ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage:https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe

Mudanças Climáticas e seu Impacto na Incidência de Arboviroses: Uma Revisão Sistemática de Estudos Recentes

Tayane Cristiele Rodrigues Mesquita[1], André Pereira Rosa[2], Alisson Carraro Borges[3]

[1]Doutoranda em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Departamento de Engenharia Agrícola, Campus Universitário, CEP 36570-000, Viçosa, Minas Gerais. tayane.mesquita@ufv.br.
[2]Professor Adjunto do curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Departamento de Engenharia Agrícola, Campus Universitário, CEP 36570-000, Viçosa, Minas Gerais. (31) 3612 – 4032. andrerosa@ufv.br (autor correspondente).
[3]Professor Adjunto do curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa (UFV) Departamento de Engenharia Agrícola, Campus Universitário, CEP 36570-000, Viçosa, Minas Gerais. (31) 3612 – 4030. e-mail: borges@ufv.br.

Artigo recebido em 01/12/2020 e aceito em 30/06/2021

R E S U M O

Estudos indicam que as mudanças climáticas poderão afetar a distribuição global de arboviroses, influenciando fatores como sobrevivência de vetores, patógenos e transmissão viral. Assim, buscou-se nesse estudo realizar uma revisão sistemática dos artigos mais recentes – publicados entre 2015 e 2020 - relativos a essa temática. Após a aplicação de critérios de elegibilidade, 28 artigos foram selecionados para análise. A partir da revisão, verificou-se que as mudanças climáticas poderão afetar a aptidão das regiões para transmissão viral e a distribuição geográfica de mosquitos do gênero Aedes. Contudo, o efeito das mudanças climáticas varia em diferentes regiões, podendo causar expansão ou contração das áreas aptas para a ocorrência de arboviroses. Em geral, verifica-se um potencial crescimento das áreas aptas em regiões temperadas, sobretudo para o A. albopictus. Em regiões tropicais, por outro lado, o aumento da temperatura poderá limitar as áreas, atualmente, consideradas aptas. Embora não seja intuitivo, alguns estudos previram que a mitigação parcial das mudanças climáticas pode ocasionar maior risco de transmissão viral do que nenhuma mitigação. Assim, é possível verificar que a relação entre as mudanças climáticas e a transmissão de arboviroses não é direta e pode variar em diferentes cenários e locais.

Palavras-chave: Clima; Projeção; Aedes, Arbovírus.

Climate Change and its Impact on the Incidence of Arboviruses: A Systematic Review of Recent Studies

A B S T R A C T

Studies indicate that climate change may affect the global distribution of arboviruses, influencing factors such as vector survival, pathogens, and viral transmission. Thus, this study aimed to conduct a systematic review of the most recent articles - published between 2015 and 2020 - related to this theme. After applying eligibility criteria, 28 articles were selected for analysis. From the review, it was found that climate change may affect the suitability of regions for viral transmission and the geographical distribution of mosquitoes of the genus Aedes. However, the effect of climate change varies in different regions, which may cause expansion or contraction of areas suitable for the occurrence of arboviruses. In general, there is a potential for growth in suitable areas within temperate regions, especially for A. albopictus. In tropical regions, on the other hand, the increase in temperature may limit the areas currently considered suitable. Although not intuitive, some studies have predicted that partial mitigation of climate change may lead to a higher risk of viral transmission than no mitigation. Thus, it is possible to verify that the relationship between climate change and the transmission of arboviruses is not direct and may vary in different scenarios and locations.

Keywords: Climate; Projection; Aedes; Arboviruses.

Introdução

Ao longo das duas últimas décadas, a notável expansão da faixa territorial de diversos arbovírus resultou em um aumento expressivo na atividade epidêmica global (Hilgenfeld e Vasudevan, 2018). De acordo com Maniero et al. (2021), os principais arbovírus que apresentam ampla distribuição geográfica estão relacionados a doenças emergentes e reemergentes, sendo eles: Dengue (DEN), Zika (ZIK), Febre Amarela (YF), e chikungunya (CHIK). Tais doenças podem ser

transmitidas por duas espécies de mosquitos do gênero *Aedes*: *Aedes aegypti* e *Aedes albopictus* (Hilgenfeld e Vasudevan, 2018). Por esse motivo, estudos têm avaliado a distribuição global e os requisitos ecológicos dessas espécies (Leta et al., 2018).

Segundo Lippi et al. (2019), a distribuição atual de mosquitos do gênero *Aedes* é orientada em função das características climáticas de uma região. Contudo, as mudanças climáticas globais possuem o potencial de impulsionar a expansão geográfica desses vetores e, consequentemente, alterar a distribuição geográfica das diversas doenças que estes transmitem (Lubinda et al., 2019; Lwande et al., 2020). À vista disso, Iwamura et al. (2020) alegam que a compreensão do comportamento dos vetores em resposta aos fatores climáticos é central para a caracterização da distribuição espaço-temporal das arboviroses e previsão das mudanças potenciais no risco devido às mudanças climáticas.

El-Sayed e Kamel (2020) afirmam que o aquecimento global influencia diretamente a abundância, a sobrevivência e a distribuição de patógenos e seus vetores. Além dos fatores climáticos, Ordoñez-Sierra et al. (2021) citam que a transmissão de arboviroses também pode ser influenciada por fatores demográficos, sociais e entomológicos.

Estudos revelam que fatores climáticos como temperatura, precipitação e umidade podem afetar a população de mosquitos (reprodução, desenvolvimento, distribuição), propagação de vírus (replicação) e a interação vetor-hospedeiro (comportamento de picada de fêmeas adultas de mosquitos do gênero *Aedes*) (Gage et al., 2008; Barbazan et al., 2010). Temperaturas altas estão associadas ao aumento na reprodução de vetores, comportamento de mordida mais frequente e redução do período de incubação do patógeno no interior dos vetores. Por outro lado, o tempo de sobrevivência do mosquito pode ser reduzido em condições muito quentes e secas (Ciota e Keyel, 2019; WHO, 2008).

Adicionalmente, condições de umidade e precipitação locais são apontadas como fatores capazes de afetar a disponibilidade de habitats necessários durante os estágios larvais dos vetores (Dickens et al., 2018.; Lemos et al., 2021). O aumento nos índices de precipitação pluviométrica pode elevar a população de vetores quando ocorre o acúmulo de água de chuva em recipientes nas residências (Robert et al., 2020). No entanto, condições de seca e escassez hídrica também podem influenciar no aumento da população de vetores, tendo em vista a necessidade de armazenamento doméstico de água nesse período, o que resulta na criação de locais propícios para a reprodução dos mosquitos (Akanda et al., 2020; Dada et al., 2013).

Um estudo desenvolvido por Ryan et al. (2019) indicou que as mudanças climáticas poderão alterar, no próximo século, o padrão de expansão de mosquitos do gênero *Aedes* e de transmissão dos vírus por eles veiculados. Tal projeção é crítica do ponto de vista da saúde humana, uma vez que, a expansão dos arbovírus em regiões sem exposição prévia pode resultar em surtos explosivos de doenças (Equihua et al., 2017).

No entanto, é importante ressaltar que os efeitos do clima na transmissão de arboviroses não são lineares. De acordo com Caldwell et al. (2021), embora o clima seja considerado um dos fatores mais relevantes no estudo de processos ecológicos, os efeitos direcionais e dinâmicos do clima nos sistemas são, geralmente, mal compreendidos ou difíceis de prever. Diante disso, Ciota e Keyel, (2019) destacam que as mudanças climáticas poderão aumentar ou até mesmo diminuir o potencial de transmissão de doenças em alguns contextos.

Adicionalmente, Colón-González et al. (2018) salientam que apenas a presença de vetores em uma área não é suficiente para inferir o aumento na carga de doenças. A expansão do risco de transmissão depende, também, da introdução de patógenos, padrões de uso da terra, urbanização e outros fatores que mediam a distribuição dos vetores e a ocorrência de contato vetor-humano (Ryan et al., 2019).

Segundo Morgan et al. (2021) os fatores socioeconômicos podem contribuir para a perpetuação do risco de doenças causadas por arbovírus. Isso decorre do fato que, em geral, áreas de elevada pobreza possuem abundância de habitats apropriados para mosquitos vetores, uma vez que, em tais locais, comumente, são observadas condições precárias de habitação e saneamento. Desse modo, as previsões de risco de transmissão de doenças baseadas em adequação climática dependem não apenas da incerteza acerca das mudanças climáticas mas, ainda, da incerteza advinda dos demais fatores ambientais e socioeconômicos que podem influenciar a incidência de doenças (Causa et al., 2020; Lwande et al., 2020; Ryan et al., 2019).

Ainda, de acordo com Souza et al. (2021), o sistema de saúde e a infraestrutura existente em um local também irão influenciar a vulnerabilidade

ao risco de doenças infecciosas induzido pelas mudanças climáticas. Por conseguinte, países em desenvolvimento, que não possuem recursos para uma efetiva resposta dos sistemas de saúde aos surtos explosivos de doenças, tendem a apresentar risco elevado à saúde causado pelas mudanças climáticas.

Diante dos potenciais impactos das mudanças climáticas no comportamento global da distribuição de arboviroses, diversos estudos, tais como Williams et al. (2016), Campbell et al. (2015) e Ryan et al. (2019), têm realizado projeções considerando diferentes cenários de emissão e seus efeitos na incidência de arboviroses, na distribuição futura de vetores e na transmissão viral. Em função da utilização de diferentes abordagens metodológicas, bem como de cenários de emissão distintos, tais estudos apresentam uma heterogeneidade considerável nas projeções realizadas.

Com o intuito de analisar as diferenças entre as projeções da distribuição da dengue existentes, Xu et al. (2020) reuniram estudos com a referida temática. Contudo, a revisão realizada pelos autores não abrangeu estudos que avaliaram a distribuição dos vetores da dengue em função das mudanças climáticas. Para El-Sayed e Kamel (2020), a avaliação da expansão geográfica dos vetores é um passo essencial para o entendimento da distribuição de doenças infecciosas e, por esse motivo, não deve ser subestimada. Uma revisão do futuro global da dengue, em cenários de mudanças climáticas, também foi realizada por Messina et al. (2015). No entanto, na referida revisão, estudos em escala regional ou local não foram incluídos.

Diante disso, a fim de descrever, de forma ampla, os efeitos das mudanças climáticas na incidência e distribuição futura de arboviroses, buscou-se nessa revisão avaliar os possíveis efeitos das mudanças climáticas na distribuição de vetores e na transmissão viral, considerando-se estudos em escala global, nacional, regional e local.

A hipótese levantada no estudo é que as mudanças climáticas globais possuem o potencial de afetar a incidência de arboviroses, seja provocando o aumento destas ou a diminuição em locais distintos.

Material e métodos

Estratégia de busca do material bibliográfico e critérios de seleção

A pesquisa teve como foco avaliar evidências científicas a respeito de possíveis impactos das mudanças climáticas na i) distribuição geográfica de vetores de arboviroses, ii) capacidade de transmissão viral e iii) incidência de arboviroses como dengue, zika e chikungunya. Para isso, uma revisão sistemática da literatura foi realizada, em julho de 2020, utilizando-se as bases de pesquisa PubMed, Science Direct, Web of Science, Scielo e LILACS. Tais bases foram selecionadas em função da relação do conteúdo indexado com o tema avaliado nesse estudo. A fim de analisar as pesquisas mais recentes relacionadas ao tema, foram avaliados artigos científicos publicados no período de 2015 a 2020.

A busca dos artigos nas bases citadas foi realizada utilizando-se uma combinação de palavras-chave, incluindo *"arbovirus", "arboviruses", "climate", "climate change", "prediction", "forescast", "projection", "scenario", "zika", "dengue" e "chikungunya"*. Para um melhor desempenho da busca realizada, foram utilizados os operadores booleanos "AND" "OR" e "NOT".

Como primeira etapa para seleção, foram avaliados os títulos dos documentos identificados nas buscas. Os estudos que apresentaram títulos condizentes com o tema desse estudo foram selecionados para leitura dos resumos. Em seguida, foram selecionados documentos para leitura completa e análise de conteúdo. Adicionalmente, nessa etapa, foram excluídos artigos duplicados.

Por fim, alguns critérios de elegibilidade foram utilizados na seleção dos artigos a serem avaliados, sendo eles:

- Restrição da pesquisa a artigos de revistas revisadas por pares;
- Utilização de artigos classificados apenas como "artigo de pesquisa" ou "estudo de caso";
- Seleção de artigos que incluíam variáveis climáticas e apresentavam pelo menos uma projeção climática futura para avaliação da influência do clima sob arboviroses.

Avaliação dos estudos selecionados

Os artigos selecionados, utilizando-se os critérios citados anteriormente, foram analisados, resumidos e organizados em um banco de dados contendo os seguintes itens: autores, ano de publicação, título da publicação, área de estudo, objetivo, variáveis avaliadas, abordagens analíticas, cenários climáticos adotados, principais resultados e demais observações pertinentes.

Para uma melhor discussão do conteúdo, a avaliação dos artigos foi dividida em duas categorias, selecionadas em função de seus objetivos principais, sendo elas: artigos que realizaram a projeção da distribuição geográfica dos vetores *A. aegypti e A. albopictus* e artigos com foco na projeção da distribuição ou incidência de arboviroses.

Resultados e discussão

Características gerais dos estudos avaliados

As buscas iniciais realizadas nas bases de pesquisa identificaram 2.136 artigos que possuíam quaisquer relações com as palavras-chave utilizadas. Seguindo os critérios de elegibilidade, citados no tópico anterior, foram selecionados 28 artigos para revisão. Um resumo do número de artigos selecionados em cada etapa da seleção é apresentado na Figura 1.

Dentre os 28 estudos selecionados, 8 realizaram projeções climáticas a nível global. Os demais estudos realizaram previsões em escala nacional, regional ou local. Os estudos apresentaram diferenças quanto às variáveis de resultado avaliadas, sendo verificadas previsões baseadas na adequação espacial para propagação dos vetores (*A. aegypti e A. albopictus*), transmissão viral e no padrão espacial da incidência de arboviroses. Um resumo das características dos estudos avaliados é realizado na Tabela 1.

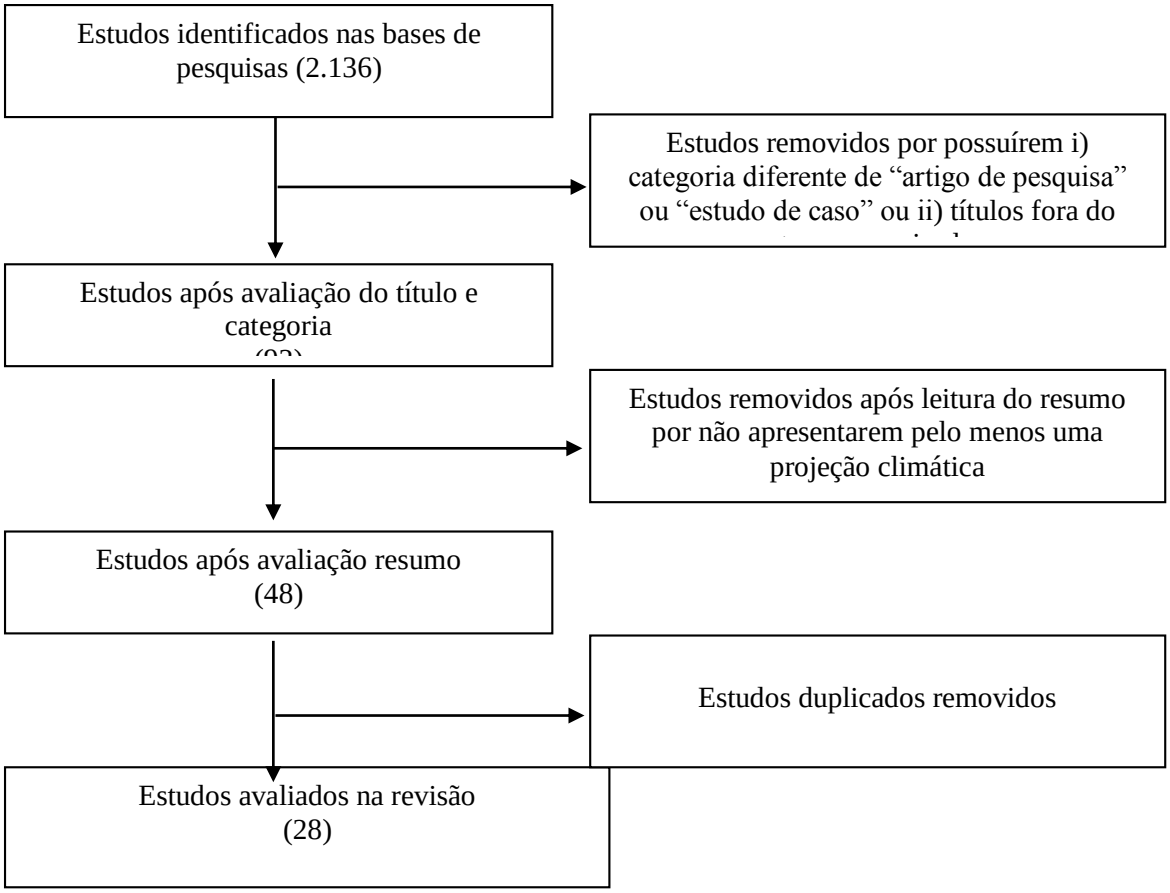

Figura 1. Fluxograma do procedimento de seleção de artigos para revisão.

Tabela 1. Resumo das informações dos estudos avaliados na revisão sistemática.

Estudo	Área de estudo	Período projetado	Cenários climáticos	Tipo de modelo	Variável resposta
Campbell et al. (2015)	Global	2050	A2, B1 e A1B	Correlativo	Distribuição geográfica do *A. aegypti* e *A. albopictus*
Kamal et al. (2018)	Global	2050 e 2070	RCP (2,6; 4,5; 6,0; 8,5)	Correlativo	Distribuição geográfica do *A. aegypti* e *A. albopictus*
Kraemer et al. (2019)	Global	2020, 2050 e 2080	RCP (4,5; 6,0; 8,5)	Correlativo	Distribuição geográfica do *A. aegypti* e *A. albopictus*
Messina et al. (2019)	Global	2020, 2050 e 2080	RCP (4,5; 6,0; 8,5)	Correlativo	Áreas com adequação ao vírus e população humana em risco
Monaghan et al. (2018)	Global	2061-2080	RCP (4,5; 8,5)	Correlativo	Exposição humana ao *A. aegypti*
Proestos et al. (2015)	Global	2045-2054	RCP8,5	Mecanicista	Áreas com adequação de habitat para o *A. albopictus*
Ryan et al. (2019)	Global	2050 e 2080	RCP (4,5; 6,0; 8,5)	Mecanicista	Áreas com adequação para transmissão viral por *A. aegypti* e *A. albopictus* e população em risco de exposição ao vírus
Tjaden et al. (2017)	Global	2021-2040 2041-2060 2061-2080	RCP (4,5; 8,5)	Correlativo	Áreas adequadas à transmissão de chikungunya
Escobar et al. (2016)	Equador	2030, 2050 e 2100	A2	Correlativo	Áreas adequadas para vetores e risco para a exposição humana aos vetores
Lippi et al. (2019)	Equador	2050	RCP (2,6; 4,5; 6,0; 8,5)	Correlativo	Distribuição geográfica do *A. aegypti*
Portilla Cabrera e Selvaraj (2020)	Colômbia	2050 e 2070	RCP (4,5; 8,5)	Correlativo	Distribuição geográfica do *A. aegypti*
Khan et al. (2020)	Canadá e EUA	2011-2100	RCP (4,5; 8,5)	Correlativo	Distribuição geográfica do *A. aegypti* e *A. albopictus* e risco para a exposição humana aos vetores
Fan e Liu (2019)	China	2020, 2030, 2050 e 2100	RCP (2,6; 4,5; 6,0; 8,5)	Mecanicista	População e áreas com risco de transmissão de dengue
Carbajo et al. (2019)	Argentina	2025-2030	RCP (4,5; 8,5)	Correlativo	Ocorrência de *A. aegypti* por localidade

Williams et al. (2016)	Austrália	2046-2064	A2 e B1	Mecanicista	Incidência de dengue
Mweya et al. (2016)	Tanzânia	2020 e 2050	não informado	Correlativo	Distribuição dos vetores da dengue em relação às áreas de risco epidêmico
Lee et al. (2018)	Coréia	2020-2099	RCP (2,6; 4,5; 6,0; 8,5)	Mecanicista	Risco de surto de dengue
Acharya et al. (2018)	Nepal	2050 e 2070	RCP (2,6; 6,0; 8,5)	Correlativo	População exposta em áreas climaticamente adequadas à dengue
Butterworth et al. (2017)	Sudeste dos EUA	2045-2065	A1B	Mecanicista	Número de casos de dengue
Liu et al. (2019a)	China continental	2030 e 2050	RCP (2,6; 4,5; 8,5)	Correlativo	Distribuição geográfica do *A. aegypti* e *A. albopictus*
Liu-Helmersson et al. (2019a)	Europa continental	2006–2099	RCP (2,6; 8,5)	Mecanicista	Distribuição geográfica do *A. aegypti*
Liu-Helmersson et al. (2016)	Cidades da Europa	2070-2099	RCP (2,6; 4,5; 6,0; 8,5)	Mecanicista	Potencial de surtos de dengue
Colón-González et al. (2017)	América latina	2040–2069 2086–2115	Aumento da temperatura média global em 1,5 °C, 2,0 °C ou 3,7 °C	Correlativo	Número de casos de dengue
Jia et al. (2017)	Guangzhou - China	Aquecimento ao longo de quatro estações climáticas	Aumento da temperatura variando de 0,5 a 5 °C	Mecanicista	Reação térmica teórica de *A. albopictus* adultos ao longo de quatro estações do ano
Li et al. (2017)	Guangzhou - China	2020-2070	RCP (2,6; 4,5; 6,0; 8,5)	Correlativo	Número de casos de dengue
Equihua et al. (2017)	Veracruz - México	2015-2039 2075-2099	RCP (4,5; 8,5)	Correlativo	Distribuição geográfica do *A. aegypti* e número de pessoas potencialmente expostas
Bal e Sodoudi (2020)	Calcutá - Índia	2020-2100	RCP (4,5; 8,5)	Correlativo	Número de casos de dengue
Liu et al. (2019b)	Taiwan - China	2030, 2050 e 2070	RCP (2,6; 6,0; 8,5)	Correlativo	Distribuição geográfica do *A. aegypti*

Os estudos também apresentaram diferenças quanto às abordagens metodológicas utilizadas, sendo adotadas abordagens mecanicistas ou correlativas. Modelos mecanicistas requerem o conhecimento de parâmetros relacionados à morfologia, fisiologia e comportamento de vetores e patógenos e sua associação com variáveis ambientais. Tais informações, comumente, são derivadas de experimentos laboratoriais. Os modelos correlativos, por sua vez, são empíricos e utilizam informações de ocorrência geográfica, disponíveis em bancos de dados, para prever a distribuição espacial de espécies ou doenças (Tjaden et al., 2018).

Além das diferenças quanto à abordagem de modelagem utilizada, os estudos apresentaram diferença quanto aos cenários de mudança climática adotados. Predominantemente, os modelos climáticos adotados nos estudos avaliaram quatro Caminhos Representativos de Concentração (RCP) – 2,6; 4,5; 6,0 e 8,5 – desenvolvidos Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que simulam diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa no clima futuro. Os RCPs são nomeados de acordo com os níveis de forçamento radiativo total aproximado no ano de 2100, em relação ao ano de 1750, sendo estes de: 2,6 W m^{-2} para RCP 2,6; 4,5 W m^{-2} para RCP 4,5; 6,0 W m^{-2} para RCP 6,0 e 8,5 W m^{-2} para RCP 8,5 (IPCC, 2013). Uma descrição dos cenários citados é realizada na Tabela 2.

Tabela 2. Descrição dos cenários representativos das vias de concentração de gases de efeito estufa avaliados nos artigos revisados.

Cenário	Descrição
RCP 2,6	Cenário de mitigação que leva a um nível de forçamento muito baixo - Patamar onde o forçamento radiativo atinge, aproximadamente, 3 W m^{-2} antes de 2100 e, em seguida, declina
RCP 4,5	Cenário de estabilização - Patamar de estabilização intermediário em que o forçamento radiativo está estabilizado a aproximadamente 4,5 W m^{-2} após 2100
RCP 6,0	Cenário de estabilização - Patamar de estabilização intermediário em que o forçamento radiativo está estabilizado a aproximadamente 6,0 W m^{-2} após 2100
RCP 8,5	Cenário com emissões de gases de efeito estufa muito elevadas - Patamar elevado em que o forçamento radiativo é superior a 8,5 W m^{-2} em 2100 e continua a aumentar durante algum tempo

Fonte: IPCC (2013).

Além dos RCPs, foram verificados estudos que utilizaram os cenários de mudança climática A1B, A2 e B1 (que correspondem, aproximadamente, aos cenários RCP 6,0, RCP 8,5 e RCP 4,5, respectivamente) (Campbell et al., 2015; Escobar et al., 2016; Williams et al., 2016) e que utilizaram cenários que assumem, baseado nas estratégias de mitigação, que a temperatura média global poderá aumentar em 1,5 °C, 2,0 °C ou 3,7 °C em 2100, em relação aos níveis pré-industriais (Colón-González et al., 2018).

Distribuição de vetores e mudanças climáticas

Os artigos avaliados nesse estudo, predominantemente, referem-se à projeção da distribuição dos vetores *A. aegypti e A. albopictus* em diferentes cenários de mudanças climáticas. Embora, isoladamente, os fatores climáticos não possam explicar o risco de exposição humana às arboviroses, estes podem limitar a distribuição de vetores ou, ainda, afetar a sua faixa de distribuição geográfica. Morin et al. (2013) desenvolveram um esquema que contempla as relações existentes entre os mosquitos do gênero *Aedes*, transmissão de dengue, clima e tempo (Figura 2).

.

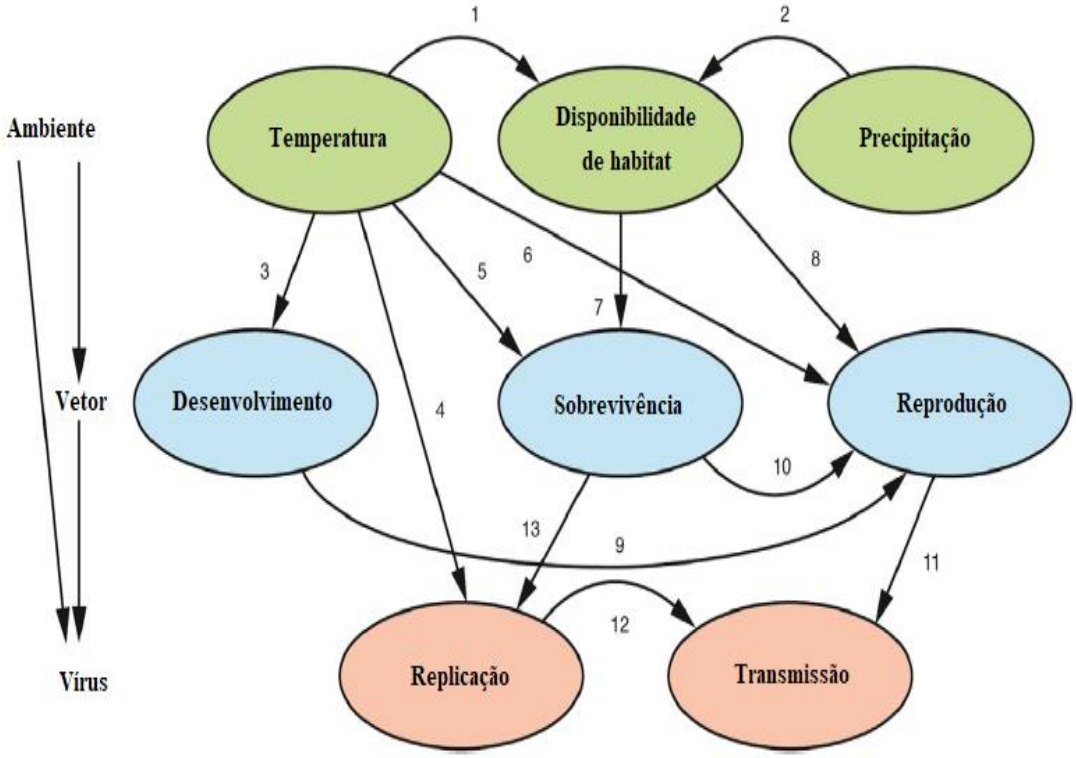

Figura 2. Interações entre variáveis climáticas, vetores e vírus da dengue.
Os números indicados na figura identificam as relações existentes entre as variáveis. A disponibilidade de habitat para larvas de mosquitos é influenciada pela (1) temperatura, por meio da evaporação e transpiração, e pela (2) precipitação de entrada. A temperatura é um importante regulador do (3) desenvolvimento do mosquito, (4) da replicação viral em mosquitos infectados, (5) da sobrevivência e (6) do comportamento reprodutivo dos mosquitos. A disponibilidade de habitat é necessária para a (7) sobrevivência das formas imaturas de mosquitos e (8) reprodução dos mosquitos adultos. A reprodução dos mosquitos é acelerada pelo (9) desenvolvimento mais rápido e (10) aumento da sobrevivência dos mosquitos. O aumento reprodutivo do mosquito aumenta a (11) probabilidade de transmissão, por meio do aumento do número de picadas, e a (12) replicação viral mais rápida aumenta a transmissão, uma vez que, encurta o período de incubação extrínseco. Por fim, o aumento da sobrevivência dos mosquitos adultos aumenta a (13) quantidade de replicação viral.
Fonte: Adaptado de Morin et al. (2013).

Campbell et al. (2015) e Kamal et al. (2018) investigaram a distribuição global de *A. aegypti e A. albopictus* utilizando variáveis bioclimáticas aplicadas a um modelo de nicho ecológico. Os autores utilizaram cenários de mudança climática distintos para projetar a futura distribuição dos vetores. Campbell et al. (2015) realizaram projeções para o ano de 2050, considerando os cenários A2, B1 e A1B. Kamal et al. (2018), por outro lado, adotaram quatro RCPs, com projeções para os anos de 2050 e 2070.

Apesar das diferenças metodológicas entre os trabalhos citados, as conclusões obtidas em termos globais foram, em geral, coincidentes. Os resultados indicaram rearranjos globais complexos nas áreas de distribuição para *A. aegypti e A. albopictus*. De modo geral, considerando-se mudanças em nível global, com exceção de mudanças em escalas regionais, houve semelhança entre os padrões distributivos gerais dos mosquitos nas condições atuais e futuras. Para Campbell et al. (2015), tal resultado pode ser explicado em função da ampla tolerância climática e das diferenças entre as duas espécies, o que faz com que as mudanças climáticas nas próximas décadas possam não se traduzir em grandes mudanças distributivas. Kamal et al. (2018) citam que o *A. aegypti* apresentou potencial de distribuição marcadamente mais amplo nas regiões tropicais e subtropicais do que o *A. albopictus*. Por outro lado, Reinhold et al. (2018) destacam que o *A. albopictus* é capaz de sobreviver em climas muito mais frios do que o *A. aegypti*. Corroborando com essa afirmação, Leta et al. (2018) verificaram que as regiões temperadas apresentam maior adequação para distribuição do *A. albopictus*.

Vale ressaltar que estes são resultados em termos globais dos estudos de Campbell et al. (2015) e Kamal et al. (2018). Ao se avaliar regiões individuais são verificados potenciais de expansão ou contração de ambas as espécies de vetores. No estudo de Campbell et al. (2015), por exemplo, verifica-se que em cenários futuros, a área de distribuição para o *A. aegypti* pode aumentar na América do Sul e, ao mesmo tempo, diminuir na Austrália. Ainda, no estudo de Kamal et al. (2018), foram verificadas diferenças entre os cenários de emissão de gases de efeito estufa utilizados, sendo previstos aumentos na distribuição de ambas espécies do RCP 2,6 para o RCP 8,5. Adicionalmente, considerando-se os padrões distributivos individualmente, os resultados previstos por Campbell et al. (2015) diferiram daqueles previstos por Kamal et al. (2018) em muitas regiões. O estudo de Campbell et al. (2015), por exemplo, subestimou a ocorrência dos vetores em áreas em que estes foram considerados abundantes por Kamal et al. (2018). Desse modo, os resultados obtidos em estudos globais devem ser avaliados com cautela.

Ainda em termos globais, Proestos et al. (2015) avaliaram a adequação global de habitats para o *A. albopictus*, considerando os impactos das mudanças climáticas. Os autores verificaram que, para o período de 2045 a 2054 (RCP 8,5), são projetadas reduções significativas de adequação em áreas onde as temperaturas no verão podem ser tornar muito altas. Desse modo, estima-se que as condições ambientais dos trópicos serão menos favoráveis para o *A. albopictus*. Ao mesmo tempo, outras regiões, que apresentarão aumento das temperaturas no inverno, poderão se tornar mais predispostas para o desenvolvimento desse vetor, o que permitirá que a espécie compense as perdas de território. Diante disso, os autores estimam que cerca de 2,4 bilhões de pessoas serão potencialmente expostas ao *A. albopictus* no período projetado, caso medidas de mitigação de emissões de gases de efeito estufa não sejam implementadas.

Em conjunto com os fatores climáticos, Kraemer et al. (2019) e Monaghan et al. (2018) realizaram a previsão global de vetores considerando fatores demográficos. Assim como Campbell et al. (2015) e Kamal et al. (2018), Kraemer et al. (2019) observaram uma prevalência da distribuição de *A. aegypti* em regiões tropicais. Mesmo ao se considerar os cenários de projeção mais extremos (RCP 8,5 em 2080), o estudo de Kraemer et al. (2019) previu que o *A. aegypti* deve se estabelecer na Europa apenas em regiões isoladas do sul da Itália e Turquia.

Diferente do comportamento observado para o *A. aegypti*, os resultados do estudo de Kraemer et al. (2019) indicaram que o *A. albopictus* se espalhará amplamente por toda a Europa. Além disso, o estabelecimento dessa espécie é previsto em regiões ao norte dos Estados Unidos e regiões montanhosas da América do Sul e África Oriental nos próximos 30 anos. Ao mesmo tempo, prevê-se que áreas onde os modelos climáticos indicam aumento de aridez se tornarão menos apropriadas para o estabelecimento do *A. albopictus*. A projeção realizada prevê que, até o ano de 2080, cerca de 197 países relatarão a presença desse vetor, dos quais 20 a reportarão pela primeira vez.

Kraemer et al. (2019) destacam que as previsões revelam que os esforços para conter as mudanças climáticas poderão ser insuficientes para impedir a expansão de mosquitos do gênero *Aedes*. Uma expansão expressivamente maior dos vetores é prevista para os anos de 2050 a 2080. O impacto dessa previsão é considerável, tendo em vista que a avaliação do crescimento populacional realizada pelos autores indicou uma tendência de concentração da população em áreas onde o *A. aegypti* e o *A. albopictus* já estarão estabelecidos, o que resultará em um aumento da população global exposta a arboviroses.

Além das projeções climáticas, utilizando-se os cenários RCP (4,5 e 8,5), Monaghan et al. (2018) avaliaram a exposição humana futura ao *A. aegypti* considerando-se projeções populacionais globais. Avaliando a área de exposição humana ao *A. aegypti*, Monaghan et al. (2018) projetaram um aumento global da área de cerca de 8% (RCP 4,5) e 13% (RCP 8,5) entre 2061-2080, em relação ao período de referência avaliado. Por outro lado, os autores verificaram que apenas em algumas regiões as mudanças climáticas desempenham um papel importante no aumento da exposição humana ao *A. aegypti*. Ao se avaliar globalmente a exposição humana ao vetor, foi verificado que as mudanças climáticas são um fator pouco influente no aumento da exposição quando comparado ao aumento decorrente do crescimento populacional. Esse comportamento foi observado, sobretudo, em países em desenvolvimento e de renda média, tais como os países da África, Ásia e América do sul, onde o elevado crescimento populacional supera o impacto das mudanças climáticas na projeção da população exposta. Como resultado, em tais países, as diferenças na exposição humana ao *A. aegypti* entre os cenários de mudança climática RCP 4,5 e

8,5 não são estatisticamente significativas. Tais resultados revelam não haver uma vantagem aparente na adoção do cenário com menores emissões de gases de efeito estufa nessas regiões, em termos de redução da população humana exposta ao vetor. Em contrapartida, para a América do Norte e Europa, foram verificadas diferenças significativas entre os cenários de emissão RCP 4,5 e RCP 8,5, o que sugere que, nessas regiões, a adoção de estratégias de mitigação (RCP 4,5) pode diminuir a população exposta ao *A. aegypti.*

A projeção da distribuição de vetores nos demais artigos foi realizada em escala nacional ou local. A avaliação de estudos em tais escalas são muito importantes, uma vez que, embora os estudos globais sejam informativos, são as análises locais que possuem o potencial de enfatizar as evidências de que o clima e a transmissão de arboviroses estão intimamente relacionados (Robert et al., 2020).

De modo geral, os estudos desenvolvidos em regiões de clima tropical indicaram que o aumento da temperatura poderá reduzir as áreas, atualmente, consideradas aptas para o desenvolvimento de mosquitos do gênero *Aedes*.

Na Colômbia, as projeções climáticas previram uma redução de cerca de 30% das áreas de distribuição do *A. aegypti* (Portilla Cabrera e Selvaraj, 2020). Tal redução está associada à elevação da temperatura acima dos níveis ideais para o ciclo de vida e capacidade reprodutiva do mosquito. Por esse motivo, para a caracterização das distribuições espaço-temporais das arboviroses, é fundamental compreender como os vetores respondem aos fatores climáticos. Tal compreensão permite, ainda, antecipar e responder às mudanças potenciais no risco de incidência de arboviroses, em decorrência das mudanças climáticas (Iwamura et al., 2020).

No Equador, os resultados obtidos por Escobar et al. (Escobar et al., 2016) sugerem que as mudanças climáticas podem reduzir a carga de vetores em regiões do país em que estes encontram-se, atualmente, presentes. Em contrapartida, no mesmo país, Lippi et al. (2019) verificaram que os efeitos das mudanças climáticas poderão estender a distribuição do *A. aegypti* a regiões com altitudes mais elevadas onde, nas condições atuais, estes não são previstos. A tendência de deslocamento dos vetores para regiões de maior altitude também foi verificada na cidade de Veracruz (México) (Equihua et al., 2017). De acordo com uma revisão de literatura realiza por Ciota e Keyel (2019), de modo geral, espera-se que os arbovírus mudem na direção dos polos e em altitudes mais elevadas sob as mudanças climáticas. Segundo Castillo-Quino et al. (2018), a alteração do nicho ecológico dos vetores, influenciada pelas mudanças climáticas, contribui para que o *A. aegypti* supere a adaptação a altitudes acima daquelas atualmente descritas na literatura.

Por outro lado, estudos realizados no Canadá e Estados Unidos (Khan et al., 2020) e China (Liu et al., 2019a; Liu et al., 2019b) indicaram que, devido às mudanças climáticas, os mosquitos do gênero *Aedes* poderão expandir a faixa de distribuição atual. Ainda, na China, Jia et al. (2017) destacam que projeções realizadas revelam que os efeitos do aquecimento na distribuição de vetores são diferentes ao longo das estações. No inverno e na primavera, tais efeitos facilitam o desenvolvimento das espécies, encurtando o período de diapausa. Em contrapartida, no verão, o efeito do aquecimento inibe o desenvolvimento do mosquito.

Por fim, na Europa continental, Liu-Helmersson et al. (2019) verificaram a influência dos cenários de emissão na alteração da distribuição do *A. aegypti* ao longo do século XXI. No cenário de baixa emissão (RCP 2,6), foram identificadas diferenças sutis em comparação à distribuição atual. No entanto, ao avaliar o cenário de alta emissão (RCP 8,5), foi verificado que grande parte da região sul da Europa apresenta risco potencial de sofrer invasão do *A. aegypti*.

Baseado nos resultados dos estudos avaliados é possível verificar que as mudanças climáticas poderão afetar a faixa de distribuição geográfica do *A. aegypti* e *A. albopictus*. No entanto, os efeitos das mudanças climáticas variam em diferentes regiões, podendo causar, no futuro, expansão ou contração das áreas atualmente consideradas aptas para o desenvolvimento dos vetores. De modo geral, em decorrência das mudanças climáticas, verifica-se um potencial crescimento das áreas aptas para o desenvolvimento de vetores em regiões temperadas, sobretudo para o *A. albopictus*. Regiões de clima tropical, por outro lado, poderão apresentar uma redução das áreas aptas ou, ainda, migração dos vetores para regiões com maior altitude.

Vale ressaltar que, embora a presença de vetores seja essencial para a transmissão de arboviroses, o aumento da exposição da população não se traduz, necessariamente, em aumento do risco de transmissão dessas doenças. Como exemplo disso, o estudo desenvolvido por Leta et al. (2018) mostrou que, dos 250 territórios considerados, 215 (86%) eram potencialmente

apropriados para a existência e desenvolvimento de *A. aegypti* ou *A. albopictus*. Contudo, a ocorrência de pelo menos uma das arboviroses avaliadas (zika, dengue, chikungunya, febre amarela e febre do Vale do Rift) foi relatada em, somente, 146 (58%) territórios, segundo os dados de fontes disponíveis publicamente. Apesar disso, entender a distribuição futura de vetores é um passo essencial para entendimento da futura distribuição das doenças transmitidas por estes (Xu et al., 2020).

Visando contornar as limitações das projeções baseadas apenas na distribuição de vetores, Mweya et al. (2016) utilizaram um modelo de nicho ecológico que incorporou dados de *A. aegypti* infectados com o vírus da dengue para estimar a distribuição de áreas de risco epidêmico. Messina et al. (2019), por sua vez, para investigar a distribuição futura de dengue, avaliaram dados históricos de incidência da doença em conjunto com informações sobre o vírus e disseminação de vetores. A incorporação desses fatores na modelagem de distribuição de espécies pode contribuir para o aperfeiçoamento da avaliação do real risco epidêmico em regiões identificadas com alta aptidão para o desenvolvimento de vetores.

Transmissão viral, incidência de arboviroses e mudanças climáticas

Os demais artigos identificados nessa revisão avaliaram a relação entre as mudanças climáticas e os componentes do ciclo de transmissão viral ou distribuição geográfica observada de arboviroses.

O estudo desenvolvido por Butterworth et al. (2017), no sudeste dos Estados Unidos, destacou a influência do clima tanto para os vetores quanto para os vírus. Os autores enfatizaram que o aumento do risco de doença em um local depende tanto da adequação deste para a sobrevivência do vetor, quanto da existência de condições ótimas para a transmissão viral. Desse modo, existem locais que poderão observar a presença de vetores e, todavia, permanecer à margem da transmissão viral. Contudo, as condições favoráveis ao vírus surgem apenas em períodos mais quentes.

Segundo Ryan et al. (2019), a faixa de temperatura ideal para transmissão viral do *A. aegypti* é de 21,3 a 34,0 °C, para o *A. albopictus*, por outro lado, tal faixa é de 19,9 a 29,4 °C. As faixas descritas apresentam valores muito superiores aos limites de sobrevivência, relatados na literatura, dos vetores, o que reforça as informações descritas por Butterworth et al. (2017)

De acordo Reinhold et al. (2018), os vetores atuam dentro de uma faixa de temperaturas, de modo que, se extrapolados os pontos críticos mínimos e máximos, sua atividade é cessada e o risco de morte aumenta. Na revisão de literatura realizada pelos referidos autores, é destacado que o limite inferior de temperatura para *A. aegypti* é de cerca de 10 °C. Em temperaturas inferiores à citada, é relatado que os vetores ficam entorpecidos e incapazes de se mover. Tal limite de temperatura pode apresentar valores distintos em função da espécie de vetor e do estágio de desenvolvimento deste. No estudo realizado por Tsai et al. (2018) foi verificado que a temperatura crítica para limitar a ocorrência de larvas de *A. aegypti* é de 13,8 °C. Tais resultados demonstram que larvas e adultos de *A. aegypti* possuem a capacidade de se aclimatar a baixas temperaturas. Essa capacidade de aclimatação ao frio pode facilitar a disseminação dessa espécie para latitudes mais altas, sobretudo, considerando-se um cenário de mudanças climáticas (Jass et al., 2019).

Em relação ao vetor *A. albopictus*, Tippelt et al. (2020) verificaram que os ovos de todas as cepas utilizadas foram capazes de sobreviver a temperaturas constantes tão baixas quanto -5 °C por um período de exposição de 30 dias. Adicionalmente, foi verificada a eclosão dos ovos do vetor mesmo com uma temperatura mínima de -10 ° C. Segundo os autores, o conhecimento de tais limites é relevante para determinação dos limites ecológicos dessa espécie.

Avaliando a capacidade de transmissão viral, por meio de um modelo mecanicista, Ryan et al. (2019) realizaram um estudo em escala global, considerando os vetores *A. aegypti* e *A. albopictus*. Os autores identificaram impactos das mudanças climáticas na transmissão viral, sendo estes causados, sobretudo, pelas diferenças entre o *A. aegypti* e *A. albopictus*, que apresentam maior e menor tolerância térmica, respectivamente. Desse modo, em um cenário de mudança climática, tais diferenças poderão modificar o padrão de transmissão de vírus para ambos os vetores.

O período de incubação extrínseco (PIE) – tempo necessário para que o vetor infectado se torne infectivo - é influenciado pela temperatura, sendo encurtado com pequenos aumentos desta. Um PIE mais curto aumenta o potencial de transmissão viral para os seres humanos (Butterworth et al., 2017). Assim, ligeiros aumentos na temperatura poderão levar ao aumento da transmissão de arboviroses. Por outro lado, os vetores possuem também um limite superior de

temperatura para transmissibilidade que, quando ultrapassado, pode suprimi-la.

De modo geral, Ryan et al. (2019) verificaram que as mudanças climáticas poderão alterar o risco atual de transmissão viral para espécies do gênero *Aedes*. Contudo, os padrões identificados diferem entre as espécies de mosquitos, localidades e cenários. No cenário atual, para ambos os vetores, a maior parte da região nos trópicos é ideal para a transmissão viral durante todo o ano e apresenta declínio da adequação ao longo dos gradientes latitudinais.

Por meio da Figura 3 é possível verificar que, no ano de 2050, é previsto que a elevação da temperatura resulte em mudanças no risco de transmissão do *Aedes*. Para o *A. aegypti*, espera-se uma expansão do risco de transmissão, por pelo menos dois meses do ano, em regiões temperadas. Nos trópicos, a expansão do risco é verificada durante todo o ano, até mesmo em regiões de elevada altitude que, anteriormente, não eram consideradas aptas para o vetor. Ainda no ano de 2050, prevê-se que o risco de transmissão viral do *A. albopictus* se expanda em regiões temperadas durante alguns meses. No entanto, nos trópicos, onde o aquecimento excederá os limites térmicos superiores desse vetor, é prevista uma redução do risco sazonal ou durante todo o ano.

.

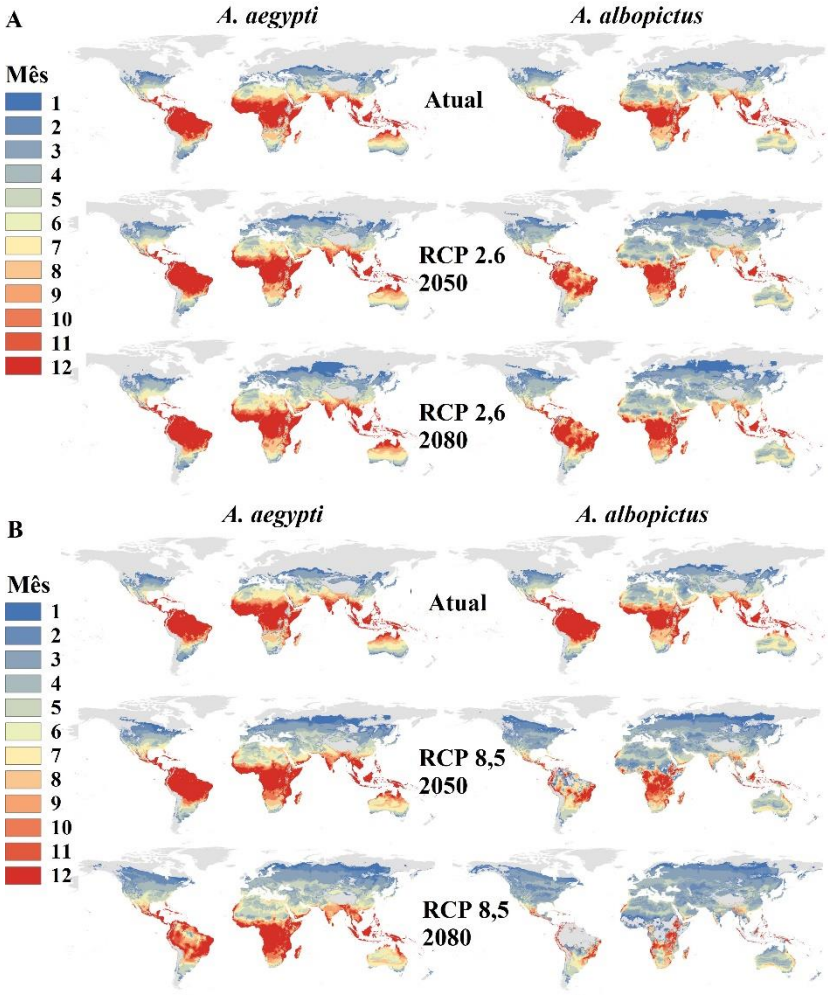

Figura 3. Mapeamento da adequação da temperatura para transmissão viral do *A. aegypti* e *A. albopictus* nos cenários de emissão RCP 2,6 (a) e RCP 8,5 (b).
Fonte: Adaptado de Ryan et al. (2019).

Desse modo, verifica-se que, para o *A. aegypti*, o gradiente atual de elevada transmissão nos trópicos e baixa transmissão em regiões temperadas é mantido em climas futuros. Por outro lado, o aumento da temperatura nos trópicos diminuirá as áreas com risco de transmissão do *A. albopictus*, sobretudo no RCP 8,5. Nesse cenário, considerando-se a projeção para o ano de 2080, as áreas com adequação (durante todo o ano) de temperatura para transmissão viral por *A.*

albopictus será limitada às regiões de alta altitude, sul da África e costa atlântica do Brasil. O *A. aegypti*, por sua vez, perderá uma área central de adequação durante todo o ano, sobretudo na bacia Amazônica.

Diante do exposto, verifica-se que o estudo desenvolvido por Ryan et al. (2019) prevê que a mitigação parcial das mudanças climáticas, representada no cenário RCP 2,6, pode ocasionar maior risco de exposição para transmissão viral do que nenhuma mitigação. Embora não seja intuitivo, esse resultado se fundamenta no conhecimento dos limites térmicos para transmissão dos mosquitos do gênero *Aedes*, que poderão ser ultrapassados em cenários de elevada emissão.

Os resultados obtidos por Ryan et al. (2019) são consistentes com as observações de Williams et al. (2016). Tais autores utilizaram um modelo mecanicista de transmissão de vírus para determinar se as mudanças climáticas irão alterar a transmissão da dengue na Austrália. Os autores verificaram que cenários que consideram emissões de gases de efeito estufa elevadas podem resultar em menor potencial para transmissão de dengue. Por outro lado, tal potencial pode ser elevado caso ocorra um aquecimento climático ameno, como previsto em cenários de baixa emissão. Segundo Williams et al. (2016) esse resultado demonstra que a relação entre clima e incidência de dengue não é trivial, sendo incorreto afirmar que o aquecimento climático resultará, necessariamente, no aumento da doença.

Ainda em relação à transmissão de dengue, os estudos desenvolvidos na China (Fan e Liu, 2019) e na Europa (Liu-Helmersson et al., 2016) identificaram que, como efeito das mudanças climáticas, a distribuição da área de transmissão de dengue se expandirá de áreas de baixa para alta latitude. A expansão da transmissão viral para regiões sem exposição prévia é considerada crítica, dado o potencial de ocorrência de surtos explosivos quando uma população é exposta pela primeira vez.

Os demais artigos identificados nessa revisão baseiam-se no treinamento prévio de modelos, com dados de ocorrência de arboviroses, para prever a distribuição futura dessas doenças. Acharya et al. (2018), Bal e Sodoudi (2020), Colón-González et al. (2018) e Li et al. (2017) avaliaram a previsão de casos de dengue e Tjaden et al. (2017), a adequação global da transmissão de chikungunya. Assim como verificado nos estudos citados anteriormente, os resultados da modelagem realizada por Tjaden et al. (2017) indicaram que, no cenário de alta emissão, a adequação climática poderá se expandir em algumas áreas e contrair em outras. Os autores ressaltam que a adequação de uma área à transmissão de chikungunya não significa, necessariamente, que esta estará sujeita a surtos no futuro. A ocorrência da doença em uma área está também associada à adoção de medidas de controle de saúde pública e níveis gerais de desenvolvimento socioeconômico. Ainda de modo similar aos estudos citados, Acharya et al. (2018) verificaram que no Nepal, como efeito das mudanças climáticas, a área com maior adequação para incidência de dengue se expandirá para regiões com elevada altitude. Como consequência disso, prevê-se que a população em risco aumentará cerca de 20% em relação ao cenário atual. Por outro lado, os estudos desenvolvidos por Bal e Sodoudi (2020), Colón-González et al. (2018) e Li et al. (2017) apresentaram resultados distintos daqueles anteriormente indicados. Os autores avaliaram o efeito das mudanças climáticas na incidência de dengue em países de clima tropical ou subtropical e concluíram que cenários de maior aquecimento refletirão na expansão da incidência para áreas, atualmente, não endêmicas. De modo geral, os estudos avaliados anteriormente indicaram uma tendência de diminuição de áreas aptas para o desenvolvimento de arboviroses, em cenários de alta emissão, nas regiões tropicais.

Os estudos apresentados nessa revisão indicaram os potenciais impactos das mudanças climáticas na transmissão viral e incidência de arboviroses em todo o mundo. É possível verificar que a relação entre esses fatores não é linear e pode variar em diferentes cenários e locais. Vale ressaltar que a maior parte dos estudos realizou projeções considerando apenas a influência de variáveis bioclimáticas.

Para Messina et al. (2019), as mudanças demográficas e sociais da população humana nas últimas décadas foram responsáveis pela incidência e reincidência de arboviroses em diversas partes do mundo. Segundo os autores, fatores como rápida urbanização, desmatamento e o consequente contato mais próximo de populações de vetores e comunidades humanas, contribuíram para a propagação de arboviroses. Diante disso, verifica-se que a avaliação conjunta de fatores climáticos, sanitários, demográficos e sociais pode auxiliar o entendimento da propagação ou recessão futura de doenças e, desse modo, fornecer subsídios para a implementação de estratégias de controle que visam reduzir o risco epidêmico de arboviroses.

Diante das informações levantadas nesse estudo, pode-se verificar que o desenvolvimento de estudos estatísticos e de modelagem são

fundamentais para uma melhor compreensão das ligações entre o clima e a transmissão de arbovírus. Segundo Robert et al. (2020), tal compreensão é particularmente relevante em regiões à margem da emergência de arbovírus.

Limitações dos estudos

Embora os estudos avaliados forneçam importantes subsídios para a avaliação do impacto das mudanças climáticas na incidência de arboviroses, algumas limitações podem ser apontadas, tais como:

- As previsões realizadas, em geral, não consideram o efeito de determinantes não climáticos tais como: urbanização, saneamento, uso da terra e desenvolvimento socioeconômico, que podem produzir mudanças expressivas nos níveis de riscos de exposição identificados;
- As projeções dos estudos avaliados, por vezes, apresentam resultados contraditórios, o que pode estar relacionado ao uso de modelos distintos, à qualidade dos dados utilizados e à escolha das variáveis explicativas para a distribuição de vetores ou doenças;
- Alguns estudos apresentaram falhas na identificação da distribuição atual de vetores/doenças que podem refletir nos resultados projetados. Tais falhas podem ser consequência da dificuldade de obtenção de dados para calibração dos modelos em algumas regiões;
- Embora alguns estudos citem a existência de interação competitiva entre o *A. Aegypti e o A. Albopictus*, a competição entre espécies, que pode afetar a taxa de expansão de alcance de cada um, não foi considerada nos estudos avaliados. Desse modo, conforme destacam Lwande et al. (2020), seria relevante prever se a distribuição global do *A. aegypti* e *A. albopictus* resultará em uma coexistência simpátrica ou exclusão competitiva entre as espécies.

Conclusões

1. Baseado nos estudos avaliados nessa revisão, em diferentes escalas geográficas, verifica-se que as mudanças climáticas poderão afetar a faixa de distribuição geográfica do *A. aegypti* e *A. albopictus*, bem como a aptidão das regiões para transmissão viral. No entanto, os efeitos das mudanças climáticas variam em diferentes regiões, podendo causar, no futuro, expansão ou contração das áreas atualmente consideradas aptas para o desenvolvimento de arboviroses.
2. De modo geral, em decorrência das mudanças climáticas, verifica-se um potencial crescimento das áreas aptas para o desenvolvimento de vetores em regiões temperadas, sobretudo para o *A. albopictus*. Em regiões de clima tropical, por outro lado, o aumento da temperatura acima do limite de sobrevivência de vetores ou patógenos poderá limitar as áreas aptas para incidência de arboviroses. Prevê-se, ainda, uma migração dos vetores para regiões com altitude elevada, consideradas, atualmente, inapropriadas para a transmissão de arbovírus.
3. Embora não seja intuitivo, alguns estudos previram que a mitigação parcial das mudanças climáticas pode ocasionar maior risco de exposição para transmissão viral por mosquitos do gênero *Aedes* do que nenhuma mitigação. Desse modo, é possível verificar que a relação entre as mudanças climáticas e a transmissão viral não é linear e pode variar em diferentes cenários e locais.
4. Vale ressaltar que a maior parte dos estudos realizou projeções considerando apenas a influência de variáveis bioclimáticas. Contudo, outros determinantes como desenvolvimento socioeconômico, saneamento, urbanização e implantação de intervenções podem alterar os níveis de risco enfrentado pela população.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo nº 140419/2020-9).

Referências

Acharya, B.K., Cao, C., Xu, M., Khanal, L., Naeem, S., Pandit, S., 2018. Present and future of dengue fever in Nepal: Mapping climatic suitability by ecological niche model. International Journal of Environmental Research and Public Health, 15, 1-15.

Akanda, A.S., Johnson, K., Ginsberg, H.S., Couret, J., 2020. Prioritizing Water Security in the Management of Vector- Borne Diseases: Lessons From Oaxaca, Mexico. GeoHealth, 4(3), e2019GH000201.

Bal, S., Sodoudi, S., 2020. Modeling and prediction of dengue occurrences in Kolkata, India, based on climate factors. International Journal of Biometeorology, 64, 1379-1391.

Barbazan, P., Guiserix, M., Boonyuan, W., Tuntaprasart, W., Pontier, D., Gonzalez, J.P., 2010. Modelling the effect of temperature on transmission of dengue. Medical and Veterinary Entomology, 24, 66–73.

Butterworth, M.K., Morin, C.W., Comrie, A.C., 2017. An analysis of the potential impact of climate change on dengue transmission in the southeastern United States. Environmental Health Perspectives, 125, 579–585.

Caldwell, J.M., LaBeaud, A.D., Lambin, E.F., Stewart-Ibarra, A.M., Ndenga, B.A., Mutuku, F.M., Mordecai, E.A., 2021. Climate predicts geographic and temporal variation in mosquito-borne disease dynamics on two continents. Nature communications, 12(1), 1-13.

Campbell, L.P., Luther, C., Moo-Llanes, D., Ramsey, J.M., Danis-Lozano, R., Peterson, A.T., 2015. Climate change influences on global distributions of dengue and chikungunya virus vectors. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 370, 1–9.

Castillo-Quino, R., Vallejo-Castro, E., Camacho-Aliaga, A.V., Quiñones-López, A., Canelas-Urey, H. I., 2018. Adaptación del mosquito Aedes aegypti a 2550 m snm Cochabamba, Bolivia. Febrero 2016. Gaceta Médica Boliviana, 41(1), 24-30.

Castillo-Quino, R., Vallejo-Castro, E., Camacho-Aliaga, A.V., Quiñones-López, A., Canelas-Urey, H. I., 2018. Adaptación del mosquito Aedes aegypti a 2550 m snm Cochabamba, Bolivia. Febrero 2016. Gaceta Médica Boliviana, 41(1), 24-30.

Causa, R., Ochoa-Díaz-López, H., Dor, A., Rodríguez-León, F., Solís-Hernández, R., Pacheco-Soriano, A.L., 2020. Emerging arboviruses (dengue, chikungunya, and Zika) in Southeastern Mexico: influence of socio-environmental determinants on knowledge and practices. Cadernos de Saúde Pública, 36, e00110519.

Ciota, A.T., Keyel, A.C., 2019. The role of temperature in transmission of zoonotic arboviruses. Viruses, 11(11), 1013.

Colón-González, F.J., Harris, I., Osborn, T.J., Bernardo, C.S.S., Peres, C.A., Hunter, P.R., Lake, I.R., 2018. Limiting global-mean temperature increase to 1.5-2 °C could reduce the incidence and spatial spread of dengue fever in Latin America. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 115, 6243–6248.

Dickens, B.L., Sun, H., Jit, M., Cook, A.R., Carrasco, L.R., 2018. Determining environmental and anthropogenic factors which explain the global distribution of Aedes aegypti and Ae. albopictus. BMJ global health, 3, e000801.

El-Sayed, A., Kamel, M., 2020. Climatic changes and their role in emergence and re-emergence of diseases. Environmental Science and Pollution Research, 27, 22336–22352.

Equihua, M., Ibáñez-Bernal, S., Benítez, G., Estrada-Contreras, I., Sandoval-Ruiz, C.A., Mendoza-Palmero, F.S., 2017. Establishment of Aedes aegypti (L.) in mountainous regions in Mexico: Increasing number of population at risk of mosquito-borne disease and future climate conditions. Acta Tropica, 166, 316–327.

Escobar, L.E., Romero-Alvarez, D., Leon, R., Lepe-Lopez, M.A., Craft, M.E., Borbor-Cordova, M.J., Svenning, J.C., 2016. Declining Prevalence of Disease Vectors Under Climate Change. Sci. Rep. 6, 1–8.

Fan, J.C., Liu, Q.Y., 2019. Potential impacts of climate change on dengue fever distribution using RCP scenarios in China. Advances in Climate Change Research, 10, 1–8.

Gage, K.L., Burkot, T.R., Eisen, R.J., Hayes, E.B., 2008. Climate and Vectorborne Diseases. Am. J. Prev. Med. 35, 436–450.

Hilgenfeld, R., Vasudevan, S.G., 2018. Dengue and Zika : Control and Antiviral Treatment Strategies. Springer Nature, Singapura.

IPCC. Painel intergovernamental sobre alterações climáticas, 2013. Climate Change 2013 - The Physical Science Basis: summary for policymakers, technical summary and frequently asked questions. Cambridge.

Iwamura, T., Guzman-Holst, A., Murray, K.A., 2020. Accelerating invasion potential of disease vector Aedes aegypti under climate change. Nature communications, 11(1), 1-10.

Jass, A., Yerushalmi, G.Y., Davis, H.E., Donini, A., MacMillan, H.A., 2019. An impressive capacity for cold tolerance plasticity protects against ionoregulatory collapse in the disease vector Aedes aegypti. Journal of Experimental Biology, 222(24), jeb214056.

Jia, P., Chen, X., Chen, J., Lu, L., Liu, Q., Tan, X., 2017. How does the dengue vector mosquito Aedes albopictus respond to global warming? Parasites and Vectors 10, 1–12.

Kamal, M., Kenawy, M.A., Rady, M.H., Khaled, A.S., Samy, A.M., 2018. Mapping the global

potential distributions of two arboviral vectors Aedes aegypti and Ae. Albopictus under changing climate. PLoS One 13, 1–21.

Khan, S.U., Ogden, N.H., Fazil, A.A., Gachon, P.H., Dueymes, G.U., Greer, A.L., Ng, V., 2020. Current and projected distributions of Aedes aegypti and Ae. Albopictus in Canada and the U.S. Environmental Health Perspectives, 128, 1–13.

Kraemer, M.U.G., Reiner, R.C., 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., Marsboom, C., Hendrickx, G., Schaffner, F., Moore, C.G., Nax, H.H., Bengtsson, L., Wetter, E., Tatem, A.J., Brownstein, J.S., Smith, D.L., Lambrechts, L., Cauchemez, S., Linard, C., Faria, N.R., Pybus, O.G., Scott, T.W., Liu, Q., Yu, H., Wint, G.R.W., Hay, S.I., Golding, N., 2019. Past and future spread of the arbovirus vectors Aedes aegypti and Aedes albopictus. Nature Microbiology, 4, 854–863.

Lemos, L.O., Júnior, A.C.O., Assis Mendonça, F., 2021. Urban climate maps as a public health tool for urban planning: The case of dengue fever in Rio De Janeiro/Brazil. Urban Climate, 35, 100749.

Leta, S., Beyene, T.J., De Clercq, E.M., Amenu, K., Kraemer, M.U.G., Revie, C.W., 2018. Global risk mapping for major diseases transmitted by Aedes aegypti and Aedes albopictus. International Journal of Infectious Diseases, 67, 25–35.

Li, C., Wang, X., Wu, X., Liu, J., Ji, D., Du, J., 2017. Modeling and projection of dengue fever cases in Guangzhou based on variation of weather factors. Science of the Total Environment, 605–606, 867–873.

Lippi, C.A., Stewart-Ibarra, A.M., Franklin Bajaña Loor, M.E., Dueñas Zambrano, J.E., Espinoza Lopez, N.A., Blackburn, J.K., Ryan, S.J., 2019. Geographic shifts in Aedes aegypti habitat suitability in Ecuador using larval surveillance data and ecological niche modeling: Implications of climate change for public health vector control. PLOS Neglected Tropical Diseases, 13, 1–19.

Liu, B., Gao, X., Ma, J., Jiao, Z., Xiao, J., Hayat, M.A., Wang, H., 2019a. Modeling the present and future distribution of arbovirus vectors Aedes aegypti and Aedes albopictus under climate change scenarios in Mainland China. Science of the Total Environment, 664, 203–214.

Liu, B., Jiao, Z., Ma, J., Gao, X., Xiao, J., Hayat, M.A., Wang, H., 2019b. Modelling the potential distribution of arbovirus vector Aedes aegypti under current and future climate scenarios in Taiwan, China. Pest Management Science, 75, 3076–3083.

Liu-Helmersson, J., Quam, M., Wilder-Smith, A., Stenlund, H., Ebi, K., Massad, E., Rocklöv, J., 2016. Climate Change and Aedes Vectors: 21st Century Projections for Dengue Transmission in Europe. EBioMedicine 7, 267–277.

Liu-Helmersson, J., Rocklöv, J., Sewe, M., Brännström, Å., 2019. Climate change may enable Aedes aegypti infestation in major European cities by 2100. Environmental Research, 172, 693–699.

Lubinda, J., Walsh, M.R., Moore, A.J., Hanafi-Bojd, A.A., Akgun, S., Zhao, B., Haque, U., 2019. Environmental suitability for Aedes aegypti and Aedes albopictus and the spatial distribution of major arboviral infections in Mexico. Parasite epidemiology and control, 6, e00116.

Lwande, O.W., Obanda, V., Lindström, A., Ahlm, C., Evander, M., Näslund, J., Bucht, G., 2020. Globe-trotting Aedes aegypti and Aedes albopictus: risk factors for arbovirus pandemics. Vector-Borne and Zoonotic Diseases, 20(2), 71-81.

Maniero, V.C., Fares, R.D., Lamas, C.C., Cardozo, S. V., 2021. Epidemiological surveillance of main vector borne arboviral diseases in Brazil: a brief review. Brazilian Journal of Veterinary Medicine, 43, e001420.

Messina, J.P., Brady, O.J., Golding, N., Kraemer, M.U.G., Wint, G.R.W., Ray, S.E., Pigott, D.M., Shearer, F.M., Johnson, K., Earl, L., Marczak, L.B., Shirude, S., Davis Weaver, N., Gilbert, M., Velayudhan, R., Jones, P., Jaenisch, T., Scott, T.W., Reiner, R.C., Hay, S.I., 2019. The current and future global distribution and population at risk of dengue. Nature Microbiology, 4, 1508–1515.

Messina, J.P., Brady, O.J., Pigott, D.M., Golding, N., Kraemer, M.U.G., Scott, T.W., Wint, G.R.W., Smith, D.L., Hay, S.I., 2015. The many projected futures of dengue. Nature Reviews Microbiology, 13, 230–239.

Monaghan, A.J., Sampson, K.M., Steinhoff, D.F., Ernst, K.C., Ebi, K.L., Jones, B., Hayden, M.H., 2018. The potential impacts of 21st century climatic and population changes on human

exposure to the virus vector mosquito Aedes aegypti. Climate Change 146, 487–500.

Morgan, J., Strode, C., Salcedo-Sora, J.E., 2021. Climatic and socio-economic factors supporting the co-circulation of dengue, Zika and chikungunya in three different ecosystems in Colombia. PLoS Neglected Tropical Diseases, 15(3), e0009259.

Morin, C.W., Comrie, A.C., Ernst, K., 2013. Climate and dengue transmission: evidence and implications. Environmental Health Perspectives, 121, 1264-1272.

Mweya, C.N., Kimera, S.I., Stanley, G., Misinzo, G., Mboera, L.E.G., 2016. Climate change influences potential distribution of infected Aedes aegypti co-occurrence with dengue epidemics risk areas in Tanzania. PLoS One 11, 1–13.

Ordoñez-Sierra, G., Sarmiento-Senior, D., Gomez, J. F. J., Giraldo, P., Ramírez, A. P., Olano, V. A., 2021. Multilevel analysis of social, climatic and entomological factors that influenced dengue occurrence in three municipalities in Colombia. One Health, 12, 100234.

Portilla Cabrera, C.V., Selvaraj, J.J., 2020. Geographic shifts in the bioclimatic suitability for Aedes aegypti under climate change scenarios in Colombia. Heliyon 6, e03101.

Proestos, Y., Christophides, G.K., Ergüler, K., Tanarhte, M., Waldock, J., Lelieveld, J., 2015. Present and future projections of habitat suitability of the Asian tiger mosquito, a vector of viral pathogens, from global climate simulation. Philos. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 370, 1–16.

Reinhold, J.M., Lazzari, C.R., Lahondère, C., 2018. Effects of the environmental temperature on Aedes aegypti and Aedes albopictus mosquitoes: a review. Insects, 9(4), 158.

Reinhold, J.M., Lazzari, C.R., Lahondère, C., 2018. Effects of the environmental temperature on Aedes aegypti and Aedes albopictus mosquitoes: a review. Insects, 9(4), 158.

Robert, M.A., Stewart-Ibarra, A.M., Estallo, E.L., 2020. Climate change and viral emergence: evidence from Aedes-borne arboviruses. Current opinion in virology, 40, 41-47.

Ryan, S.J., Carlson, C.J., Mordecai, E.A., Johnson, L.R., 2019. Global expansion and redistribution of Aedes-borne virus transmission risk with climate change. PLoS Neglected Tropical Diseases,13, 1–20.

Souza, A.D., Abreu, M.C., Oliveira-Júnior, J.F., 2021. Impact of Climate Change on Human Infectious Diseases: Dengue. Brazilian Archives of Biology and Technology, 64.

Tippelt, L., Werner, D., Kampen, H., 2020. Low temperature tolerance of three Aedes albopictus strains (Diptera: Culicidae) under constant and fluctuating temperature scenarios. Parasites & Vectors, 13(1), 1-12.

Tjaden, N.B., Caminade, C., Beierkuhnlein, C., Thomas, S.M., 2018. Mosquito-Borne Diseases: Advances in Modelling Climate-Change Impacts. Trends in Parasitology, 34, 227–245.

Tjaden, N.B., Suk, J.E., Fischer, D., Thomas, S.M., Beierkuhnlein, C., Semenza, J.C., 2017. Modelling the effects of global climate change on Chikungunya transmission in the 21 st century. Scientific Reports, 7, 1–11.

Tsai, P.J., Lin, T.H., Teng, H.J., Yeh, H.C., 2018. Critical low temperature for the survival of Aedes aegypti in Taiwan. Parasites & vectors, 11(1), 1-14.

Williams, C.R., Mincham, G., Faddy, H., Viennet, E., Ritchie, S.A., Harley, D., 2016. Projections of increased and decreased dengue incidence under climate change. Epidemiology and Infection, 144, 3091–3100.

Xu, Z., Bambrick, H., Frentiu, F.D., Devine, G., Yakob, L., Williams, G., Hu, W., 2020. Projecting the future of dengue under climate change scenarios: Progress, uncertainties and research needs. PLoS Neglected Tropical Diseases,14, 1–11.