pollution Research International*, 27(31), 38513–38536. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10151-1>

Sherwood, S. C., Webb, M. J., Annan, J. D., Armour, K. C., Forster, P. M., Hargreaves, J. C., Hegerl, G... y Zelinka, M. D. (2020). An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Reviews of Geophysics*, 58(4), e2019RG000678. <https://doi.org/10.1029/2019RG000678>

Soneja, S., Tsarouchi, G., Lumbroso, D., & Tung, D. K. (2021). A Review of Dengue's Historical and Future Health Risk from a Changing Climate. *Current environmental health reports*, 8(3), 245–265. <https://doi.org/10.1007/s40572-021-00322-8>

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Soto López, J. D. (2019). Relación espacial entre *Aedes aegypti* (Linnaeus, 1762) y la enfermedad de dengue en Guatemala. *Revista Científica*, 28(2). Universidad de San Carlos de Guatemala.

Smith, D. L., Battle, K. E., Hay, S. I., Barker, C. M., Scott, T. W., y McKenzie, F. E. (2012). Ross, Macdonald, and a theory for the dynamics and control of mosquito-transmitted pathogens. *PLoS Pathogens*, 8(4), e1002588. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1002588>

Tian, N., Zheng, J. X., Guo, Z., Li, L., Xia, S., Lv, S., y Zhou, X. N. (2022). Dengue Incidence Trends and Its Burden in Major Endemic Regions from 1990 to 2019. *Tropical Medicine and Infectious Disease*. <https://doi.org/10.3390/tropicalmed7080180>

Tran, B. L., Tseng, W. C., Chen, C. C., y Liao, S. Y. (2020). Estimating the Threshold Effects of Climate on Dengue: A Case Study of Taiwan. *International journal of environmental research and public health*, 17(4), 1392. <https://doi.org/10.3390/ijerph17041392>

Wang, S., Lu, Y., Han, M., Li, L., He, P., Shi, A., y Bai, M. (2023). Using MaxEnt Model to Predict the Potential Distribution of Three Potentially Invasive Scarab Beetles in China. *Insects*, 14(3), 239. <https://doi.org/10.3390/insects14030239>

Wu, X., Lang, L., Ma, W., Song, T., Kang, M., He, J., Zhang, Y., Lu, L., Lin, H., y Ling, L. (2018). Non-linear effects of mean temperature and relative humidity on dengue incidence in Guangzhou, China. *Science of The Total Environment*, 628–629, 766-771. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.136>

Yoro, K.O. y Daramola, M.O (2020). CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In *Advances in Carbon Capture*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands; pp. 3–28.

Zar, J. H. (1972). Significance testing of the Spearman rank correlation coefficient. *Journal of the American Statistical Association*, 67(339), 578–580. <https://doi.org/10.2307/2284441>

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., ... Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6), 851–870. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>

Zhang, Y., Wang, L., Wang, G., Xu, J., y Zhang, T. (2023). An ecological assessment of the potential pandemic threat of Dengue Virus in Zhejiang province of China. *BMC Infectious Diseases*, 23. <https://doi.org/10.1186/s12879-023-08444-0>

16 Apéndice

Agregue aquí mapas, fotografías, esquemas, códigos de computadoras, encuestas y documentos que se considere para respaldar las actividades y resultados de su investigación.

17 Vinculación

Anotar los vínculos con otras instituciones u organizaciones externas a la Usac, académicas, científicas, gubernamentales, de cooperación o empresariales.

18 Estrategia de difusión, divulgación y protección intelectual

En la filiación debe de anotarse la Universidad de San Carlos de Guatemala. Caso contrario no se concederá nuevos financiamientos de ninguna índole.

NOTA: La difusión y divulgación, por cualquier medio, de los resultados de las investigaciones tiene que incluir los créditos a la Digi y unidad avaladora. En la publicación de un libro debe anotarse en la contraportada lo siguiente: “Este libro es producto del proyecto de investigación: Nombre del proyecto, avalado, aprobado y cofinanciado por el Fondo de Investigación de la Dirección General de Investigación, el nombre de la unidad avaladora de la Universidad de San Carlos de Guatemala, fecha, código y número de partida del proyecto de investigación”.

En las publicaciones en medios escritos y revistas científicas debe anotarse lo siguiente: “Esta investigación: Nombre del proyecto, fue cofinanciada por el fondo de investigación de la

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Dirección General de Investigación Digi/Usac 2022, código y número de partida del proyecto de investigación”. Para los proyectos de investigación que gestionen el registro de un invento o patente, la Digi emitirá las disposiciones que deben aplicarse de conformidad con las leyes y/o políticas de propiedad intelectual que correspondan.

19 Aporte de la propuesta de investigación a los Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND) identificando su meta correspondiente:

Indique concretamente cómo contribuyen los resultados de la investigación al alcance de las Prioridades Nacionales de Desarrollo identificando su meta correspondiente (<https://www.pnd.gt/Home/NodosP1>). Describir la principal repercusión social, académica o económica, puede ser teórica o aplicada. Si la investigación fue aplicada, identificar el grupo o parte de la sociedad que se benefició con los resultados; si fue básica describir el avance en la búsqueda o profundización del conocimiento.

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

20 Orden de pago final (incluir únicamente al personal con contrato vigente al 31 de diciembre de 2023)

Nombres y apellidos	Categoría (investigador /auxiliar)	Registro de personal	Procede pago de mes (Sí / No)	Firma
Nelson Salomón Vásquez Elías	Investigador Titular I	20241332	SI	
Leticia Del Carmen Castillo Signor	Investigador Titular I	930414	SI	
José Emilio González De León	Investigador Titular I	20241355	SI	
Ligia Elena Oliva Barrios	Auxiliar de investigación II	20241341	SI	

21 Declaración del Coordinador(a) del proyecto de investigación

El Coordinador de proyecto de investigación con base en el *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación*, artículos 13 y 20, deja constancia que el personal contratado para el proyecto de investigación que coordina ha cumplido a satisfacción con la entrega de informes individuales por lo que es procedente hacer efectivo el pago correspondiente.

Dra. Mayra Lisette Motta Padilla	Firma
Fecha: 16/02/2025	

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

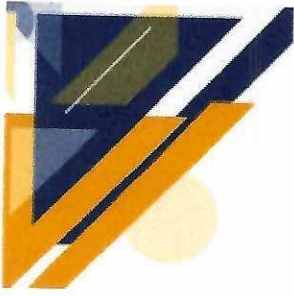
22 Aval del Director(a) del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 13 y 19 del *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación* otorgo el aval al presente informe mensual de las actividades realizadas en el proyecto **Impacto del cambio climático en la transmisión del Dengue en Guatemala** en mi calidad **Dra. Elena Chang de Jo, directora del instituto de investigación de la facultad de medicina veterinaria y zootecnia**, mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

<p>Dra. Elena Chang de Jo, directora del instituto de investigación en ciencia animal y ecosalud</p>	<p>Firma</p>
<p>Fecha: 16/02/2025</p>	

23 Visado de la Dirección General de Investigación

<p>M.A. Sucelly Orozco de Morales Coordinadora programa Universitario de Investigación Interdisciplinario en Salud - PUIIS-</p>	<p>Firma</p>
<p>Fecha: 16/02/2025</p>	





Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

investigación que coordina ha cumplido a satisfacción con la entrega de informes individuales por lo que es procedente hacer efectivo el pago correspondiente.


<p>Dra. Mayra Lisette Motta Padilla</p>	 <p>Firma</p>
<p>Fecha: 16/02/2025</p>	

22 Aval del Director(a) del instituto, centro o departamento de investigación o Coordinador de investigación del centro regional universitario

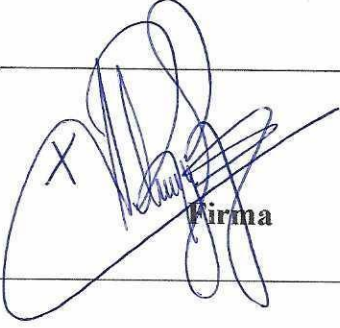
De conformidad con el artículo 13 y 19 del *Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación financiados por medio del Fondo de Investigación* otorgo el aval al presente informe mensual de las actividades realizadas en el proyecto **Impacto del cambio climático en la transmisión del Dengue en Guatemala** en mi calidad **Dra. Elena Chang de Jo, directora del instituto de investigación de la facultad de medicina veterinaria y zootecnia**, mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

<p>Dra. Elena Chang de Jo, directora del instituto de investigación en ciencia animal y ecosalud</p>	 <p>Firma</p> 
<p>Fecha: 16/02/2025</p>	

23 Visado de la Dirección General de Investigación

<p>M.A. Sucelly Orozco de Morales Coordinadora programa Universitario de Investigación Interdisciplinario en Salud - PUIIS-</p>	 <p>Firma</p>
<p>Fecha: 16/02/2025</p>	

Informe final de proyecto de investigación. Año 2024

Coordinador General de Programas Universitarios de investigación.	 Firma
Fecha: 16/02/2025	

/Digi2024