



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS



NÉDER SOARES FELIPE

CHIKUNGUNYA NO BRASIL: MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÕES DA DINÂMICA DE TRANSMISSÃO DA DOENÇA

SOROCABA-SP

JUNHO DE 2024

Néder Soares Felipe

Chikungunya no Brasil: Modelagem Matemática e Simulações da Dinâmica de Transmissão da Doença

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Exatas (PPGECE), da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Matemática, sob orientação da Profa. Dra. Graciele P. Silveira.

Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas

Orientadora: Profa. Dra. Graciele P. Silveira

Sorocaba-SP
Junho de 2024

Felipe, Néder Soares

Chikungunya no Brasil: modelagem matemática e simulações da dinâmica de transmissão da doença / Néder Soares Felipe -- 2024.
155f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba
Orientador (a): Graciele Paraguaia Silveira
Banca Examinadora: Raphael de Oliveira Garcia,
Raimundo dos Santos Marcolino
Bibliografia

1. Chikungunya e sua epidemiologia. 2. Modelagem Matemática. 3. Simulações e parâmetros para a dinâmica da doença Chikungunya. I. Felipe, Néder Soares. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -
CRB/8 6979



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Exatas

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Néder Soares Felipe, realizada em 25/06/2024.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Graciele Paraguaia Silveira (UFSCar)

Prof. Dr. Raimundo dos Santos Marcolino (IFMA)

Prof. Dr. Raphael de Oliveira Garcia (UNIFESP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Exatas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão a Deus, cuja orientação e força foram fundamentais ao longo desta jornada acadêmica. Reconheço que todas as minhas conquistas são fruto da Sua graça e bênçãos.

À minha orientadora, Profa. Dra. Graciele P. Silveira, agradeço pela orientação incansável, paciência e dedicação ao longo de todo o processo. Suas inestimáveis contribuições, aliadas às inúmeras horas semanais de auxílio, foram essenciais para a concretização deste trabalho.

À Universidade Federal de São Carlos e ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Exatas (PPGECE), agradeço pela oportunidade de realizar este mestrado e pelo suporte institucional oferecido.

Aos colegas da turma, pelo constante compartilhamento de ideias, apoio mútuo e incentivo. Em especial, agradeço a João Lorena, pelas valiosas horas de estudo compartilhadas, cuja parceria foi fundamental ao longo desta jornada.

Aos meus pais, Valci e Irene, expresso minha profunda gratidão por ensinarem a valorizar a aquisição de conhecimento e por sempre incentivarem meus estudos. Seus ensinamentos e apoio foram pilares essenciais na minha formação e desenvolvimento acadêmico.

Aos meus filhos, Gabriel e Lívia, agradeço pela compreensão nos momentos de ausência, e, sobretudo, à minha esposa Renata, que assumiu muitas responsabilidades enquanto eu me dedicava aos estudos. Sem seu inestimável suporte, seria impossível concluir este mestrado. Renata, seu amor e apoio foram fundamentais para esta conquista.

Aos amigos, agradeço pelo encorajamento e apoio nos momentos desafiadores, mesmo à distância.

Finalmente, agradeço a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. A todos vocês, meu mais sincero muito obrigado.

“Nenhum sucesso na vida compensa o fracasso no lar” (David Oman McKay)

RESUMO

A Chikungunya é uma doença viral transmitida principalmente pelos mosquitos *Aedes aegypti*. Desde a sua introdução no Brasil em 2014, a doença tem se propagado rapidamente, tornando-se um significativo problema de saúde pública. Este estudo tem como objetivo explorar a dinâmica de transmissão da Chikungunya no Brasil através da modelagem matemática. Utilizamos modelos compartimentais para descrever e prever a propagação da doença, formulando equações diferenciais ordinárias resolvidas pelo método numérico de Euler. A metodologia também incluiu a estimativa dos parâmetros do modelo, ajustando-os aos dados observacionais reais. Os resultados obtidos demonstram que o modelo desenvolvido é capaz de reproduzir partes da dinâmica de transmissão da Chikungunya, identificando os fatores críticos que influenciam sua disseminação. Concluímos que a modelagem matemática é uma ferramenta essencial para a formulação de políticas públicas e estratégias de controle mais eficazes, contribuindo significativamente para o entendimento epidemiológico da Chikungunya no Brasil.

Palavras-chave: Chikungunya, *Aedes aegypti*, Epidemiologia, Modelagem Matemática, Equações Diferenciais, Métodos Numéricos.

ABSTRACT

Chikungunya is a viral disease primarily transmitted by *Aedes aegypti* mosquitoes. Since its introduction in Brazil in 2014, the disease has spread rapidly, becoming a significant public health problem. This study aims to explore the transmission dynamics of Chikungunya in Brazil through mathematical modeling. We use compartmental models to describe and predict the disease's spread, formulating ordinary differential equations solved by the numerical Euler method. The methodology also included estimating the model parameters, fitting them to actual observational data. The results demonstrate that the developed model can replicate aspects of the transmission dynamics of Chikungunya, identifying critical factors that influence its spread. We conclude that mathematical modeling is an essential tool for formulating public policies and more effective control strategies, significantly contributing to the epidemiological understanding of Chikungunya in Brazil.

Keywords: Chikungunya, *Aedes aegypti*, Epidemiology, Mathematical Modeling, Differential Equations, Numerical Methods.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição das principais arboviroses no mundo	24
Figura 2 – O Mosquito <i>Aedes Aegypti</i>	26
Figura 3 – Os sintomas da doença Chikungunya	30
Figura 4 – Casos de Chikungunya	32
Figura 5 – Caracterização dos Casos Prováveis de Chikungunya - Sexo	34
Figura 6 – Caracterização dos Casos Prováveis de Chikungunya - Raça-Cor	34
Figura 7 – Caracterização dos Casos Prováveis de Chikungunya - Idades	35
Figura 8 – Comparativo de Casos 2023 x 2024	37
Figura 9 – Distribuição Geográfica da Chikungunya	38
Figura 10 – Interpretação Geométrica do Método de Euler	52
Figura 11 – Modelo Compartimental ANMF	65
Figura 12 – O Modelo Compartimental CHIKV - Para a doença Chikungunya	68
Figura 13 – Casos de Chikungunya no Brasil	81
Figura 14 – Primeiro Resultado	82
Figura 15 – Alterando θ e ε - 1º resultado	83
Figura 16 – Alterando θ e ε - 2º resultado	83
Figura 17 – Alterando θ e ε - 3º resultado	84
Figura 18 – Alterando θ e ε - 4º resultado	85
Figura 19 – Alterando L_0 e C_0 - 1º resultado	86
Figura 20 – Alterando A_0 , L_0 e C_0 - 2º resultado	87
Figura 21 – Alterando A_0 , L_0 e C_0 - 3º resultado	87
Figura 22 – Alterando A_0 , L_0 e C_0 - 3º resultado	88
Figura 23 – Alterando A_0 e ψ - 1º resultado	89
Figura 24 – Alterando A_0 e ψ - 2º resultado a	90
Figura 25 – Alterando A_0 e ψ - 2º resultado b	90
Figura 26 – Alterando A_0 e ψ - 3º resultado a	91
Figura 27 – Alterando A_0 e ψ - 3º resultado b	92
Figura 28 – Alterando A_0 e ψ - 4º resultado a	93
Figura 29 – Alterando A_0 e ψ - 4º resultado b	93
Figura 30 – Alterando A_0 e ψ - 4º resultado c	94
Figura 31 – Resultado Intermediário - 1º resultado	95
Figura 32 – Alterando λ - 1º resultado	97
Figura 33 – Alterando λ - 2º resultado	97
Figura 34 – Resultado do modelo CHIKV	98
Figura 35 – Sem controle - Modelo 1	100

Figura 36 – Com controle $\alpha_A = 0,3$ - Modelo 1	101
Figura 37 – Com controle $\alpha_A = 0,8$ - Modelo 1	102
Figura 38 – Sem controle - Modelo 2	103
Figura 39 – Com controle $\alpha_L = 0,3$ - Modelo 2	103
Figura 40 – Com controle $\alpha_L = 0,7$ - Modelo 2	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vetores, suas doenças e patógenos	19
Tabela 2 – Quadro sintomatológico da Chikungunya	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABM	Agent-Based Models
AIDS	Síndrome da Imunodeficiência Adquirida
ANMF	Aquática, Fêmeas Não Fertilizadas, Machos, Fêmeas Fertilizadas
ARB	Arboviroses
BNCC	Base Nacional Comum Curricular.
CDC	Center for Disease Control and Prevention.
CHIKV	Vírus Chikungunya
COVID	Corona Vírus Disease
DTV	Doenças Transmitidas por Vetores.
FIOCRUZ	Fundação Oswaldo Cruz.
H1N1	Influenza A
HIV	Vírus da Imunodeficiência Humana
MS	Ministério da Saúde do Brasil.
MSEIR	Materno, Suscetíveis, Expostos, Infectados, Recuperados
OMS	Organização Mundial da Saúde.
OPAS	Organização Pan-Americana da Saúde.
SARs	Síndrome Respiratória Aguda Grave
SEIR	Suscetíveis, Expostos, Infectados, Recuperados
SIR	Suscetíveis, Infectados, Recuperados
SIS	Suscetíveis, Infectados, Suscetíveis
SIRS	Suscetíveis, Infectados, Recuperados, Suscetíveis

SUMÁRIO

Lista de Ilustrações	8
Lista de Tabelas	10
Lista de Abreviaturas e Siglas	11
INTRODUÇÃO	14
1 ARBOVIROSES	17
1.1 Contexto Histórico das DTVs e Arboviroses	20
1.2 <i>Aedes Aegypti</i> : Epidemias e Adaptação Urbana	25
2 CHIKUNGUNYA	29
2.1 Sintomas	29
2.2 Diagnóstico e Transmissão	31
2.2.1 Subnotificações	33
2.3 Tratamento e Prevenção	35
2.4 Impacto e Surtos do Vírus CHIKV no Brasil	37
2.5 Desafios	38
3 EPIDEMIOLOGIA E A MODELAGEM MATEMÁTICA	39
3.1 Evolução Histórica	40
3.2 Aplicações Práticas	41
3.3 Modelos Determinísticos	42
3.3.1 Modelos Determinísticos	42
3.3.2 Modelos Baseados em Agentes	43
3.4 Modelos Compartmentais	44
3.4.1 SIR	46
3.4.2 Acoplamentos e Soluções	48
4 APROXIMAÇÃO NUMÉRICA	50
4.1 Métodos Analíticos	50
4.2 Métodos Numéricos	51
4.2.1 Método de Euler	51
4.2.2 Método de Euler Modificado	54
4.2.3 Método de Runge-Kutta de Quarta Ordem	60
5 MODELAGEM MATEMÁTICA DA CHIKUNGUNYA	64

5.1	SIR - O Modelo Matemático para a População de Pessoas	65
5.2	ANMF - O Modelo Matemático para a População de Mosquitos	
	<i>Aedes aegypti</i>	65
5.2.1	Variáveis e Parâmetros	66
5.2.2	Equações Diferenciais	67
5.3	CHIKV - Modelo Matemático para a Doença Chikungunya	68
5.3.1	Considerações	71
6	CENÁRIOS E SIMULAÇÕES	72
6.1	Determinação dos Valores Iniciais para cada Parâmetro	73
6.2	Parâmetros Iniciais	78
6.3	Discussão dos Resultados	80
6.3.1	Dados do Brasil	80
6.3.2	O Primeiro Resultado Gerado pelo Modelo CHIKV	81
6.4	Aplicação dos Parâmetros de Controle	100
6.5	Considerações Finais	104
7	ENSINO	106
7.1	Plano de Aula para Ensino Fundamental	106
7.2	Plano de Aula para o Ensino Médio	107
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
	REFERÊNCIAS	110
	APÊNDICE A – ENSINO FUNDAMENTAL	115
	APÊNDICE B – ENSINO MÉDIO	135

INTRODUÇÃO

A Chikungunya é uma doença viral transmitida por mosquitos do gênero *Aedes*, em particular o *Aedes aegypti* e o *Aedes albopictus*. Desde sua identificação na década de 1950, a Chikungunya tem emergido como um significativo desafio de saúde pública em várias partes do mundo, incluindo o Brasil. O vírus Chikungunya provoca febre alta, dores articulares intensas, erupções cutâneas e fadiga, frequentemente resultando em incapacitação temporária ou prolongada dos pacientes afetados, segundo a Biblioteca Virtual em Saúde do Ministério da Saúde [8].

No Brasil, a Chikungunya foi registrada pela primeira vez em 2014, e desde então, tem se espalhado rapidamente por diversas regiões do país. Este trabalho visa explorar a dinâmica de transmissão da Chikungunya no Brasil por meio da modelagem matemática, utilizando modelos compartimentais para descrever e prever a propagação da doença. Para Murray (2022) [28] a modelagem matemática é uma valiosa ferramenta aplicável na epidemiologia, permitindo simulações e análises que auxiliam na compreensão da disseminação de doenças e na avaliação de estratégias de controle.

Uma análise detalhada no Catálogo de Teses e Dissertações da Capes [14], utilizando o termo “Chikungunya”, resultou em 555 documentos. No entanto, ao aplicar o filtro “Grande Área de Conhecimento: Ciências Exatas e da Terra”, o número de resultados reduz-se significativamente para apenas 12, e ao restringir ainda mais para “Área de Conhecimento: Matemática”, encontramos apenas 2 trabalhos. O primeiro é a dissertação de Marins (2016) [25], intitulada ‘Diagnóstico médico por meio de relações fuzzy: Dengue, Chikungunya ou Zika’, que utiliza relações fuzzy para diferenciar essas arboviroses. O segundo é a dissertação de Maranhão (2018) [24], ‘Aplicação do Método de Linearização de Lyapunov na Análise de uma Dinâmica Não Linear Para Controle Populacional do Mosquito *Aedes aegypti*’, que foca em métodos matemáticos para controle populacional de vetores. Esses dados evidenciam a lacuna existente na aplicação da matemática na pesquisa sobre a Chikungunya.

Para efeito de comparação, ao realizar a mesma pesquisa com o termo “dengue” e aplicando os mesmos filtros, os resultados foram 2924 documentos, com 91 na área de Ciências Exatas e da Terra, e 28 especificamente na área de Matemática.

O termo “dengue” foi selecionado para esta análise comparativa devido às suas similaridades clínicas e epidemiológicas com a Chikungunya, que incluem sintomas paralelos e o compartilhamento do mesmo vetor, o mosquito *Aedes aegypti*. Considerando a notoriedade e prevalência histórica da dengue nas pesquisas científicas, vemos um evidente contraste com a relativa novidade e menor volume de estudos específicos sobre

a Chikungunya, uma disparidade que ressalta ainda mais a subexploração do campo matemático na abordagem da Chikungunya.

A matemática, com seu imenso potencial para modelagem e análise de dados, oferece um campo amplo e ainda pouco explorado no contexto da Chikungunya. A utilização de métodos matemáticos pode ser crucial para a gestão de informações e desenvolvimento de ferramentas que auxiliem na compreensão e no controle desta doença. Essa lacuna representa uma oportunidade valiosa para avanços científicos significativos, proporcionando novas perspectivas e soluções para os desafios impostos pela Chikungunya.

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Explorar a dinâmica de transmissão da Chikungunya no Brasil utilizando modelos matemáticos.
- Utilizar modelos compartimentais para descrever e prever a propagação da Chikungunya.
- Aplicar métodos numéricos, especialmente o método de Euler, para resolver as equações diferenciais dos modelos matemáticos.
- Desenvolver um modelo matemático específico para a Chikungunya.
- Simular várias hipóteses de dados afim de obter mais informações sobre a doença e contribuir com a calibração do modelo matemático.
- Realizar a estimativa dos parâmetros do modelo, ajustando-os aos dados observacionais reais.
- Avaliar o impacto da aplicação de controle populacional dos mosquitos sobre a dinâmica da doença.
- Propor planos de aula para disseminar o conhecimento sobre a Chikungunya e a importância da matemática na compreensão de problemas epidemiológicos.
- Analisar e discutir as implicações dos resultados obtidos, propondo direções para futuras pesquisas.

A dissertação está organizada em oito capítulos que abrangem desde uma revisão histórica e epidemiológica das arboviroses, com ênfase na Chikungunya, até a aplicação de métodos numéricos para a resolução dos modelos matemáticos propostos.

No Capítulo 1, intitulado “Arboviroses”, apresentamos uma revisão sobre as doenças transmitidas por vetores (DTV), com foco nas arboviroses, destacando a importância do *Aedes aegypti* na transmissão de diversas enfermidades.

O Capítulo 2, “Chikungunya”, discute os sintomas, diagnóstico, transmissão e tratamento da Chikungunya, bem como os impactos e desafios associados à sua prevenção e controle no Brasil.

No Capítulo 3, “Epidemiologia e Modelagem Matemática”, abordamos a epidemiologia e a modelagem matemática, detalhando os diferentes tipos de modelos utilizados, incluindo modelos determinísticos e estocásticos, e introduzindo os modelos compartimentais SEIR e ANMF.

O Capítulo 4, “Métodos Numéricos”, trata das técnicas utilizadas para resolver as equações diferenciais dos modelos matemáticos, com destaque para o método de Euler e suas variantes.

No Capítulo 5, “Modelagem Matemática da Chikungunya”, apresentamos a modelagem matemática específica da Chikungunya, descrevendo as variáveis e parâmetros envolvidos, bem como as equações diferenciais que compõem o modelo CHIKV, nome dado ao modelo matemático desenvolvido em referência ao vírus transmissor da Chikungunya.

O Capítulo 6, “Cenários e Simulações”, apresenta os cenários e simulações realizados, discutindo os resultados obtidos e a aplicação de parâmetros de controle para avaliar a eficácia de diferentes estratégias de mitigação.

No Capítulo 7, “Ensino”, focamos no ensino, propondo planos de aula para diferentes níveis educacionais, com o objetivo de disseminar o conhecimento sobre a Chikungunya e a importância da matemática na compreensão de problemas epidemiológicos.

Finalmente, no Capítulo 8, “Conclusões”, apresentamos as conclusões gerais do estudo, discutindo as implicações dos resultados obtidos e propondo direções para pesquisas futuras.

Além destes capítulos, temos dois apêndices que complementam o Capítulo 7. O Primeiro Apêndice contém materiais didáticos detalhados e planos de aula específicos para o 9º ano do ensino fundamental. O Segundo Apêndice apresenta plano de aula elaborado para o 3º ano do ensino médio. Esses apêndices são recursos valiosos para educadores que desejam incorporar o estudo da Chikungunya e a modelagem matemática em suas práticas pedagógicas, contribuindo para uma educação científica mais rica e contextualizada.

1 ARBOVIROSES

As enfermidades veiculadas por vetores são uma significativa fonte de morbidade e mortalidade, tanto em âmbito nacional quanto global, erigindo-se como um dos mais prementes desafios no domínio da saúde pública. Conforme a Organização Mundial da Saúde - OMS (2020) [40], essas doenças representam mais de 17% de todas as doenças infecciosas, ceifando anualmente mais de 700.000 vidas. A magnitude dessas estatísticas realça a urgência de estratégias eficazes para o controle e prevenção dessas enfermidades, impondo à comunidade científica e às autoridades sanitárias a busca incessante por soluções inovadoras.

Doenças Transmitidas por Vetores (DTV) são definidas pela Organização Pan-Americana de Saúde - OPAS (2024) [33] como aquelas que dependem de um vetor biológico, como mosquitos, carrapatos ou pulgas, para transportar patógenos – incluindo vírus, bactérias e parasitas – de um hospedeiro infectado para um hospedeiro saudável, causando infecção. Esses vetores são essenciais no ciclo de transmissão dessas doenças, atuando como intermediários entre os reservatórios de patógenos e os humanos.

Por outro lado, de acordo com o Ministério da Saúde do Brasil - MS (2023) [6], arboviroses são um subconjunto específico das DTV, caracterizadas por serem causadas por vírus transmitidos exclusivamente por artrópodes hematófagos, como mosquitos e carrapatos. Portanto, enquanto todas as arboviroses são DTV, nem todas as DTV são arboviroses.

No território brasileiro, um leque variado de DTV, dentre as quais se destacam Chikungunya, dengue, doença de Chagas, encefalites, febre amarela, febre oropouche, malária e zika, ilustra a complexidade dos desafios enfrentados no âmbito da saúde pública. O ciclo de vida dos vetores, bem como dos reservatórios e hospedeiros, encontra-se intrinsecamente entrelaçado à dinâmica ambiental dos ecossistemas que habitam. Esse ciclo sofre forte influência de variáveis como temperatura, precipitação, umidade, manejo e cobertura do solo.

Pesquisas indicam que as oscilações climáticas desempenham um papel crucial na modificação da biologia e ecologia dos vetores, influenciando diretamente a propagação das doenças que eles transmitem. Embora prevalentes em regiões tropicais e subtropicais, onde as condições climáticas propiciam o florescimento desses organismos, a atual mudança climática suscita preocupações sobre a possível expansão dessas enfermidades para novas áreas geográficas. Este ponto é destacado pela National Geographic (2022) [29].

Condições de Proliferação dos Vetores

Os vetores encontram condições propícias para sua proliferação em ambientes específicos, como água parada, sendo frequentes em regiões de alta densidade populacional e com deficiências na infraestrutura básica de saneamento, limpeza pública e higiene. Além disso, a negligência da população em manter seus espaços particulares limpos e livres de criadouros contribui significativamente para a propagação desses vetores e, conseqüentemente, das doenças por eles transmitidas.

De acordo com Stéfano (2022) [30], 83,9% das larvas do tipo *Aedes* foram encontradas em residências, enquanto igrejas, escolas, clubes, terrenos baldios e comércios contribuíram com os restantes 16,1%.

Adicionalmente, os sintomas dessas enfermidades muitas vezes carecem de especificidade, dificultando o diagnóstico precoce e a instituição de um tratamento adequado, o que contribui para a disseminação da patologia. Essa conjuntura acentua a incidência das DTV em nações em desenvolvimento, onde os recursos de saúde e a infraestrutura são limitados. Segundo a Organização Pan-Americana da Saúde (2024) [33], aproximadamente 80% da população nas Américas reside em áreas suscetíveis a esses riscos.

Arboviroses e Seus Vetores

No rol das enfermidades veiculadas por vetores, destacam-se as arboviroses, que são causadas por arbovírus transmitidos por artrópodes hematófagos. Estes vírus pertencem a distintas famílias virais, como *Flaviviridae*, *Togaviridae* e *Bunyaviridae*, e são responsáveis por várias doenças de relevância para a saúde pública.

A transmissão ocorre quando um artrópode infectado, ao se alimentar do sangue de um hospedeiro, introduz o vírus diretamente na corrente sanguínea. Fatores climáticos, a densidade populacional de humanos e vetores, e os movimentos migratórios desempenham papéis cruciais na disseminação dessas doenças. As arboviroses podem desencadear uma ampla gama de sintomas, desde manifestações leves até condições graves e potencialmente fatais, como encefalite e hemorragias.

O controle dessas enfermidades representa um desafio substancial para as autoridades de saúde pública, dada a complexidade dos ciclos de transmissão e a necessidade de estratégias integradas. Estas estratégias incluem vigilância epidemiológica, controle vetorial e educação em saúde.

Os principais vetores das arboviroses são os mosquitos, especialmente dos gêneros *Aedes*, *Culex* e *Anopheles*. Estes insetos tornam-se portadores dos vírus ao picarem um indivíduo infectado e, subsequentemente, transferem o agente viral para outros durante suas picadas. A capacidade adaptativa desses vetores a diversos ambientes e suas interações

com fatores climáticos tornam a proliferação das arboviroses um problema complexo e de difícil manejo.

Dentro deste espectro, destacam-se doenças notórias como Chikungunya, dengue, febre amarela e zika, cujos surtos epidêmicos impactam significativamente a saúde e o bem-estar das comunidades afetadas. Neste estudo, direcionamos nossa atenção exclusivamente à análise da Chikungunya, que permanece em uma esfera de menor exploração comparada a outras doenças do mesmo grupo, conforme justificado na introdução.

Tabela 1 – Vetores, suas doenças e patógenos

Vetor	Doença causada	Tipo de Patógeno
Mosquito <i>Aedes</i>	Chikungunya, Dengue, Febre do Vale do Rift, Febre Amarela, Zika	Vírus
	Filariose linfática	Parasita
Mosquito <i>Anopheles</i>	Filariose Linfática, Malária	Parasita
Mosquito <i>Culex</i>	Encefalite Japonesa, Febre do Nilo Ocidental	Vírus
	Filariose Linfática	Parasita
Caramujos Aquáticos	Esquistossomose (barriga d'água)	Parasita
Moscas Pretas	Oncocercose (cegueira dos rios)	Parasita
Pulgas	Peste (transmitida de ratos para humanos)	Bactéria
	Tungíase	Ectoparasita
Piolhos	Tifo, Febre Recorrente	Bactéria
Moscas de Areia	Leishmaniose	Parasita
	Febre do Flebótomo	Vírus
Carrapatos	Febre Hemorrágica da Crimeia-Congo, Encefalite transmitida por carrapatos	Vírus
	Doença de Lyme, Febre recorrente (borreliose), Doenças rickettsiais (ex: febre maculosa e febre Q), Tularemia	Bactéria
Barbeiros	Doença de Chagas (tripanosomíase americana)	Parasita
Moscas tsé-tsé	Doença do sono (tripanosomíase africana)	Parasita

Fonte: Adaptado pelo autor com dados da Organização Mundial da Saúde [40]

A Tabela 1 apresenta uma lista de doenças transmitidas por vetores, categorizadas de acordo com seus respectivos vetores e tipos de patógenos. A diversidade de vetores e patógenos ilustrada na tabela destaca a complexidade e o desafio que as DTV representam para a saúde pública global.

Ao compreender o contexto histórico e epidemiológico das doenças transmitidas por vetores e suas arboviroses, é possível reconhecer a importância de abordagens integradas

para o controle e prevenção dessas enfermidades. A análise histórica nos permite identificar padrões e tendências que são essenciais para o desenvolvimento de estratégias eficazes de saúde pública. O próximo tópico explorará algumas dessas doenças, fornecendo uma visão aprofundada sobre sua origem, surgimento, vetores, transmissão, sintomas, prevenção e tratamento, entre outras informações.

1.1 CONTEXTO HISTÓRICO DAS DTVS E ARBOVIROSES

Neste tópico, são apresentados os resultados de uma pesquisa realizada nos portais do Ministério da Saúde do Brasil [11], Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ) [19], Organização Mundial da Saúde (OMS) [41], Organização Pan-Americana da Saúde (OPAS) [31] e Centers for Disease Control and Prevention (CDC) [36]. O objetivo dessa investigação foi obter informações históricas e epidemiológicas relevantes sobre as principais enfermidades relacionadas a vetores. A seleção das doenças transmitidas por vetores (DTV) e arboviroses (ARB) baseou-se na frequência de ocorrência durante as pesquisas pelos termos “arboviroses”, “doenças transmitidas por vetores” e “vetores”.

As DTV mais notórias incluem a Doença de Chagas, Filariose Linfática, Leishmaniose, Malária, Oncocercose, Peste, Febre Recorrente, Febre Tifoide, Tifo e Doença do Sono (Tripanossomíase Africana). As ARB abrangem doenças como Dengue, Zika, Chikungunya, Febre Amarela, Febre do Oropouche, Febre do Oeste do Nilo, Encefalite de Rocio, Encefalite de Saint Louis, Mayaro e Vírus Ilhéus, Encefalite Equina Ocidental, Encefalite Equina Venezuelana, Febre do Vale do Rift, Encefalite Equina Oriental, Encefalite Japonesa, Febre Hemorrágica da Crimeia-Congo, Febre do Nilo Ocidental e Ross River Virus.

Cada uma dessas doenças possui uma história única de surgimento e disseminação, frequentemente associada a fatores ecológicos e sociais específicos. Essas enfermidades têm um impacto histórico significativo, com registros de surtos que datam de séculos atrás, influenciando profundamente a saúde pública e o desenvolvimento de diversas regiões. Para cada uma dessas doenças, foram compiladas informações gerais sobre origem, surgimento, vetores, transmissão, sintomas, prevenção e tratamento. O objetivo é proporcionar uma compreensão abrangente e integrada das ARB e outras DTV, tanto no Brasil quanto no mundo, destacando a necessidade de contínua vigilância e pesquisa para conter seus impactos na sociedade contemporânea.

Historicamente a dengue, por exemplo, persiste como uma preocupação constante em regiões tropicais, com surtos regulares que sobrecarregam as capacidades de resposta da saúde pública. A Malária, uma das DTV mais antigas, continua a ser um desafio significativo em várias partes do mundo, apesar de décadas de esforços de controle. A Chikungunya, doença central deste trabalho, vem causando prejuízos, ceifando vidas e

deixando sequelas desde a década de 1950.

O estudo contínuo e a vigilância dessas doenças são essenciais para antecipar e mitigar futuros surtos. A colaboração internacional, exemplificada pelas organizações mencionadas, é crucial para o compartilhamento de informações e estratégias de controle eficazes. A pesquisa constante e a inovação na área de vacinas, tratamentos e medidas preventivas são vitais para reduzir o impacto dessas doenças na saúde global. Compreender o contexto histórico e epidemiológico das DTV e ARB permite uma melhor preparação e resposta a essas ameaças. A análise dos padrões históricos de surgimento e disseminação das doenças fornece insights valiosos para o desenvolvimento de políticas de saúde pública mais direcionadas e eficientes.

A história das DTV e ARB é marcada por surtos periódicos que desafiaram sistemas de saúde ao longo do tempo, como veremos a seguir.

A **malária** é uma das doenças mais antigas conhecidas pela humanidade, com registros que remontam a 27 a.C. Causada por parasitas do gênero *Plasmodium* e transmitida por mosquitos do gênero *Anopheles*, a malária tem sido uma presença constante em regiões tropicais e subtropicais. Os primeiros relatos detalhados de malária vêm da Grécia antiga e Roma, onde a doença era endêmica e associada a pântanos e áreas úmidas. A malária provoca sintomas cíclicos de febre, calafrios e anemia severa, e tem sido um grande desafio de saúde pública. Devido a resistência desenvolvida aos medicamentos antimaláricos a recente introdução da vacina RTS,S/AS01 são marcos importantes na luta contra a malária.

Em paralelo à malária, a **peste** emergiu como uma das doenças mais devastadoras da história. Causada pela bactéria *Yersinia pestis* e transmitida por pulgas de roedores, a peste bubônica, também conhecida como Peste Negra, causou a morte de milhões de pessoas na Europa durante a Idade Média, com a primeira grande epidemia documentada em 1347. A peste causou alta mortalidade, dizimando um terço da população europeia e tendo um impacto profundo na sociedade, economia e cultura da época. Embora hoje seja rara e tratável com antibióticos, surtos ocasionais ainda ocorrem, especialmente em áreas rurais e com condições sanitárias precárias.

A **febre tifoide**, causada pela bactéria *Salmonella typhi* e transmitida por ingestão de alimentos ou água contaminados, é conhecida desde os tempos antigos. Epidemias de febre tifoide eram comuns em áreas urbanas densamente povoadas antes da introdução de medidas sanitárias adequadas e do tratamento com antibióticos. A doença continua a ser um problema em regiões com infraestrutura de saneamento inadequada, causando febre prolongada, dor abdominal e, em casos graves, perfuração intestinal.

Seguindo a linha do tempo, a **febre amarela** surgiu como uma arbovirose viral significativa transmitida por mosquitos dos gêneros *Aedes* e *Haemagogus*. A primeira

epidemia documentada de febre amarela ocorreu em 1648 no México. A doença se espalhou rapidamente pelas Américas e África, causando surtos devastadores e milhares de mortes. No século XX, a descoberta da vacina contra a febre amarela foi um marco importante na prevenção da doença, proporcionando imunidade vitalícia. No entanto, surtos ainda ocorrem em áreas endêmicas, como o registrado no Brasil entre 2016 e 2018.

A **dengue**, uma das arboviroses mais conhecidas, teve sua primeira epidemia documentada em 1780 na Filadélfia, EUA. Causada por quatro sorotipos do vírus DENV e transmitida principalmente pelo mosquito *Aedes aegypti*, a dengue tornou-se endêmica em várias regiões tropicais e subtropicais. No Brasil, a dengue foi registrada pela primeira vez em 1981, em Boa Vista, Roraima. A doença é caracterizada por febre alta, dores intensas nas articulações e músculos, erupções cutâneas e, em casos graves, pode evoluir para dengue hemorrágica, que é potencialmente fatal.

A **doença do sono**, ou tripanossomíase africana, foi identificada no final do século XIX e é causada pelo protozoário *Trypanosoma brucei*, transmitido pela mosca tsé-tsé. Esta doença causou epidemias devastadoras na África, especialmente entre 1896 e 1906, na Uganda e na Bacia do Congo, com alta mortalidade. Os sintomas incluem febre, dores de cabeça, prurido e, em estágios avançados, confusão mental, distúrbios sensoriais e coordenação motora, eventualmente levando à morte se não tratada.

A **doença de Chagas**, identificada pela primeira vez em 1909 pelo médico brasileiro Carlos Chagas, é causada pelo protozoário *Trypanosoma cruzi* e transmitida por insetos triatomíneos conhecidos como barbeiros. A doença é endêmica em áreas rurais da América Latina e representa um problema significativo de saúde pública, com milhões de pessoas infectadas. Os sintomas podem ser agudos, como febre e inchaço no local da picada, e crônicos, afetando o coração e o sistema digestivo.

O **vírus Ilhéus**, identificado pela primeira vez no Brasil em 1944, é transmitido por mosquitos do gênero *Culex* e é uma arbovirose que causa febre, dor de cabeça e, em casos graves, pode levar a encefalite. A disseminação do vírus Ilhéus está restrita principalmente à América do Sul, com surtos ocasionais em áreas rurais e florestais.

Em termos de arboviroses emergentes, o **vírus Zika** foi identificado pela primeira vez em 1947 em Uganda. Transmitido pelos mosquitos *Aedes*, o Zika ganhou atenção mundial durante o surto no Brasil em 2015-2016, que foi associado a um aumento de casos de microcefalia em recém-nascidos. Além dos sintomas leves, como febre baixa, erupções cutâneas e conjuntivite, o Zika pode causar sérias complicações neurológicas.

A **Chikungunya**, identificada pela primeira vez em 1952 no sul da Tanzânia, é transmitida pelos mosquitos *Aedes aegypti* e *Aedes albopictus*. No Brasil, a doença foi confirmada pela primeira vez em 2014 e rapidamente se espalhou por diversas regiões. A Chikungunya provoca febre alta, dor intensa nas articulações e pode causar incapacitação

prolongada.

Mais recentemente, a **febre do Oropouche**, causada pelo vírus *Oropouche*, foi identificada pela primeira vez em 1955 em Trinidad e, posteriormente, em 1960 no Brasil. Transmitida principalmente pelo mosquito *Culicoides paraensis*, a febre do Oropouche provoca sintomas semelhantes aos da dengue e Chikungunya, incluindo febre, dor de cabeça e dores musculares. Esta doença tem preocupado as autoridades brasileira, e o Ministério da Saúde a inclui em seu Boletim Semanal sobre arboviroses.

Essas doenças ilustram a complexidade e o desafio contínuo que as DTVs e arboviroses representam para a saúde pública global. A proliferação dessas doenças é influenciada por fatores ambientais e mudanças climáticas que favorecem a reprodução dos vetores. Regiões tropicais e subtropicais são as mais afetadas, onde condições climáticas ideais e infraestrutura inadequada de saneamento criam ambientes propícios para a proliferação dos vetores.

A história das DTVs e arboviroses é marcada por surtos periódicos que desafiaram os sistemas de saúde ao longo do tempo. O estudo contínuo e a vigilância dessas doenças são essenciais para antecipar e mitigar futuros surtos. A colaboração internacional é crucial para o compartilhamento de informações e estratégias de controle eficazes. A análise dos padrões históricos de surgimento e disseminação das doenças fornece insights valiosos para o desenvolvimento de políticas de saúde pública mais direcionadas e eficientes. Compreender o contexto histórico e epidemiológico das DTVs e arboviroses permite uma melhor preparação e resposta a essas ameaças, contribuindo para a redução de seu impacto na saúde global.

A Geografia das Arboviroses

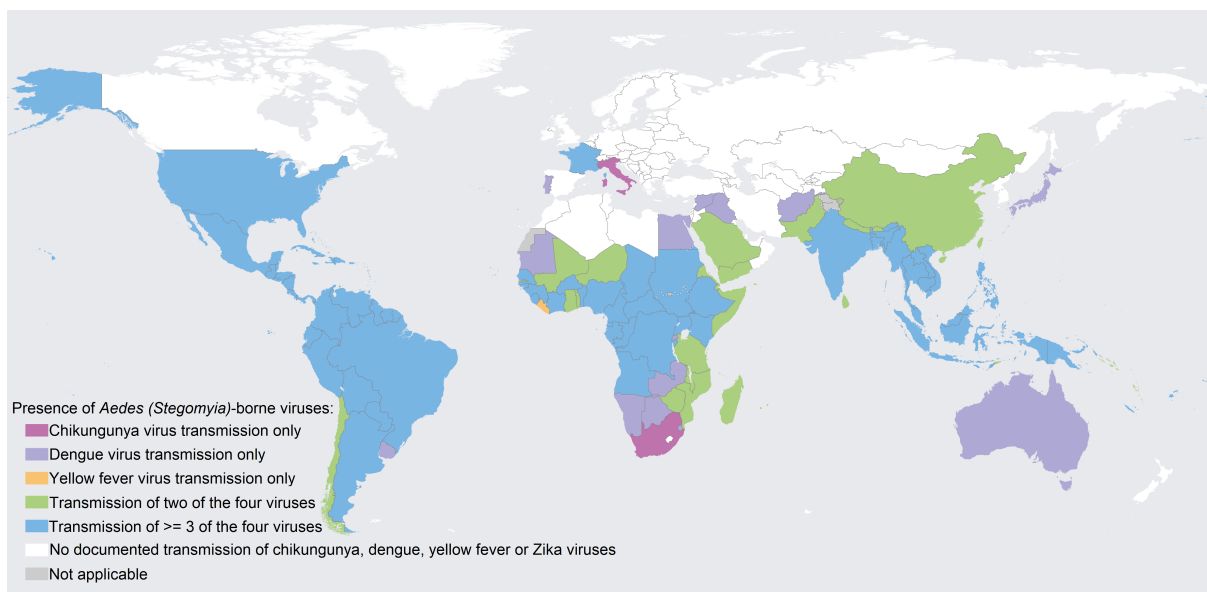
A história das DTVs e ARBs é marcada por surtos periódicos que desafiaram sistemas de saúde ao longo do tempo, exploramos uma série de exemplos destas doenças, destacando seu impacto significativo na saúde pública global ao longo dos séculos, enfatizando a gravidade dessas doenças no mundo. No entanto, o foco principal deste trabalho são as arboviroses, que têm mostrado uma tendência crescente de surtos, com muitos estudos apontando que isso se deve as mudanças ambientais, urbanização e globalização, facilitando a propagação de vetores.

As arboviroses, em particular, requerem atenção especial devido à sua crescente incidência e potencial para causar grandes surtos. A vigilância constante, o desenvolvimento de novas tecnologias de diagnóstico e tratamento, e programas robustos de controle de vetores são essenciais para enfrentar esses desafios.

A variação geográfica das doenças ilustra como fatores ecológicos e sociais influenciam sua disseminação e prevalência. O mapa da Figura 1 destaca as áreas

geográficas mais afetadas por arbovírus, como dengue, febre amarela, Chikungunya e zika, além de identificar regiões em risco de emergência de novos arbovírus. As áreas destacadas incluem principalmente regiões tropicais e subtropicais, com um foco significativo nas Américas, Sudeste Asiático, Pacífico Ocidental, África e Mediterrâneo Oriental, ilustrando a distribuição global dessas doenças.

Figura 1 – Distribuição das principais arboviroses no mundo



Fonte: Organização Mundial da Saúde [39]

A compreensão das complexidades associadas a cada doença é crucial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de prevenção e controle. A ausência de vacinas para muitas dessas doenças sublinha a necessidade de pesquisa contínua e inovação no campo da saúde pública. Além disso, o impacto econômico e social dessas enfermidades ressalta a importância de políticas de saúde pública bem planejadas e da colaboração internacional.

A colaboração entre governos, organizações de saúde, cientistas e comunidades locais é fundamental para o sucesso dessas iniciativas. Uma abordagem multidisciplinar para mitigar o impacto dessas doenças e melhorar a qualidade de vida das populações afetadas. A pesquisa contínua e a inovação são imperativas para a descoberta de novas soluções que possam efetivamente controlar e, eventualmente, erradicar essas doenças.

É inegável que as arboviroses atuais mais impactantes possuem um vilão em comum: o *Aedes aegypti*. Este mosquito tem se adaptado de forma notável e se aproximado cada vez mais da vida urbana, disseminando com grande eficiência doenças que têm um impacto significativo na saúde pública.

1.2 *Aedes aegypti*: EPIDEMIAS E ADAPTAÇÃO URBANA

A presença de diversas espécies pertencentes ao gênero *Aedes* merece destaque, com o *Aedes aegypti* figurando proeminente por sua adaptação às áreas urbanas, enquanto o *Aedes albopictus*, originário do sudeste asiático e conhecido como mosquito tigre, habita predominantemente ambientes rurais.

Os mosquitos do gênero *Aedes* configuram-se como uma das mais iminentes ameaças à saúde pública em escala global, sendo responsáveis pela disseminação de uma variedade de enfermidades virais graves, cujas complicações podem evoluir para desdobramentos clínicos de proporções letais. Estimativas da Organização Mundial da Saúde (OMS) [38] apontam que quase 4 bilhões de indivíduos encontram-se sob o espectro de risco de infecções veiculadas por esses vetores, ressaltando, assim, a gravidade inerente das doenças que lhes são atribuídas, como a Dengue, a Zika, a Chikungunya e a Febre Amarela.

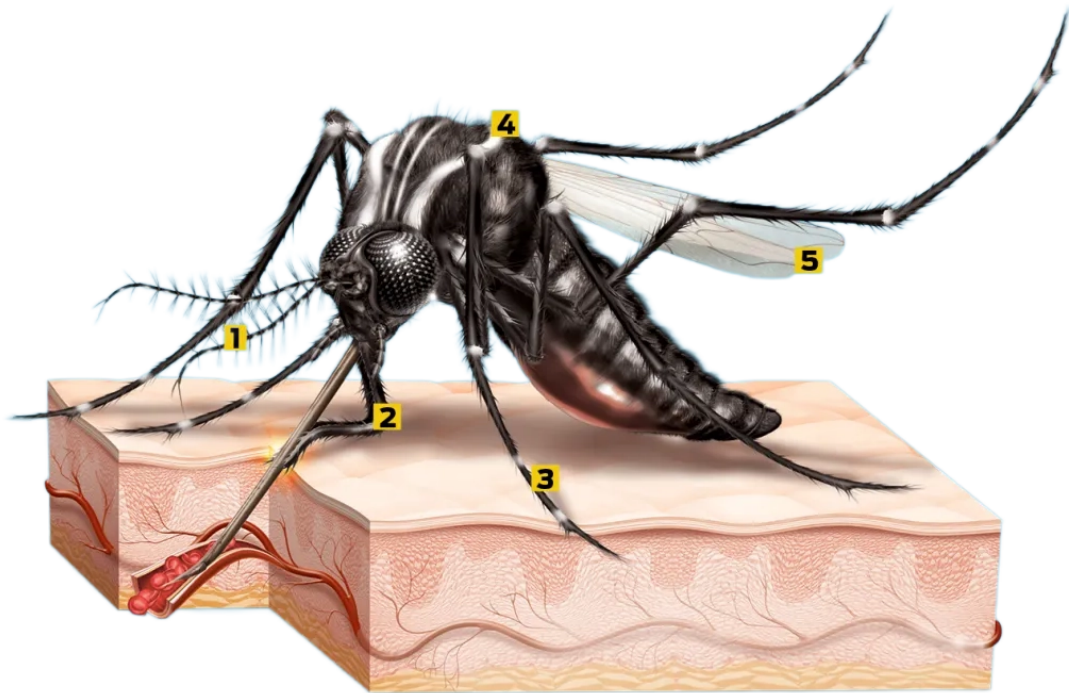
O padrão de atividade alimentar desses mosquitos, predominantemente diurno, somadas a outras características peculiares, os coloca em estreita vizinhança com os seres humanos, conferindo-lhes um significativo acréscimo nas chances de transmissão dessas doenças.

Características

A Organização Pan-Americana de Saúde (2023) [32], afirma que entre os mosquitos do gênero *Aedes*, o *Aedes aegypti* assume um papel preponderante como o principal vetor de arbovírus nas Américas, presente em praticamente todos os países do hemisfério. Trata-se de um inseto de caráter doméstico (adaptado), que se aloja em ambientes internos e nas proximidades de residências, proliferando em quaisquer receptáculos, sejam eles artificiais ou naturais, que contenham água estagnada. Dotado de distintivas marcas brancas nas extremidades das patas e no dorso, em padrão de lira, o *Aedes aegypti* revela-se como um residente urbano, colonizando tanto domicílios quanto outros locais frequentados pela população, como estabelecimentos comerciais, instituições educacionais e espaços de culto.

Na Figura 2, são destacadas seis partes características do mosquito *Aedes aegypti*, essenciais para sua sobrevivência e eficiência como vetor de doenças:

1. **Cerdas:** desempenham papéis distintos entre machos e fêmeas. Nos machos, permitem a detecção das vibrações das asas das fêmeas, facilitando a localização de parceiras, enquanto nas fêmeas, têm uma função tátil, auxiliando na identificação de pele humana adequada para a picada, sendo preferencialmente lisa e livre de pelos.
2. **Palpos:** divididos em cinco segmentos, ajudam o mosquito a manter o equilíbrio ao pousar e proporcionam estabilidade ao inserir a probóscide. Eles também diferenciam os sexos, já que os machos possuem palpos maiores que as fêmeas.

Figura 2 – O Mosquito *Aedes Aegypti*

Fonte: Erika Onodera - Super Interessante (2024) [27]

3. **Probóscide:** tromba que contém a mandíbula, a traqueia e outras estruturas. As fêmeas utilizam-na para penetrar a pele e sugar sangue, sendo composta por dois canais: a hipofaringe, que insere saliva contendo vírus, e o labro, que suga o sangue. A saliva do mosquito, injetada durante a picada, contém substâncias anticoagulantes e anestésicas, o que impede a coagulação do sangue e bloqueia a sensação de dor, explicando por que a picada só é sentida posteriormente. As papilas gustativas, situadas próximas à probóscide, detectam odores corporais e CO_2 liberado na respiração, orientando o mosquito em direção aos alvos humanos.
4. **Asas:** cobertas por escamas escuras, batem a uma frequência de 400 vezes por segundo nas fêmeas e 600 nos machos, sendo, no entanto, quase inaudíveis para os humanos.
5. **Manchas brancas:** compostas por pequenas escamas distribuídas por todo o corpo, são características distintivas do *Aedes aegypti*, embora não desempenhem um papel funcional significativo na vida do inseto.
6. **Olhos:** compostos por até 492 omatídeos, fornecem um campo de visão de 225° , crucial para a percepção da silhueta humana no ambiente, iniciando assim o processo de caça.

Origem e Adaptações

Originário da África, o *Aedes aegypti* possui uma notável capacidade de aclimação aos mais diversos ambientes, aliada à flexibilidade alimentar, que abrange tanto os períodos diurnos quanto noturnos. Isso lhe confere uma adaptabilidade singular e uma ampla distribuição geográfica. Deste modo, a propensão do *Aedes aegypti* à colonização de áreas urbanas, sua habilidade reprodutiva em microambientes aquáticos estagnados e a resistência extraordinária de seus ovos conferem-lhe um estatuto de vetor altamente eficaz na propagação de enfermidades, sobretudo em regiões densamente povoadas.

A fêmea do *Aedes aegypti*, cujos hábitos alimentares tendem a ser diurnos, recorre ao sangue humano para a maturação de seus ovos, uma prática que, por sua vez, a associa de maneira mais intrínseca aos ambientes urbanos, onde a densidade populacional e a abundância de locais propícios à postura de ovos se fazem mais presentes. Além disso, o cenário climático e a precipitação pluvial emergem como variáveis determinantes na eclosão de infestações por *Aedes*.

Este vetor demonstra uma predileção marcante por depositar seus ovos em reservatórios artificiais contendo água estagnada, particularmente em utensílios cotidianos, como tambores, barris e pneus, situados tanto no interior quanto no entorno de residências, instituições educacionais e espaços laborais.

Os ovos do *Aedes aegypti* ostentam uma notável resistência às condições ambientais adversas, sendo capazes de sobreviver por mais de um ano em ambientes secos, característica que figura como uma estratégia preponderante na perpetuação e disseminação da espécie. Segundo a OPAS (2023) [32], o ciclo vital do mosquito, desde sua fase larval até atingir a maturidade como um adulto, demanda um período de tempo relativamente curto, estimado entre 7 a 10 dias; já a longevidade dos mosquitos adultos, em geral, oscila entre 4 e 6 semanas.

O Protagonismo das Fêmeas

Nesse contexto, é relevante destacar que é a fêmea do *Aedes aegypti* que assume o protagonismo na transmissão de enfermidades, haja vista sua necessidade de sangue humano para completar seu ciclo reprodutivo tanto para o desenvolvimento de seus ovos quanto para suprir suas demandas metabólicas, ao passo que o macho, por sua vez, abdica de se alimentar de sangue.

Após a ingestão sanguínea, a fêmea deposita seus ovos em locais propícios à proliferação, tais como reservatórios contendo água estagnada. O ápice de atividade do mosquito se concentra nos primeiros momentos da manhã e no crepúsculo, períodos que apresentam maior propensão ao risco de picadas. Entretanto, as fêmeas, impelidas pela necessidade contínua de alimentação, não se restringem a tais intervalos e buscarão fontes

sanguíneas em outros momentos.

A singularidade reprodutiva desta espécie, aliada à sua capacidade de adaptação a microambientes favoráveis, possibilita que uma única fêmea deposite centenas de ovos ao longo de sua vida, constituindo-se, assim, como um vetor de proliferação de expressiva relevância epidemiológica. O manejo do *Aedes aegypti* e a mitigação das enfermidades por ele propagadas constituem desafios perenes para as autoridades sanitárias em escala global.

Controle Populacional

A Fiocruz (2023) [18], relata que no limiar da década de 1950, o Brasil celebrava um notável triunfo ao ser declarado livre do vetor *Aedes aegypti*. Contudo, tal vitória foi efêmera, visto que, em decorrência da persistência da espécie em países fronteiriços e do relaxamento nas medidas de combate ao mosquito, os índices de infestação ressurgiram na década subsequente, culminando com a atual ubiquidade do mosquito em território nacional. As estratégias de contenção abarcam a erradicação de potenciais criadouros, a aplicação de repelentes, a instauração de barreiras físicas em aberturas residenciais, a aspersão de agentes inseticidas e principalmente a promoção de campanhas educativas acerca da imprescindibilidade de se obstruir a multiplicação desses insetos vetores.

Apesar dos esforços empreendidos, o *Aedes aegypti* persiste como uma ameaça de magnitude expressiva à saúde coletiva, sublinhando, assim, a inelutabilidade de uma vigilância constante e da cooperação interinstitucional entre governos, entidades de saúde e comunidades locais para atenuar o impacto dessas doenças e salvaguardar o bem-estar da população.

A compreensão detalhada do *Aedes aegypti* e sua capacidade de adaptação urbana destaca a importância dele entre os diversos vetores de arboviroses. Entre as diversas enfermidades disseminadas por esse mosquito, a Chikungunya emerge como uma das mais preocupantes devido à sua rápida propagação e aos graves sintomas que provoca. No próximo capítulo, aprofundaremos na análise da Chikungunya, explorando sua epidemiologia, os desafios no diagnóstico e tratamento, e as estratégias de controle e prevenção que têm sido implementadas para enfrentar essa crescente ameaça à saúde pública.

2 CHIKUNGUNYA

A Chikungunya, foi descrita pela primeira vez em 1952 na República Unida da Tanzânia, conforme a Organização Mundial de Saúde - OMS (2022) [37]. O termo “Chikungunya” deriva da língua Kimakonde, falada no sudeste da Tanzânia e no norte de Moçambique, e significa “tornar-se contorcido” ou “curvado de dor”, uma referência à postura arqueada dos pacientes devido às intensas dores articulares que a doença provoca.

O vírus Chikungunya (CHIKV) pertence ao gênero Alphavirus, da família Togaviridae, segundo a OPAS (2023) [32], ele foi isolado pela primeira vez na Tailândia em 1958. Desde então, a doença tem sido registrada em várias regiões tropicais e subtropicais do mundo, incluindo a África, Ásia, Europa e Américas, onde tem causado significativas epidemias. Desde 2005, mais de 2 milhões de casos foram registrados globalmente, sendo identificada em mais de 110 países, abrangendo os continentes da Ásia, África, Europa e Américas.

Esta arbovirose, é uma doença viral, que envolve a transmissão do agente etiológico pela picada de mosquitos fêmeas infectadas, estes mosquitos, notavelmente o *Aedes aegypti* e o *Aedes albopictus*, atuam como vetores primários, com destaque para o *Aedes aegypti*.

De acordo com o Ministério da Saúde (2024) [7], o vírus CHIKV, foi introduzido no continente americano em 2013, desencadeando uma epidemia que afetou vários países da América Central e ilhas do Caribe. No Brasil, a presença desta doença foi confirmada por métodos laboratoriais em 2014, nos estados do Amapá e Bahia. Desde então, a disseminação do vírus alcançou todo o território nacional. Em 2023, observou-se uma dispersão significativa do vírus para os estados da Região Sudeste, sendo que anteriormente a maior incidência se concentrava na Região Nordeste.

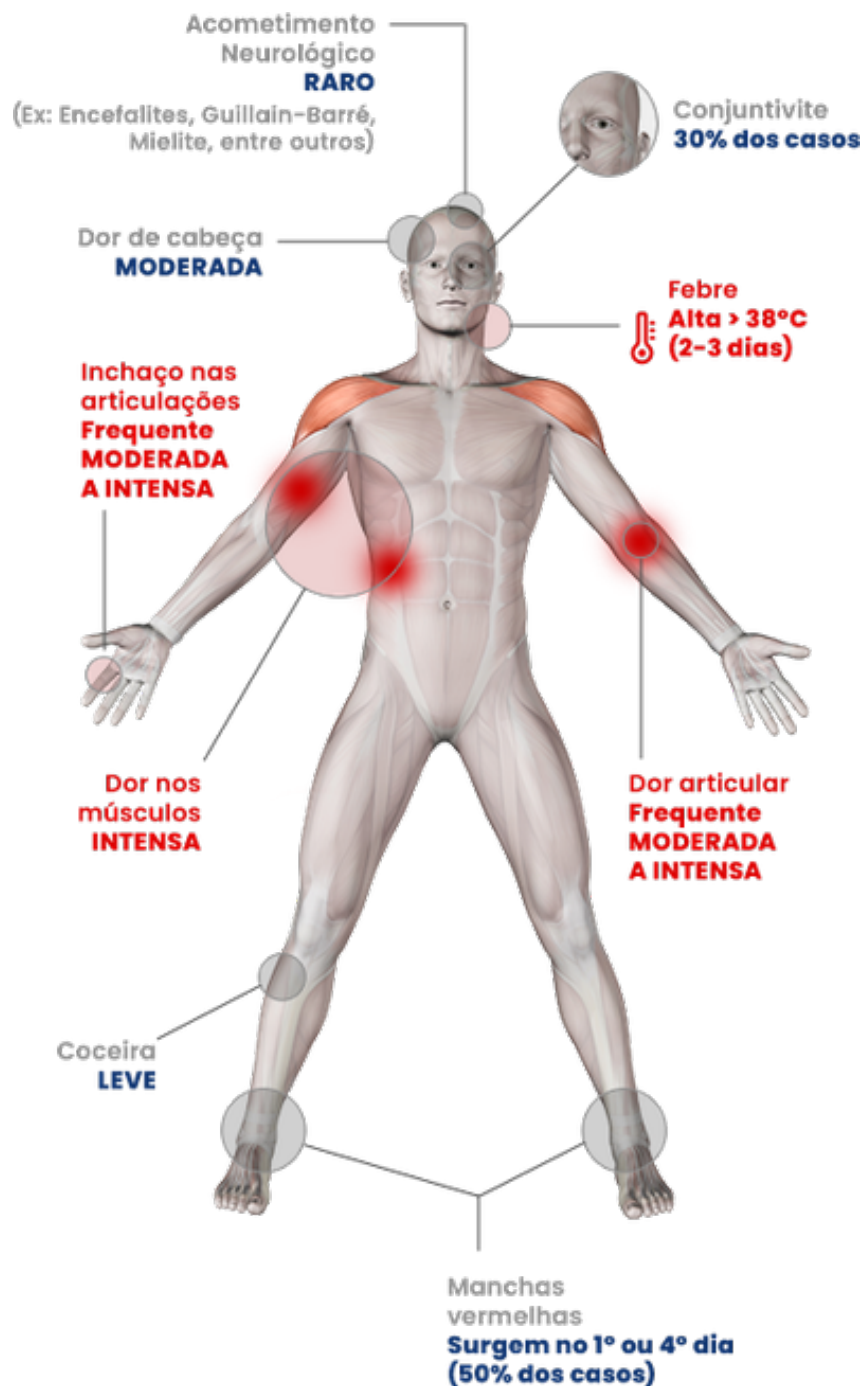
2.1 SINTOMAS

Os sintomas da Chikungunya manifestam-se entre 4 e 7 dias após a picada do mosquito infectado, caracterizando-se por uma febre de início abrupto, frequentemente acompanhada de calafrios, e dor articular severa e incapacitante, que pode perdurar por meses ou até anos. Outros sintomas incluem dor muscular, cefaleia, náuseas, fadiga e erupções cutâneas. A doença progride em três fases distintas:

- a fase febril ou aguda, com duração de 5 a 14 dias, marcada por febre e dor intensa;
- a fase pós-aguda, que se estende de 15 a 90 dias, durante a qual os sintomas persistem de forma menos intensa;

- e a fase crônica, na qual os sintomas podem se prolongar por mais de 90 dias, com a artralgia tornando-se crônica em mais de 50% dos casos.

Figura 3 – Os sintomas da doença Chikungunya



Fonte: Brasil - Ministério da Saúde [7]

A Figura 3 ilustra os sintomas da Chikungunya no corpo humano, destacando a localização e a intensidade dos sintomas. Essa visualização facilita a compreensão do impacto da doença em diferentes partes do corpo, enfatizando os sintomas mais comuns e graves. Complementando essa visualização, a Tabela 2 detalha as manifestações clínicas

da Chikungunya em diversos sistemas e órgãos. Esses dados ressaltam a ampla gama de sintomas e a gravidade potencial da Chikungunya, evidenciando a necessidade de um diagnóstico e tratamento adequados.

Tabela 2 – Quadro sintomatológico da Chikungunya

Sistema/órgão	Manifestações
Nervoso	Irritabilidade, tontura, convulsões, cefaleia intensa e persistente e déficit de força muscular.
Olhos	Neurite óptica, iridociclite, episclerite, retinite e uveíte.
Pulmonar	Desconforto respiratório, pneumonia, insuficiência respiratória.
Cardiovascular	Dor torácica, palpitação, arritmia, hipotensão postural, miocardite, pericardite, insuficiência cardíaca, e instabilidade hemodinâmica.
Pele	Hiperpigmentação por fotossensibilidade, dermatoses vesiculobolhosas e ulcerações aftosa-like.
Rins	Redução da diurese ou elevação abrupta de ureia e creatinina, nefrite e insuficiência renal aguda.
Gastrointestinal	Vômitos persistentes, ascite, sangramentos e icterícia.
Comorbidades	Descompensação de comorbidades subjacentes.
Outros	Hepatite, pancreatite, síndrome da secreção inapropriada do hormônio antidiurético e insuficiência adrenal.

Fonte: Brasil - Ministério da Saúde [7]

A grande parte dos sintomas apresenta uma natureza autolimitada, normalmente perdurando entre 2 e 3 dias. Embora a maioria dos pacientes se recupere completamente, há situações em que a dor articular persiste por períodos prolongados, que podem estender-se por meses ou até anos. É comum que os sintomas em indivíduos infectados sejam leves, o que pode resultar em uma infecção despercebida ou mal diagnosticada, especialmente em regiões onde a dengue também é prevalente.

Embora raramente fatal, a Chikungunya pode acarretar complicações graves, especialmente em idosos, crianças menores de um ano e indivíduos com comorbidades. As complicações podem incluir manifestações neuroinvasivas, como encefalite, mielite, meningoencefalite, síndrome de Guillain-Barré, síndrome cerebelar, paresias, paralisias e neuropatias. Adicionalmente, podem ocorrer complicações oculares, cardíacas e gastrointestinais.

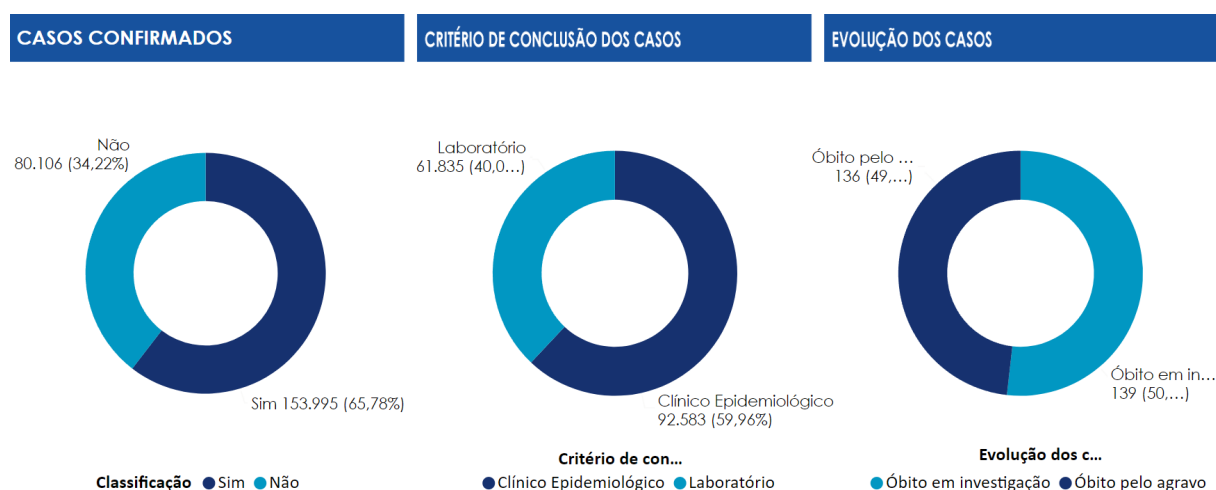
2.2 DIAGNÓSTICO E TRANSMISSÃO

A distinção entre um caso suspeito e um caso confirmado de Chikungunya repousa nos critérios diagnósticos estabelecidos para cada situação. Um caso suspeito é identificado quando o indivíduo apresenta febre de início súbito, acompanhada de artralgia ou artrite intensa, de natureza aguda, não explicada por outras condições clínicas. Adicionalmente,

é imperativo que o indivíduo seja residente em, ou tenha visitado, áreas com transmissão ativa do vírus até duas semanas antes do surgimento dos sintomas, ou que possua vínculo epidemiológico com um caso confirmado.

Em contraste, a confirmação de um caso pode ser alcançada por meio de critérios laboratoriais ou clínico-epidemiológicos. Os critérios laboratoriais incluem a obtenção de resultados positivos em testes específicos, tais como o isolamento viral, a detecção de RNA viral por RT-PCR, ou a identificação de anticorpos IgM ou IgG em amostras de soro. Por outro lado, os critérios clínico-epidemiológicos aplicam-se a casos suspeitos que apresentam vínculo familiar ou espacial com um caso previamente confirmado laboratorialmente. Esta diferenciação é de suma importância para a vigilância epidemiológica eficaz e para a implementação de medidas de controle adequadas, visando a contenção e mitigação da disseminação do vírus Chikungunya.

Figura 4 – Casos de Chikungunya



Fonte: Brasil - Ministério da Saúde (jun. 2024) [10]

Na Figura 4, destaca-se que 65,78% dos casos foram confirmados, com o maior critério de conclusão sendo a avaliação clínica epidemiológica, enquanto apenas 40,04% foram confirmados em laboratório. Em relação à evolução dos casos, 49,45% dos óbitos ocorreram devido ao agravamento da doença, e 50,55% estavam em investigação.

A transmissão vertical do vírus Chikungunya (CHIKV) pode ocorrer quase exclusivamente durante o período intraparto em gestantes virêmicas, há registros documentados de transmissão vertical, ocorrendo predominantemente quando a mãe apresenta febre nos dias imediatamente anteriores ao parto ou durante o processo do parto [32], o que pode levar a infecções neonatais graves [7]. No entanto, a incidência de transmissão durante a gravidez é bastante rara, o que reduz significativamente as preocupações relativas à saúde dos recém-nascidos.

É crucial sublinhar que a Chikungunya não se propaga diretamente de pessoa para

pessoa. O vírus requer um vetor para ser transmitido. As evidências atuais sugerem que a infecção pelo vírus Chikungunya proporciona imunidade vitalícia, o que significa que a doença pode ser contraída apenas uma vez, graças à presença de anticorpos que protegem contra futuras infecções pelo vírus. Os casos de óbito oficialmente decorrentes da Chikungunya são raros e, na maioria das vezes, estão associados a outras condições de saúde preexistentes. Indivíduos que padecem de comorbidades ou que se encontram em estados de saúde comprometidos apresentam um risco significativamente elevado de desenvolver formas graves da doença, o que pode levar a desfechos fatais.

2.2.1 Subnotificações

A febre Chikungunya é muitas vezes confundida com a dengue devido à semelhança de seus sintomas, suscitando crescente preocupação devido à sua disseminação e à subestimação de sua mortalidade. Pesquisas recentes, divulgadas por Freitas (2024) [20], revelaram que o vírus CHIKV, responsável pela Chikungunya, pode ser mais letal do que inicialmente se presumia, superando até mesmo o vírus da dengue em termos de mortalidade. Além disso, tal estudo destaca as dificuldades diagnósticas, especialmente em regiões onde ambos os vírus coexistem, o que contribui para a subnotificação dos casos de Chikungunya.

No contexto brasileiro, durante as epidemias de 2015 e 2016, observou-se um excesso de óbitos em relação aos dados oficiais de mortalidade pela doença. Esses achados sublinham a necessidade premente de se reconhecer a Chikungunya como uma séria ameaça à saúde pública e de se implementarem medidas efetivas de diagnóstico, vigilância, prevenção e tratamento.

Um estudo veiculado no periódico *The Lancet Microbe* [35] enfatiza o surgimento de sete grandes surtos devido ao vírus CHIKV no Brasil ao longo de um período de dez anos. O impacto dessa enfermidade é frequentemente subestimado em face das crises de dengue e zika, conforme reforçado pela OMS (2022) [37]. O estudo constatou que a doença Chikungunya abrange aproximadamente 60% das municipalidades brasileiras. A análise combinada de dados genômicos e epidemiológicos revelou que, entre os anos de 2013 e 2022, o vírus foi responsável por 253,5 mil casos confirmados no país, destacando-se a ocorrência de surtos recorrentes, sobretudo durante os períodos de maior pluviosidade. Em contraposição às percepções correntes, a pesquisa evidenciou o potencial letal da doença, com uma taxa de mortalidade de 1,8 óbitos a cada mil casos.

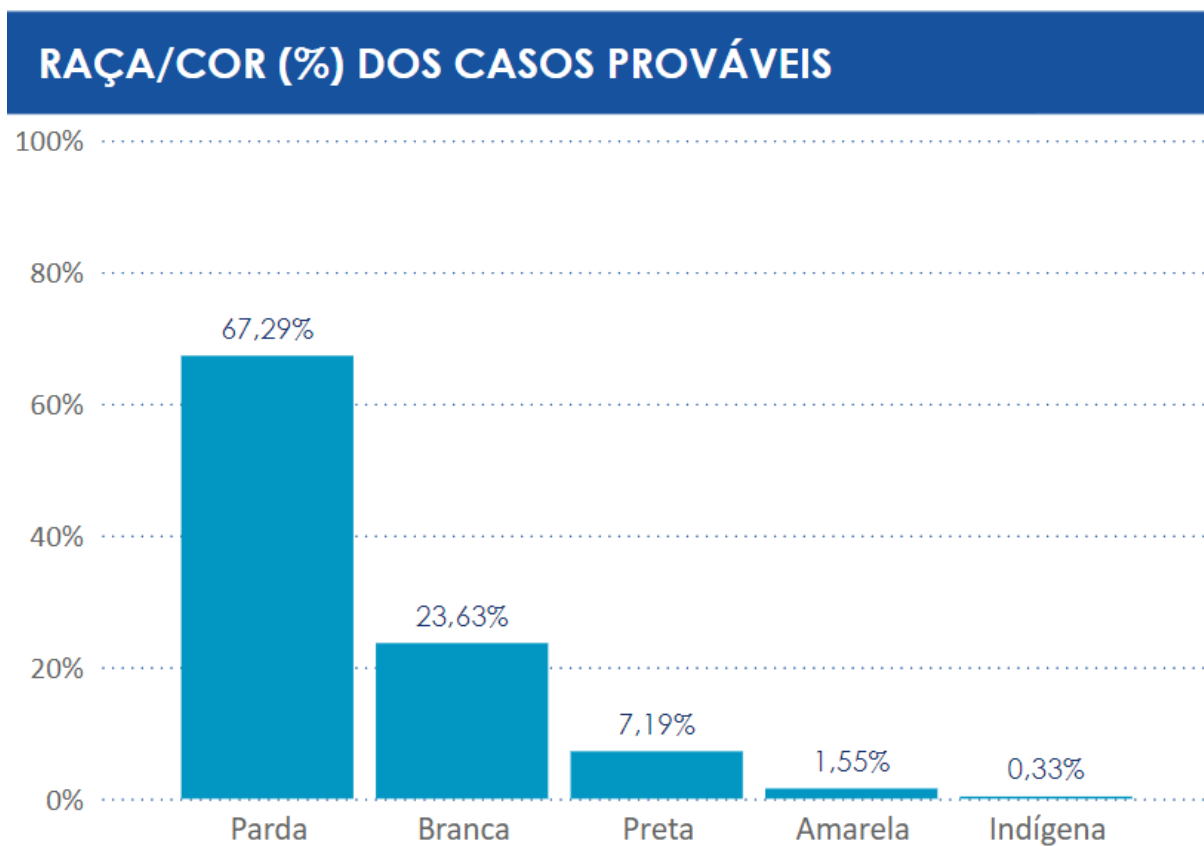
As Figuras 5 e 6 apresentam dados atuais da doença no Brasil, informações relevantes quanto a caracterização dos grupos mais suscetíveis a doença, revelando que a maior proporção dos casos prováveis de Chikungunya ocorre entre as mulheres (59,4%) e a população parda (67,29%).

Figura 5 – Caracterização dos Casos Prováveis de Chikungunya - Sexo



Fonte: Brasil - Ministério da Saúde (jun. 2024) [10]

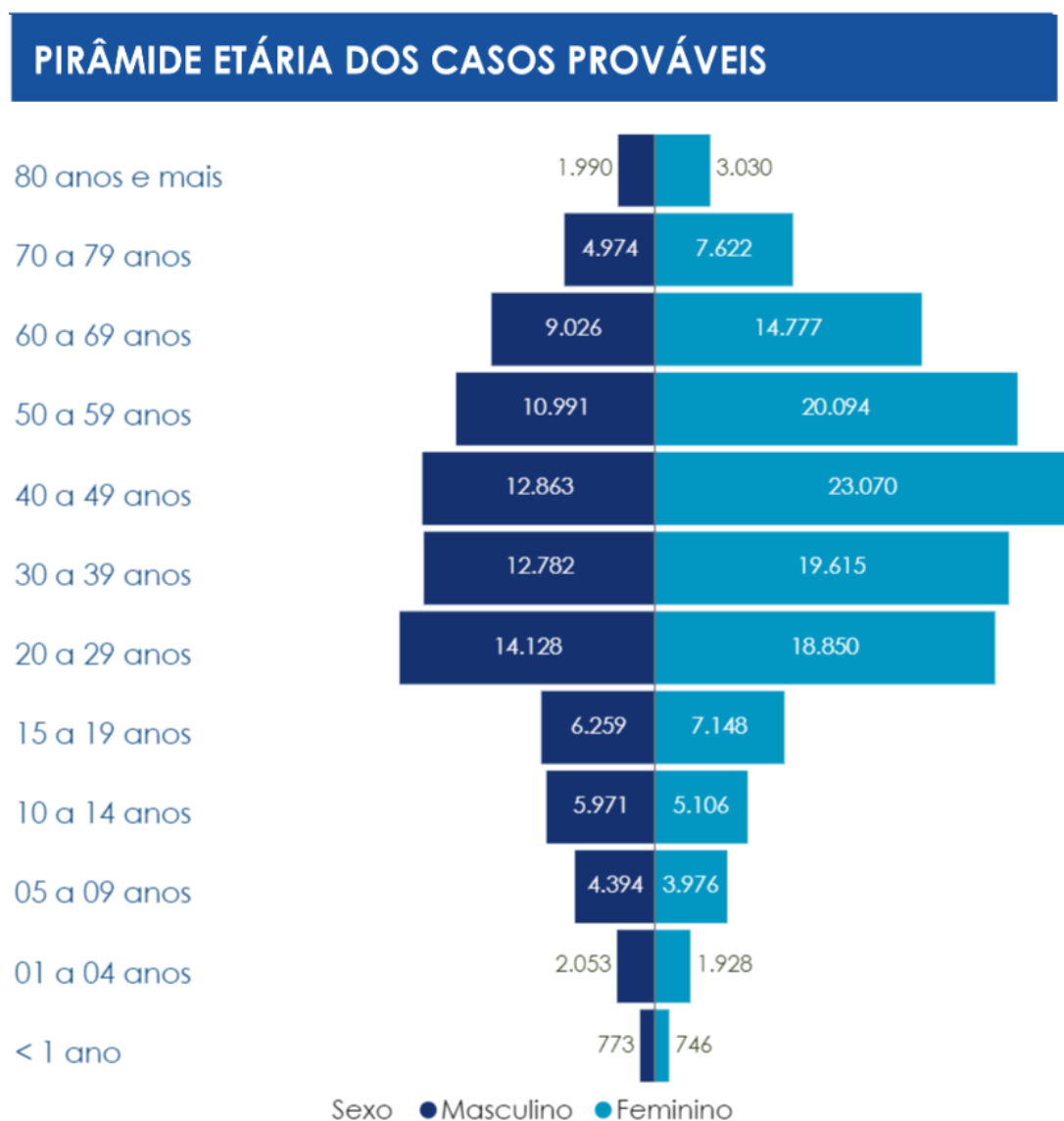
Figura 6 – Caracterização dos Casos Prováveis de Chikungunya - Raça-Cor



Fonte: Brasil - Ministério da Saúde (jun. 2024) [10]

A Figura 7 apresenta a quantidade de casos prováveis divididos pela idades das vítimas de Chikungunya, evidenciando que a faixa etária mais afetada é de 40 a 49 anos. Esses dados destacam a necessidade de estratégias de controle direcionadas para esses grupos específicos, além de medidas de prevenção e educação em saúde pública para minimizar a incidência e impacto da Chikungunya.

Figura 7 – Caracterização dos Casos Prováveis de Chikungunya - Idades



Fonte: Brasil - Ministério da Saúde (jun. 2024) [10]

2.3 TRATAMENTO E PREVENÇÃO

A Chikungunya é uma doença viral sem uma vacina plenamente aprovada e sem um tratamento antiviral específico, transmitida por um vetor notoriamente difícil de combater. Esses fatores combinados criam um cenário propício para graves consequências à saúde pública, exigindo um esforço conjunto significativo entre autoridades sanitárias, pesquisadores e a comunidade, para alcançar sucesso no controle e prevenção da doença.

Vacina

A vacina contra Chikungunya desenvolvida pelo Instituto Butantan [13], em parceria com a Valneva, mostrou eficácia robusta e segurança em estudos clínicos. Com uma taxa de proteção de 99,1% seis meses após a aplicação, a maioria dos vacinados apresentou anticorpos neutralizantes, alcançando alta imunogenicidade e segurança, com reações adversas leves ou moderadas. Aprovada pelo FDA em 2023 e em processo de registro na Anvisa, a vacina representa uma ferramenta crucial na prevenção da Chikungunya, especialmente em regiões endêmicas, prometendo melhorar significativamente a saúde pública.

Tratamento

Diante da ausência de uma vacina homologada ou de um tratamento específico para a infecção pelo vírus CHIKV no Brasil, o manejo clínico aplica tratamento essencialmente sintomático, uma vez que não há tratamento antiviral específico disponível. Inclui analgesia e suporte, utilizando-se medicamentos para alívio da dor e febre, como o paracetamol, hidratação oral e, em casos de comprometimento musculoesquelético severo, fisioterapia. Importante ressaltar que a automedicação deve ser evitada, pois pode mascarar sintomas e agravar o quadro clínico. A orientação médica é fundamental para a gestão adequada dos sintomas e prevenção de complicações.

Prevenção

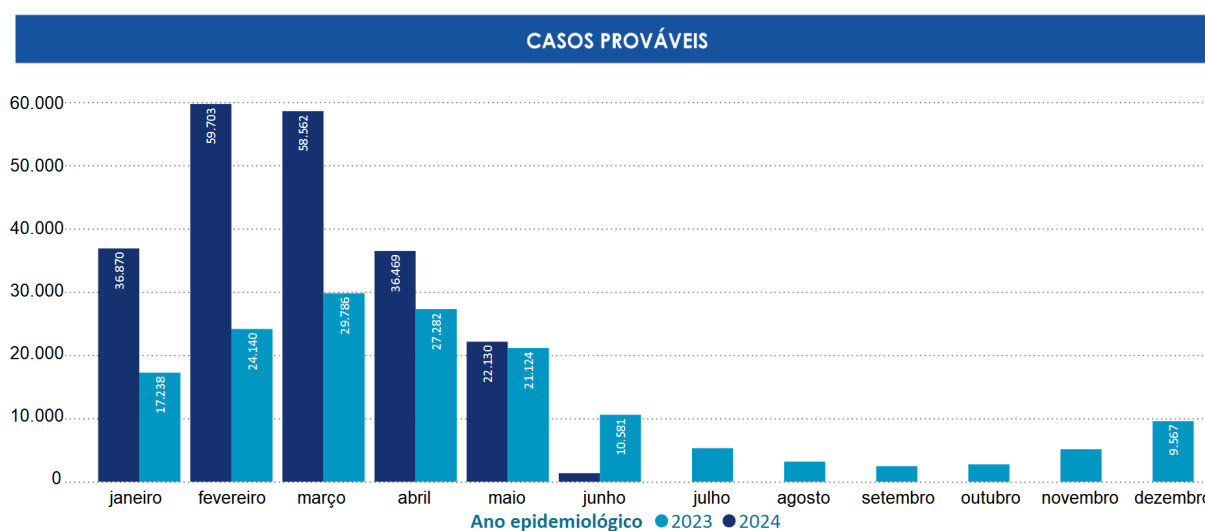
A prevenção da Chikungunya é de suma importância e depende fundamentalmente da redução de habitats propícios à reprodução dos mosquitos. Medidas preventivas incluem a eliminação de recipientes com água parada, onde os mosquitos se reproduzem, e o uso de inseticidas durante surtos para eliminar mosquitos adultos e larvas. A proteção individual é igualmente importante, com o uso de roupas que minimizem a exposição da pele, aplicação de repelentes e utilização de redes mosquiteiras tratadas com inseticidas.

No âmbito da vigilância e controle, é imperativo que as autoridades sanitárias mantenham uma monitorização contínua das áreas afetadas e conduzam campanhas de conscientização para educar a população sobre as medidas preventivas. A cooperação entre governos, profissionais de saúde e a comunidade é vital para enfrentar esta ameaça emergente à saúde pública. As ações de controle devem ser contínuas e adaptáveis às mudanças na distribuição e intensidade da transmissão do vírus.

2.4 IMPACTO E SURTOS DO VÍRUS CHIKV NO BRASIL

A Figura 8 apresenta um comparativo dos casos prováveis de Chikungunya nos anos epidemiológicos de 2023 e 2024. Observa-se que, em 2024, houve um aumento significativo no número de casos nos primeiros meses do ano em comparação a 2023. A partir de abril, os números começam a se equiparar, porém, é importante ressaltar que os dados de 2024, mesmo dos meses anteriores, não estão completos, pois os órgãos responsáveis ainda estão a emitir seus relatórios usados na confecção dessas informações. Esse aumento inicial pode estar relacionado a fatores sazonais, mudanças no comportamento do vetor ou falhas nas medidas de controle e prevenção, indicando a necessidade de uma resposta rápida e eficaz das autoridades de saúde pública e conscientização da população.

Figura 8 – Comparativo de Casos 2023 x 2024

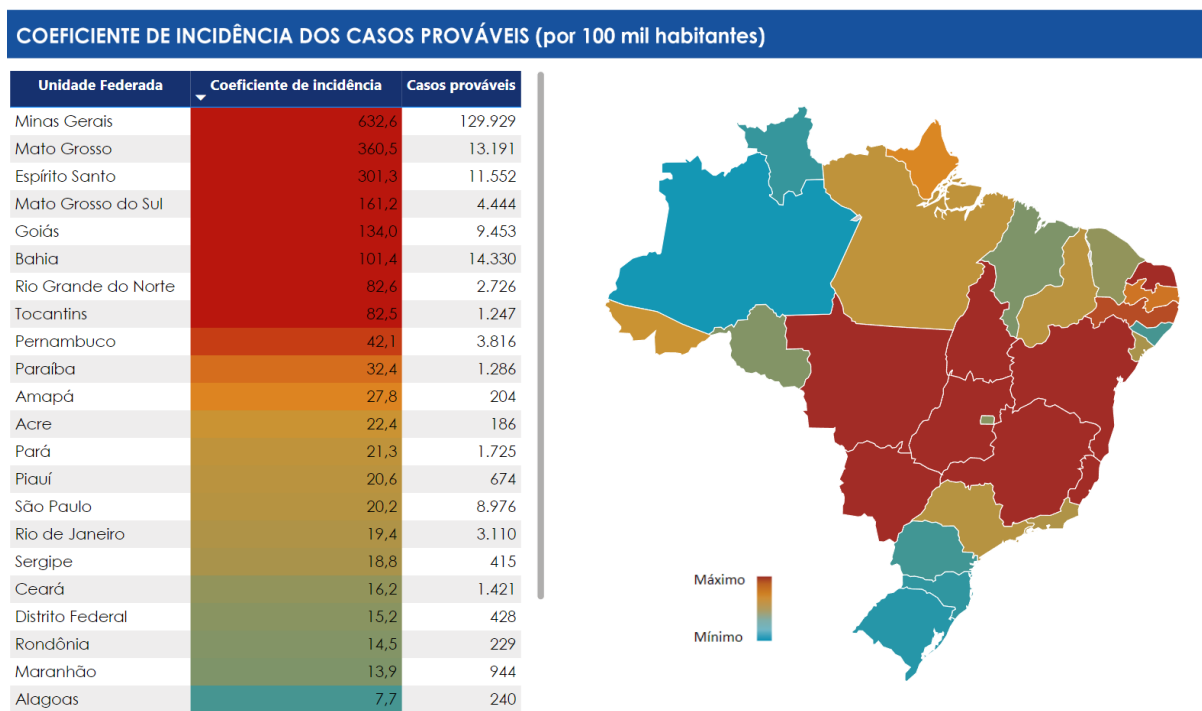


Fonte: Brasil - Ministério da Saúde (jun. 2024) [10]

O cenário atual da Chikungunya no Brasil, está representado na Figura 9, mostrando o coeficiente de incidência dos casos prováveis de Chikungunya por 100 mil habitantes, nas diversas unidades federativas do país. Minas Gerais apresenta o maior coeficiente de incidência, seguido por Mato Grosso e Espírito Santo. Em contraste, estados como Alagoas, Maranhão e Rondônia apresentam os menores coeficientes. Esses dados ilustram a distribuição geográfica da doença, destacando a influência que essa distribuição possui sobre a propagação do vírus CHIKV.

Os dados epidemiológicos brasileiros mais recentes delineiam um cenário de preocupação, evidenciando um total de 212.316 casos suspeitos da doença até junho de 2024, conforme os registros do Ministério da Saúde. Além disso, a notificação de 130 óbitos confirmados e 120 em fase de investigação ressalta a seriedade da situação.

Figura 9 – Distribuição Geográfica da Chikungunya



Fonte: Brasil - Ministério da Saúde (jun. 2024) [10]

2.5 DESAFIOS

Nota-se que a Chikungunya representa um desafio substancial para a saúde pública, dada a sua rápida disseminação e os sintomas debilitantes que pode causar. A vigilância epidemiológica, diagnóstico precoce, tratamento sintomático e medidas preventivas são essenciais para controlar a doença e minimizar seu impacto.

Dada a severidade da enfermidade e sua rápida disseminação global, é imperativo que os pesquisadores prossigam na investigação das múltiplas facetas relacionadas a essa patologia. Nesse contexto, torna-se de grande relevância o desenvolvimento de estratégias eficazes para a prevenção e contenção da Chikungunya, visando reduzir sua incidência e mitigar seus efeitos.

A utilização de modelos matemáticos emerge como uma ferramenta valiosa para compreender a dinâmica de propagação das doenças infecciosas transmitidas por vetores, além de permitir a avaliação de estratégias de intervenção. Tais modelos têm a capacidade de representar a interação entre a transmissão da doença e fatores epidemiológicos e demográficos, viabilizando a previsão da sua disseminação em distintos cenários.

3 EPIDEMIOLOGIA E A MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática é uma alternativa que possibilita a compreensão de fenômenos complexos mediante a construção de representações matemáticas simplificadas da realidade (Edelstein-Keshet, 2005) [17]. No contexto da epidemiologia, proporciona uma estrutura quantitativa para o estudo da propagação de doenças infecciosas, permitindo previsões sobre o comportamento de epidemias e pandemias.

Na epidemiologia, os modelos matemáticos ajudam a entender como uma doença se espalha em uma população e quais fatores influenciam sua transmissão. Parâmetros como a taxa de transmissão β e a taxa de recuperação γ são usados nas equações diferenciais que descrevem as mudanças nas proporções dos compartimentos ao longo do tempo (Murray, 2002) [28].

Por meio da modelagem matemática, é possível simular diferentes cenários de disseminação de doenças, considerando variáveis como taxa de transmissão, período de incubação e taxa de recuperação. Esses modelos permitem avaliar a eficácia de estratégias de intervenção, como campanhas de vacinação e medidas de distanciamento social, fornecendo uma base científica para a tomada de decisões em saúde pública.

Existem diferentes tipos de modelos epidemiológicos. Os modelos determinísticos assumem que a população é homogênea e as variáveis mudam de forma contínua e previsível ao longo do tempo. Já os modelos estocásticos incorporam variabilidade e incerteza, sendo particularmente úteis para populações pequenas. Além disso, há os modelos baseados em agentes, que simulam a interação de indivíduos com características específicas, proporcionando uma visão detalhada da dinâmica da doença.

A modelagem matemática pode contribuir para a alocação eficiente de recursos de saúde. Em situações de emergência, a capacidade de prever a demanda por leitos hospitalares, ventiladores e outros recursos críticos pode salvar vidas. Modelos matemáticos permitem a simulação de diferentes cenários de demanda e fornecem informações valiosas para os planejadores de saúde pública, ajudando a garantir que os recursos sejam distribuídos de maneira eficiente e equitativa (Bacaër, 2022) [1].

Em resumo, a modelagem matemática na epidemiologia facilita a compreensão e previsão de surtos de doenças, sendo uma ferramenta útil para a formulação de políticas de saúde pública baseadas em evidências, a avaliação de intervenções e a alocação de recursos. Ao transformar dados complexos em informações acionáveis, a modelagem matemática ajuda a proteger a saúde pública e a mitigar os impactos das epidemias (Murray, 2002)

[28].

3.1 EVOLUÇÃO HISTÓRICA

A evolução da modelagem matemática em epidemiologia demonstra um desenvolvimento contínuo e significativo das ciências matemáticas e biomédicas. Desde as primeiras tentativas de quantificação de fenômenos epidêmicos até os avanços do século XX, a aplicação de modelos matemáticos para entender a dinâmica das doenças infecciosas se tornou uma ferramenta valiosa na previsão e controle de surtos, impactando diretamente as políticas de saúde pública [28].

Durante o século XX, os avanços na tecnologia computacional permitiram o desenvolvimento de modelos matemáticos mais complexos. Nos anos 1970 e 1980, a modelagem baseada em agentes possibilitou simulações detalhadas das interações individuais, oferecendo uma visão granular da dinâmica das epidemias [17]. Segundo Bassanezi (2014) [3], essa modelagem permite a representação de fenômenos complexos através de equações e simulações.

No final do século XX e início do século XXI, a globalização e a urbanização aumentaram a complexidade da propagação de doenças. Epidemias como SARS, gripe H1N1 e Ebola evidenciaram a necessidade de modelos robustos para prever surtos e orientar respostas de saúde pública [15]. Durante a pandemia de COVID-19, modelos preditivos desempenharam um papel importante ao estimar a disseminação do vírus e avaliar o impacto de intervenções [17].

Modelos matemáticos desempenharam um papel significativo na pandemia de HIV/AIDS, ajudando a desenvolver estratégias de intervenção e prevenção, como o uso de tratamentos antirretrovirais que reduziram a transmissão do vírus e a mortalidade [16]. A inclusão de variáveis como mobilidade humana, redes de contato e variações comportamentais são importantes para prever cenários realistas e complexos de disseminação de doenças [28].

Atualmente, a modelagem matemática em epidemiologia evoluiu com a integração de tecnologias avançadas, como grandes bancos de dados, inteligência artificial e aprendizado de máquina. Esses avanços permitem a análise em tempo real de grandes volumes de dados epidemiológicos, melhorando a precisão dos modelos para identificar padrões ocultos e antecipar surtos [3]. A colaboração interdisciplinar fortalece a capacidade de resposta eficaz a surtos de doenças, sendo indispensável para a compreensão e controle de doenças infecciosas e preparando a saúde pública para enfrentar desafios futuros.

Esses exemplos mostram que a modelagem matemática pode auxiliar no combate a epidemias, permitindo a compreensão da dinâmica de propagação das doenças e a avaliação

de estratégias de intervenção. O avanço tecnológico tem sido fundamental para enfrentar desafios sanitários complexos ao longo dos anos [1].

A seguir, organizaremos alguns desses avanços, destacando como a modelagem matemática se tornou uma poderosa ferramenta na epidemiologia, proporcionando entendimentos valiosos sobre a dinâmica de propagação de doenças e influenciando as políticas de saúde pública.

3.2 APLICAÇÕES PRÁTICAS

Vimos que a aplicação de modelos matemáticos na previsão e controle de epidemias pode permitir a antecipação de surtos, a alocação eficiente de recursos e a formulação de estratégias de intervenção baseadas em evidências. Esses modelos, utilizando dados históricos e atuais, são capazes de prever a disseminação de doenças, identificar áreas de alto risco e avaliar a eficácia de diferentes intervenções.

O estudo das referências citadas neste capítulo nos leva às seguintes conclusões de aplicações:

- **Previsão de Surtos e Avaliação de Intervenções de Saúde Pública:** Modelos preditivos utilizam dados históricos e atuais para estimar a disseminação futura de doenças, identificando áreas de alto risco e trajetórias prováveis de infecções. Além disso, permitem avaliar a eficácia de intervenções de saúde pública ao simular o impacto de estratégias de controle, como isolamento de casos, vigilância de contatos e campanhas de vacinação. Dessa forma, é possível identificar quais intervenções seriam mais eficazes na redução da transmissão do vírus.
- **Alocação de Recursos:** A modelagem matemática pode ser utilizada para otimizar a alocação de recursos em situações de surto, prevendo a demanda por vacinas, antivirais e equipamentos médicos, como ventiladores e leitos hospitalares, garantindo que áreas mais necessitadas recebam o suporte adequado. Em situações de escassez, esses modelos são especialmente úteis para priorizar grupos de risco e regiões com alta taxa de transmissão. Além disso, permitem simular diferentes cenários de vacinação para prever o impacto de várias estratégias de distribuição.
- **Gestão de Mobilidade e Viagens:** Modelos que incorporam dados de mobilidade humana, como registros de voos e movimentação populacional, ajudam a prever a disseminação de doenças entre diferentes regiões e países.
- **Monitoramento e Controle Contínuo:** Em doenças endêmicas, modelos podem monitorar tendências de longo prazo e gerar dados para avaliar o impacto de

intervenções contínuas. Esses modelos ajudam a identificar mudanças na dinâmica da doença, indicando a necessidade de ajustar as estratégias de controle.

3.3 MODELOS DETERMINÍSTICOS

Os modelos determinísticos são utilizados na modelagem de sistemas biológicos, oferecendo uma visão previsível e contínua, enquanto os modelos estocásticos capturam a variabilidade inerente e são particularmente úteis para populações menores. Ambos os tipos de modelos contribuem significativamente para a compreensão e previsão da dinâmica de doenças infecciosas e na formulação de estratégias eficazes de controle (Edelstein-Keshet, 2005) [17].

3.3.1 Modelos Determinísticos

Os modelos determinísticos utilizam equações diferenciais para descrever a dinâmica de um sistema biológico de forma previsível e contínua. Nesse tipo de modelo, dado um conjunto inicial de condições, o comportamento do sistema é inteiramente determinado, sem qualquer componente aleatório. Esses modelos são amplamente utilizados para estudar a evolução de populações, a propagação de doenças infecciosas e outras dinâmicas biológicas [28].

Exemplo: Modelo SIR

Um exemplo clássico de modelo determinístico é o modelo SIR (Suscetíveis, Infectados, Recuperados), utilizado na epidemiologia para descrever a propagação de doenças infecciosas. O modelo SIR divide a população em três compartimentos:

- **Suscetíveis (S):** Indivíduos que podem contrair a doença.
- **Infectados (I):** Indivíduos que estão atualmente infectados e podem transmitir a doença.
- **Recuperados (R):** Indivíduos que se recuperaram da doença e adquiriram imunidade.

As equações diferenciais que descrevem o modelo SIR são:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I$$

onde:

- β é a taxa de transmissão do patógeno.
- γ é a taxa de recuperação dos infectados.

Essas equações mostram como as proporções de suscetíveis, infectados e recuperados mudam ao longo do tempo. O modelo SIR é útil para prever o pico de uma epidemia e a quantidade de pessoas que serão infectadas ao longo do tempo, permitindo a formulação de estratégias de controle da doença [28].

3.3.2 Modelos Baseados em Agentes

Os modelos baseados em agentes (Agent-Based Models - ABMs) são uma abordagem flexível para simular sistemas complexos compostos por múltiplos agentes interagentes. Cada agente no modelo é uma entidade autônoma com suas próprias regras de comportamento, podendo representar indivíduos, grupos ou entidades em um sistema biológico, social ou econômico. Os ABMs são particularmente úteis na epidemiologia, onde podem ser utilizados para simular a disseminação de doenças infecciosas em populações heterogêneas [1].

Características dos Modelos Baseados em Agentes

- **Heterogeneidade dos Agentes:** Diferente dos modelos determinísticos e estocásticos que tratam as populações como homogêneas, os ABMs permitem a inclusão de variabilidade individual. Cada agente pode ter características distintas, como idade, estado de saúde, comportamento e suscetibilidade à doença.
- **Interações Locais:** Agentes interagem uns com os outros e com o ambiente de acordo com regras específicas. Essas interações locais podem levar a comportamentos emergentes complexos no nível da população.
- **Dinâmica Espacial:** ABMs podem incluir uma representação espacial explícita, permitindo simular a propagação de doenças em diferentes ambientes geográficos e a influência das movimentações dos agentes no espalhamento da infecção.
- **Regra de Comportamento:** Cada agente segue um conjunto de regras que determinam suas ações. Essas regras podem ser baseadas em probabilidades, determinísticas ou uma combinação de ambas, e podem mudar ao longo do tempo em resposta a fatores internos ou externos.

Aplicações dos Modelos Baseados em Agentes na Epidemiologia

Os ABMs são amplamente utilizados na modelagem de epidemias devido à sua capacidade de capturar a complexidade das interações humanas e a heterogeneidade das populações. Aqui estão algumas aplicações notáveis:

- **Simulação da Disseminação de Doenças Infecciosas:** ABMs são utilizados para simular a propagação de doenças como influenza, sarampo, HIV e COVID-19. Eles permitem a análise de como diferentes fatores, como a estrutura de contatos sociais, mobilidade humana e intervenções de saúde pública, influenciam a dinâmica da epidemia.
- **Avaliação de Intervenções de Saúde Pública:** ABMs podem ser usados para testar a eficácia de diversas estratégias de controle de doenças, como campanhas de vacinação, quarentenas, uso de máscaras e distanciamento social. Ao variar os parâmetros do modelo, é possível identificar as intervenções mais eficazes e planejar respostas a surtos.
- **Estudos de Cenários:** ABMs permitem a execução de estudos de cenários “e se”, onde diferentes políticas ou mudanças nas condições iniciais são simuladas para prever os possíveis resultados. Isso é particularmente útil para planejadores de saúde pública que precisam se preparar para surtos futuros e emergências de saúde.

Os modelos baseados em agentes são usados para a simulação de sistemas epidemiológicos complexos. Eles permitem a inclusão de heterogeneidade, interações locais e dinâmicas espaciais, proporcionando uma visão detalhada e realista da propagação de doenças infecciosas. Através de ABMs, é possível avaliar a eficácia de intervenções de saúde pública, realizar estudos de cenários e melhorar a preparação e resposta a surtos.

3.4 MODELOS COMPARTIMENTAIS

Os modelos compartimentais são uma classe de modelos matemáticos amplamente utilizados na epidemiologia para descrever a propagação de doenças infecciosas dentro de uma população. Esses modelos dividem a população total em diferentes compartimentos, cada um representando um estado específico de saúde ou estágio da doença. A transição de indivíduos entre esses compartimentos é governada por taxas específicas, descritas por equações diferenciais.

Esses modelos oferecem uma forma sistemática de analisar e prever a dinâmica das doenças, facilitando a formulação de intervenções de saúde pública eficazes.

Princípios Básicos dos Modelos Compartimentais

Os modelos compartimentais são baseados em alguns princípios fundamentais que formam a estrutura de sua abordagem:

- **Modelo SIR (Suscetíveis-Infetados-Recuperados):** Utilizado para doenças que conferem imunidade permanente após a recuperação. Suas equações foram abordados anteriormente.
- **Modelo SEIR (Suscetíveis-Expostos-Infetados-Recuperados):** Adiciona um compartimento para indivíduos expostos que foram infectados, mas ainda não são infecciosos. Governado pelas equações:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI$$

$$\frac{dE}{dt} = \beta SI - \sigma E$$

$$\frac{dI}{dt} = \sigma E - \gamma I$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I$$

- **Modelo SIS (Suscetíveis-Infetados-Suscetíveis):** Para doenças onde a imunidade não é permanente e indivíduos podem ser reinfectados. Governado pelas equações:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI + \gamma I$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I$$

- **Modelo SIRS (Suscetíveis-Infetados-Recuperados-Suscetíveis):** Considera a imunidade temporária. Governado pelas equações:

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI + \alpha R$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I - \alpha R$$

- **Modelo MSEIR (Materno-Suscetíveis-Expostos-Infetados-Recuperados):** Inclui imunidade materna passiva. Governado pelas equações:

$$\frac{dM}{dt} = -\delta M$$

$$\frac{dS}{dt} = \delta M - \beta SI$$

$$\frac{dE}{dt} = \beta SI - \sigma E$$

$$\frac{dI}{dt} = \sigma E - \gamma I$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I$$

Cada um desses modelos compartimentais oferece uma maneira única de entender e prever a propagação de doenças infecciosas, permitindo que pesquisadores e profissionais de saúde pública desenvolvam estratégias mais eficazes para controle e prevenção de surtos. A flexibilidade e a capacidade de adaptação desses modelos são valiosas para abordar os desafios epidemiológicos em diferentes contextos populacionais e patogênicos.

3.4.1 SIR

O modelo SIR (Suscetíveis-Infetados-Recuperados) divide a população em três compartimentos principais: Suscetíveis (S), Infetados (I) e Recuperados (R), capturando a dinâmica da transmissão da doença ao longo do tempo.

Os indivíduos suscetíveis (S) são vulneráveis à infecção. Os infetados (I) podem transmitir a doença a outros. Os recuperados (R) são aqueles que adquiriram imunidade após a infecção. A população total N é a soma dos indivíduos em todos os compartimentos: $N = S + I + R$. Obs. O valor de N é fixo caso a dinâmica vital da população não seja considerada.

- **Estrutura e Componentes do Modelo**

O modelo SIR assume que a população total permanece constante, desconsiderando nascimentos, mortes naturais e migrações. Ele supõe homogeneidade na população e imunidade permanente após a recuperação.

O modelo é descrito por equações diferenciais que capturam a dinâmica epidêmica. Essas equações mostram como os indivíduos se movem entre os compartimentos ao longo do tempo. A equação para $\frac{dS}{dt}$ indica a redução de suscetíveis conforme são infetados. A equação para $\frac{dI}{dt}$ mostra o aumento e a diminuição de infetados conforme se infetam e se recuperam. A equação para $\frac{dR}{dt}$ demonstra o aumento de recuperados à medida que os infetados se recuperam.

- **Taxas de Transição**

As taxas de transição entre compartimentos são:

1. **Taxa de Transmissão (β):** Determina a rapidez com que a doença se espalha. Representa a probabilidade de um contato resultar em infecção.

2. **Taxa de Recuperação (γ):** É a fração de infectados que se recuperam por unidade de tempo. Inversamente proporcional ao tempo médio de infecção.

- **Histórico**

O modelo SIR foi formalizado por Kermack e McKendrick em 1927 [22]. Eles demonstraram que, sob certas condições, uma epidemia segue um curso previsível. O modelo SIR continua a ser expandido e utilizado, servindo de base para muitos outros modelos epidemiológicos.

- **Suposições e Limitações**

O modelo SIR possui algumas suposições limitadoras [17]:

1. **Homogeneidade da População:** Supõe interação uniforme entre indivíduos, ignorando variabilidade real.

2. **Ausência de Migração:** Não considera migração significativa durante a epidemia.

3. **Imunidade Permanente:** Assume imunidade permanente após a recuperação.

4. **Ausência de Período de Incubação:** Não inclui um compartimento para indivíduos expostos, mas não infecciosos.

- **Combinação com Outros Modelos**

Para superar limitações, o modelo SIR pode ser integrado com outros modelos epidemiológicos, incluindo compartimentos adicionais como no modelo SEIR, ou combinado com modelos baseados em agentes e técnicas de machine learning.

- **Conclusão**

O modelo SIR é significativo na epidemiologia matemática, proporcionando uma estrutura clara para entender e prever a propagação de doenças infecciosas. Suas suposições simplificadoras são superadas pela integração com outros modelos, garantindo sua relevância contínua na análise e controle de doenças infecciosas.

3.4.2 Acoplamentos e Soluções

Para superar as limitações dos modelos epidemiológicos individuais como SIR, SEIR, SIS, SIRS e MSEIR, é essencial combiná-los com outras abordagens e técnicas de modelagem. Isso inclui adicionar compartimentos adicionais, como no modelo SEIR, que considera indivíduos expostos que ainda não são infecciosos [17]. Modelos baseados em agentes e técnicas de *machine learning* capturam a complexidade das interações sociais e comportamentais [3], permitindo a inclusão de variabilidade individual e redes de contato complexas, melhorando a precisão das previsões epidemiológicas.

A integração de algoritmos de aprendizado de máquina identifica padrões ocultos nos dados e antecipa surtos antes que se tornem incontroláveis [28]. Além disso, permite incluir fatores socioeconômicos e comportamentais, reconhecendo que a disseminação de doenças é influenciada por diversos fatores além dos biológicos [3]. Modelos que incorporam variáveis como desigualdade socioeconômica, acesso a serviços de saúde e comportamentos culturais oferecem uma visão mais holística da dinâmica das epidemias.

Os modelos SIR, SEIR, SIS, SIRS e MSEIR são relevantes na epidemiologia matemática, proporcionando estruturas específicas para entender e prever a propagação de doenças infecciosas [17]. Embora cada modelo tenha suas limitações, como a homogeneidade da população, ausência de migração e imunidade permanente ou temporária, a integração com outros modelos e técnicas de modelagem pode superar essas restrições [28]. A flexibilidade e capacidade de adaptação desses modelos garantem sua relevância contínua na análise e controle de doenças infecciosas.

A evolução dos modelos matemáticos e a integração com tecnologias avançadas asseguram que a modelagem epidemiológica continue a ser uma ferramenta essencial no combate às doenças infecciosas. Ao transformar dados complexos em informações acionáveis, esses modelos ajudam a proteger a saúde pública e a mitigar os impactos das epidemias [3]. Em suma, a modelagem matemática na epidemiologia facilita a compreensão e previsão de surtos de doenças, sendo crucial para a formulação de políticas de saúde pública baseadas em evidências, avaliação de intervenções e alocação de recursos [17]. A integração de modelos e técnicas avançadas de análise de dados promete melhorar ainda mais a eficácia dessas ferramentas na luta contra as doenças infecciosas.

Além disso, a ideia central deste trabalho foi unir um modelo SIR a um modelo para o mosquito *Aedes*, criando um modelo que prevê a dinâmica de transmissão da Chikungunya. Esse modelo híbrido permite uma análise mais precisa da interação entre a população humana e o vetor, capturando a complexidade da transmissão da doença e fornecendo insights valiosos para estratégias de controle. Essa união de modelos é explorada em detalhe no Capítulo 5, discutindo a formulação, implementação e aplicação prática desse modelo integrado.

Para resolver as equações diferenciais dos modelos matemáticos, podem ser empregados diversos métodos numéricos, cada um com suas particularidades e aplicações específicas.

4 APROXIMAÇÃO NUMÉRICA

Os métodos numéricos são úteis na resolução de equações diferenciais, especialmente quando as soluções analíticas não estão disponíveis ou são difíceis de obter. Em áreas como física, engenharia e epidemiologia, equações diferenciais são usadas para modelar fenômenos complexos. Embora a precisão absoluta seja raramente alcançada, um dos objetivos pode ser o de capturar as tendências e comportamentos dinâmicos dos sistemas, proporcionando uma compreensão qualitativa que auxilia na tomada de decisões e no desenvolvimento de estratégias, mesmo que os modelos não representem exatamente a realidade observada.

A resolução numérica de equações diferenciais permite modelar fenômenos que variam continuamente no tempo ou no espaço. Diferentemente dos métodos analíticos, que buscam soluções exatas, os métodos numéricos aproximam essas soluções por meio de cálculos iterativos. Isso é especialmente útil para modelos matemáticos altamente não lineares ou com condições de contorno complexas. Este capítulo focará nos métodos numéricos de Euler, Euler Modificado e Runge-Kutta de Quarta Ordem (RK4), que serão detalhadamente descritos em seções dedicadas.

4.1 MÉTODOS ANALÍTICOS

Os métodos analíticos buscam encontrar soluções exatas para equações diferenciais por meio de manipulações algébricas e integrações, resultando em expressões fechadas que descrevem o comportamento do sistema para quaisquer valores de tempo ou espaço. Entre os pontos fortes, destacam-se a precisão absoluta, a simplicidade de avaliação para qualquer valor das variáveis independentes e a compreensão profunda do comportamento do sistema, incluindo a análise de estabilidade e bifurcações [17].

No entanto, esses métodos têm limitações significativas: muitas equações diferenciais reais são altamente não lineares ou possuem condições de contorno complexas, tornando as soluções analíticas impraticáveis ou impossíveis de encontrar, sendo frequentemente limitados a problemas idealizados e simplificados [28]. Portanto, os métodos analíticos são mais adequados para problemas simples e idealizados, onde a solução exata é necessária para análise teórica e a compreensão completa do comportamento do sistema é crucial.

4.2 MÉTODOS NUMÉRICOS

Os métodos numéricos aproximam as soluções das equações diferenciais por meio de cálculos iterativos, sendo utilizados para resolver problemas difíceis ou impossíveis de tratar analiticamente. Seus pontos fortes incluem a flexibilidade, permitindo sua aplicação a uma ampla gama de problemas, incluindo equações não lineares e condições de contorno complexas; a escalabilidade, sendo adequados para problemas grandes e complexos que envolvem muitas variáveis; e a computação moderna, que se beneficia da capacidade de processamento dos computadores modernos para resolver problemas em tempo razoável (Burden, 2010) [12].

Contudo, os métodos numéricos também apresentam desafios, como erros de aproximação, que introduzem erros de truncamento e arredondamento que podem acumular e afetar a precisão; problemas de estabilidade, especialmente para passos de iterações grandes; e a complexidade computacional, exigindo muitos recursos computacionais, especialmente para problemas de grande escala (Boyce, 2012) [5].

Os métodos numéricos são mais indicados para problemas onde as soluções analíticas são impraticáveis ou inexistentes, na modelagem de sistemas reais complexos, e quando uma solução aproximada é suficiente para a análise e tomada de decisão.

Entre os diversos métodos numéricos desenvolvidos, destacam-se pela sua importância e aplicação os métodos de Euler, Euler Modificado e Runge-Kutta de Quarta Ordem (RK4). Cada um desses métodos oferece um equilíbrio diferente entre simplicidade, precisão e complexidade computacional, e são amplamente utilizados em simulações numéricas de equações diferenciais ordinárias (EDOs).

4.2.1 Método de Euler

O Método de Euler é um método numérico simples para resolver equações diferenciais ordinárias (EDOs). Desenvolvido por Leonhard Euler, ele aproxima a solução em passos sucessivos a partir da derivada da função, sendo útil para problemas de valor inicial.

Formulação Matemática

Considere uma EDO de primeira ordem [5]:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y), \quad y(t_0) = y_0.$$

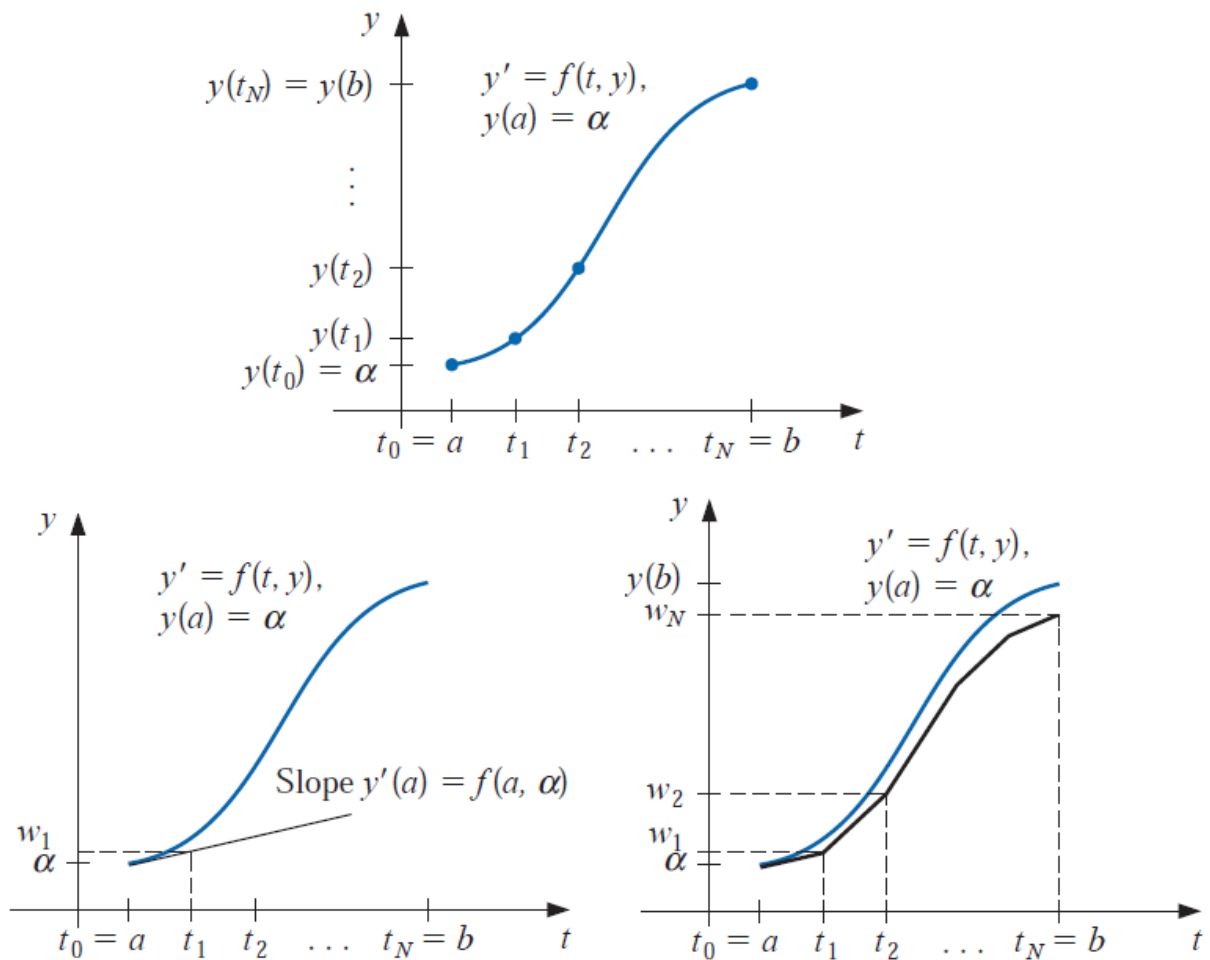
O Método de Euler aproxima a solução $y(t)$ nos pontos t_n e $t_{n+1} = t_n + h$, onde h é o passo de iteração, ou seja, é o intervalo de tempo ou espaço entre sucessivos pontos onde a solução numérica é calculada. Utilizando a fórmula:

$$y_{n+1} = y_n + hf(t_n, y_n).$$

Esta fórmula é derivada da série de Taylor de $y(t)$ em torno de $t = t_n$, negligenciando termos de ordem superior para h pequeno.

Interpretação Geométrica

Figura 10 – Interpretação Geométrica do Método de Euler



Fonte: Adaptado de Boyce e DiPrima (2012) [5]

A Figura 10 mostra que geometricamente o Método de Euler aproxima a solução de uma EDO por uma série de segmentos de reta que tangenciam a curva solução em pontos discretos. A inclinação da reta tangente é dada pela derivada $f(t, y)$, representando a taxa de variação da função y em relação a t no ponto (t_n, y_n) .

- Ponto Inicial: Condição inicial (t_0, y_0) .
- Cálculo da Derivada: Derivada $y' = f(t_n, y_n)$ no ponto (t_n, y_n) .

- Reta Tangente: Inclinação $f(t_n, y_n)$ para desenhar a reta tangente em (t_n, y_n) .
- Próximo Ponto: Avançamos ao longo da reta tangente por uma distância h para o ponto (t_{n+1}, y_{n+1}) .
- Repetição: Iteramos o processo para pontos sucessivos t_{n+2}, t_{n+3}, \dots

Análise de Erro

O erro no Método de Euler divide-se em erro local de truncamento e erro global.

Erro Local de Truncamento:

Refere-se ao erro introduzido em um único passo devido à aproximação discreta de derivadas [5]. No Método de Euler, é a diferença entre a solução exata e a obtida em um passo de iteração, causada pela omissão dos termos de ordem superior na expansão de Taylor.

Geometricamente, é a diferença entre a solução exata e a reta tangente usada na aproximação, crescendo quadraticamente com h . Esse erro, da ordem de $O(h^2)$, afeta a precisão e a eficiência do método. Conhecer sua ordem ajuda a escolher o passo h adequado para equilibrar precisão e custo computacional.

Erro Global:

O erro global [12], acumulado ao longo de múltiplos passos de iteração de um método numérico, representa a diferença entre a solução exata e a obtida após várias iterações. No Método de Euler, ele resulta da soma dos erros locais de truncamento e de arredondamento. Geometricamente, é a soma dos desvios entre a solução exata e a aproximação numérica em cada ponto de iteração.

A magnitude do erro global depende do tamanho do passo h e do número total de passos. No Método de Euler, o erro global é da ordem de $O(h)$. Compreender e gerenciar esse erro é essencial para garantir a precisão final da solução numérica, determinando a eficácia dos métodos numéricos na resolução de EDOs.

Estabilidade

A estabilidade na análise numérica garante que os erros em cada iteração não cresçam exponencialmente, mantendo a solução numérica próxima da exata. Para o Método de Euler, a estabilidade é analisada usando uma EDO linear:

$$\frac{dy}{dt} = \lambda y.$$

Para o Método de Euler aplicado a esta EDO, a fórmula iterativa é:

$$y_{n+1} = y_n(1 + h\lambda).$$

Para que o método seja estável, o fator $|1 + h\lambda|$ deve ser menor ou igual a 1:

$$|1 + h\lambda| \leq 1.$$

Isso garante que os erros não se amplifiquem exponencialmente. Se λ é negativo, a condição de estabilidade se torna:

$$h \leq \frac{2}{|\lambda|}.$$

A igualdade $|1 + h\lambda| = 1$ representa o limite da estabilidade, onde o método é marginalmente estável. Neste ponto, os erros não crescerão nem decairão exponencialmente.

A estabilidade é vital para garantir resultados numéricos confiáveis, especialmente em problemas rígidos com várias escalas de tempo. Métodos avançados, como Runge-Kutta, são preferidos por sua melhor estabilidade. Compreender a estabilidade é crucial para aplicar métodos numéricos eficazmente.

Vantagens, Desvantagens e Aplicações

Os estudos indicam que o Método de Euler, amplamente empregado em análise numérica, destaca-se por sua simplicidade de implementação. Todavia, é imprescindível avaliar suas características intrínsecas, tais como custo computacional, precisão, estabilidade e acúmulo de erros (local e global), a fim de determinar sua adequação à situação específica em que será aplicado. Em casos onde essas características não atendem aos requisitos necessários, pode ser necessário recorrer a métodos mais sofisticados, que envolvem etapas de cálculo adicionais [12].

4.2.2 Método de Euler Modificado

O Método de Euler Modificado [5], também conhecido como Método do Ponto Médio, adiciona etapas de cálculo ao Método de Euler simples. Foi desenvolvido para resolver equações diferenciais ordinárias (EDOs) com maior precisão e estabilidade. Este método considera a inclinação da solução não apenas no início do intervalo, mas também em um ponto intermediário, resultando em uma aproximação mais precisa da solução exata.

Historicamente, o Método de Euler Modificado surgiu para atender à necessidade de métodos numéricos mais precisos à medida que os problemas modelados por EDOs se

tornaram mais complexos [12]. Ao avaliar a inclinação no ponto médio, este método reduz o erro de truncamento e melhora a estabilidade, tornando-o adequado para uma ampla gama de aplicações.

Todavia, é fundamental reconhecer que tal precisão aumentada nem sempre é imperativa para todas as situações. Em muitos casos, a simplicidade e o menor custo computacional do Método de Euler simples podem ser mais vantajosos. Conseqüentemente, a seleção do método numérico mais apropriado deve ser orientada pelas exigências específicas do problema em questão, equilibrando-se entre precisão, estabilidade, eficiência computacional e, principalmente, as necessidades da situação a ser analisada.

Formulação Matemática

O Método de Euler Modificado aproxima os resultados ao considerar uma estimativa intermediária para a inclinação dentro de cada passo de iteração. A formulação matemática envolve os seguintes passos:

Dada uma equação diferencial ordinária de primeira ordem da forma:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y), \quad y(t_0) = y_0,$$

onde $y(t)$ é a solução da EDO, t é a variável independente, y é a variável dependente, $f(t, y)$ é uma função que define a taxa de variação de y em relação a t , e (t_0, y_0) é a condição inicial.

- Calcular uma Estimativa Preliminar

No primeiro passo, calcula-se uma estimativa preliminar y^* da solução no final do intervalo de iteração utilizando o Método de Euler simples. Esta estimativa é obtida pela fórmula:

$$y^* = y_n + hf(t_n, y_n),$$

onde y_n é a solução no ponto atual t_n , e h é o passo de iteração, ou seja, é o intervalo de tempo ou espaço entre sucessivos pontos onde a solução numérica é calculada.

- Calcular a Inclinação no Ponto Médio

Em seguida, utiliza-se a estimativa y^* para calcular a inclinação no ponto médio do intervalo de iteração. A inclinação no ponto médio é dada pela média das inclinações no início e no final do intervalo:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} [f(t_n, y_n) + f(t_n + h, y^*)].$$

Nesta fórmula, $f(t_n, y_n)$ é a inclinação no ponto inicial, e $f(t_n + h, y^*)$ é a inclinação no ponto final estimado. A média dessas duas inclinações resulta em uma aproximação mais precisa da inclinação ao longo do intervalo de iteração.

- Processo Iterativo

O processo descrito é repetido iterativamente de acordo com o valor adotado para h , avançando a solução de t_n para t_{n+1} . A cada passo, uma nova estimativa y^* é calculada, seguida pela atualização da solução y_{n+1} utilizando a média ponderada das inclinações.

Interpretação Geométrica

O Método de Euler Modificado oferece uma interpretação geométrica intuitiva que auxilia na compreensão de como se pode aumentar a precisão em relação ao Método de Euler simples. Para entender essa interpretação, consideremos como o método aproxima a solução da equação diferencial ao longo de cada intervalo de iteração.

No Método de Euler simples, a aproximação da solução é feita avançando a solução atual y_n com base na inclinação $f(t_n, y_n)$ no ponto inicial t_n . Isso pode ser visualizado como traçar uma linha reta tangente à curva solução da EDO a partir do ponto (t_n, y_n) até (t_{n+1}, y_{n+1}) . Contudo, essa abordagem pode ser imprecisa em intervalos de iteração $[t_n, t_{n+1}]$ com curvatura significativa.

O Método de Euler Modificado ajusta a aproximação ao considerar a inclinação em um ponto intermediário, especificamente no ponto médio do intervalo. Geometricamente, isso é representado por uma linha que considera a inclinação inicial e a inclinação estimada no ponto médio, resultando em uma linha tangente média que passa por esse ponto. Essa abordagem leva em conta a curvatura da solução dentro do intervalo.

A consideração da inclinação no ponto médio resulta em uma aproximação geométrica que pode seguir a curvatura real da solução de maneira mais precisa. Isso tende a reduzir o erro de truncamento, potencialmente melhorando a precisão da solução numérica e fornecendo uma representação detalhada da dinâmica do sistema modelado pela EDO.

Análise de Erro

O erro em métodos numéricos é uma medida que proporciona analisarmos sua precisão e eficácia. A seguir, apresentamos uma breve introdução a respeito dos erros local e global associados ao Método de Euler Modificado, ilustrando sua relevância e aplicação em problemas numéricos.

- Erro Local de Truncamento

O erro local de truncamento é o erro introduzido em um único passo de iteração. Para o Método de Euler Modificado, o erro local de truncamento é da ordem $O(h^3)$ [12]. Isso significa que a diferença entre a solução exata $y(t_{n+1})$ e a solução aproximada y_{n+1} após um único passo é proporcional ao cubo do tamanho do passo h . Esse é um avanço significativo em relação ao Método de Euler simples, cujo erro local de truncamento é da ordem $O(h^2)$.

A fórmula do erro local de truncamento pode ser expressa como:

$$|y(t_{n+1}) - y_{n+1}| \leq C \cdot h^p,$$

onde C é uma constante que depende da função f e de suas derivadas, e p é a ordem do erro.

- Erro Global

O erro global é a soma dos erros locais de truncamento ao longo de todos os passos de iteração. Para o Método de Euler Modificado, o erro global é da ordem $O(h^2)$ [5]. Isso indica que a precisão da solução numérica melhora quadraticamente à medida que o tamanho do passo h diminui. Em comparação, o erro global do Método de Euler simples é da ordem $O(h)$.

Uma forma global de representar o erro:

$$\max_{0 \leq n \leq N} |y(t_n) - y_n| \leq K \cdot h^q,$$

onde K é uma constante que depende da função f , de suas derivadas e do intervalo de iteração total, e q é a ordem do erro global.

A análise de erro auxilia na determinação da adequação de um método numérico para um problema específico. No caso do Método de Euler Modificado, a redução nos erros local e global pode contribuir para a precisão e estabilidade do método. Isso é particularmente útil em problemas que requerem precisão, como em simulações de sistemas dinâmicos complexos.

Ao reduzir o tamanho do passo h , o Método de Euler Modificado pode alcançar uma precisão muito maior sem o custo computacional excessivo de métodos mais complexos. No entanto, é importante balancear a precisão desejada com o custo computacional, uma vez que passos menores aumentam o número total de cálculos.

Estabilidade

Um método numérico é considerado estável se os erros não se amplificam exponencialmente ao longo dos passos de iteração [12]. A estabilidade do Método de Euler Modificado pode ser analisada considerando o comportamento do método em relação a uma EDO linear simples.

Para ilustrar a análise de estabilidade, consideremos a EDO linear:

$$\frac{dy}{dt} = \lambda y \quad , \text{ onde } \lambda \text{ é uma constante.}$$

A solução exata desta equação é:

$$y(t) = y_0 e^{\lambda t} \quad , \text{ onde } y_0 \text{ é a condição inicial.}$$

Ao aplicar o Método de Euler Modificado a esta equação, os passos são os seguintes:

- Estimativa Preliminar

$$y^* = y_n + h\lambda y_n = y_n(1 + h\lambda).$$

- Correção da Inclinação

$$y_{n+1} = y_n + \frac{h}{2} [\lambda y_n + \lambda y^*] = y_n + \frac{h}{2} [\lambda y_n + \lambda y_n(1 + h\lambda)] = y_n \left(1 + h\lambda + \frac{(h\lambda)^2}{2} \right).$$

Geometricamente, o fator de amplificação $1 + h\lambda + \frac{(h\lambda)^2}{2}$ deve ser menor ou igual a 1 para garantir a estabilidade do método. Isso impõe uma restrição sobre o tamanho do passo h em função do valor de λ .

- Condição de Estabilidade

Para que o Método de Euler Modificado seja estável, o fator de amplificação deve satisfazer a condição:

$$\left| 1 + h\lambda + \frac{(h\lambda)^2}{2} \right| \leq 1.$$

A análise dessa condição depende do valor de λ :

- Para $\lambda < 0$, a condição de estabilidade é mais facilmente satisfeita para valores pequenos de h .

- Para $\lambda > 0$, a condição de estabilidade se torna mais restritiva, exigindo passos de iteração menores para manter a estabilidade.

O Método de Euler Simples possui uma condição de estabilidade mais restritiva:

$$|1 + h\lambda| \leq 1.$$

Esta condição pode ser violada com certa frequência para determinados valores de λ , especialmente os grandes, o que resulta em instabilidade. O Método de Euler Modificado, ao considerar a inclinação no ponto médio, pode proporcionar uma estabilidade melhorada, permitindo o uso de passos de iteração ligeiramente maiores sem comprometer a estabilidade.

A estabilidade é particularmente importante em problemas onde há uma mistura de escalas de tempo rápidas e lentas. Nesses casos, buscar uma melhor estabilidade tende a evitar a necessidade de passos de iteração excessivamente pequenos, que aumentam o custo computacional.

Além disso, a estabilidade garante que as soluções numéricas não se desviem significativamente da solução exata ao longo do tempo, proporcionando resultados mais confiáveis em simulações de longo prazo.

Vantagens, Desvantagens e Aplicações

O Método de Euler Modificado oferece uma formulação relativamente simples de implementar e traduzir em códigos computacionais. A consideração da inclinação no ponto médio pode resultar em uma aproximação mais precisa em comparação com o Método de Euler simples. Este método tende a apresentar maior estabilidade, com o erro local de truncamento da ordem de $O(h^3)$ e o erro global da ordem de $O(h^2)$. Contudo, ele requer mais cálculos em cada passo de iteração, aumentando o custo computacional em relação ao Método de Euler simples. Suas aplicações são indicadas em situações onde a precisão adicional justifica o aumento do custo computacional, como na simulação de sistemas dinâmicos complexos e em problemas onde a estabilidade numérica é uma preocupação significativa [12], [5].

Método de Euler x Método de Euler Modificado

O Método de Euler Modificado utiliza uma média ponderada das inclinações no ponto inicial e no ponto médio, o que pode aumentar a precisão e a estabilidade em

comparação ao Método de Euler simples [12]. Essa abordagem pode ser mais adequada para aplicações que requerem maior precisão.

Como uma solução intermediária entre a simplicidade do Método de Euler e a complexidade dos métodos de Runge-Kutta, o método modificado oferece uma potencial melhoria na precisão.

Embora exija mais cálculos por passo de iteração, o que aumenta o custo computacional, a redução do erro local de truncamento e do erro global pode justificar seu uso em muitos problemas práticos de equações diferenciais ordinárias (EDOs).

Em resumo, o Método de Euler Modificado representa um avanço na solução de EDOs, proporcionando uma alternativa ao método simples, que pode ser vantajosa em algumas análises numéricas. No próximo tópico, discutiremos o Método de Runge-Kutta de Quarta Ordem (RK4), que implementa ainda mais etapas de cálculo na busca por resultados mais precisos.

4.2.3 Método de Runge-Kutta de Quarta Ordem

O Método de Runge-Kutta de Quarta Ordem [5], frequentemente abreviado como RK4, é um dos métodos numéricos mais amplamente utilizados para a solução de equações diferenciais ordinárias (EDOs). Este método é popular devido ao seu equilíbrio entre precisão e eficiência computacional. O RK4 proporciona uma aproximação precisa da solução de EDOs sem a necessidade de passos de iteração excessivamente pequenos, tornando-o ideal para uma ampla gama de aplicações em ciências, engenharia e modelagem matemática.

Desenvolvido no final do século XIX pelos matemáticos Carl Runge e Martin Wilhelm Kutta. A série de métodos de Runge-Kutta representa uma evolução significativa na análise numérica, permitindo a resolução eficiente de EDOs que eram difíceis de solucionar com métodos anteriores, como o de Euler.

Formulação Matemática

O RK4 utiliza quatro avaliações da função de derivada $f(t, y)$ para calcular a solução em cada passo de iteração [12]. A formulação matemática do método é a seguinte:

Dada a EDO de primeira ordem:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y), \quad y(t_0) = y_0$$

O próximo valor y_{n+1} é calculado a partir do valor atual y_n utilizando as seguintes etapas:

1. Calcular k_1 :

$$k_1 = hf(t_n, y_n)$$

2. Calcular k_2 :

$$k_2 = hf\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right)$$

3. Calcular k_3 :

$$k_3 = hf\left(t_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right)$$

4. Calcular k_4 :

$$k_4 = hf(t_n + h, y_n + k_3)$$

5. Atualizar y_{n+1} :

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

Aqui, h é o passo de iteração e k_1, k_2, k_3, k_4 são incrementos intermediários que consideram a inclinação da função em diferentes pontos dentro do intervalo $[t_n, t_{n+1}]$.

Interpretação Geométrica

Geometricamente, o RK4 pode ser entendido como uma média ponderada das inclinações da função em quatro pontos diferentes: no início do intervalo, em dois pontos intermediários (metade do passo de iteração) e no final do intervalo. Essa abordagem proporciona uma aproximação que captura melhor a curvatura da solução verdadeira da EDO ao longo do intervalo de iteração.

Análise de Erro

O RK4 possui um erro local de truncamento da ordem $O(h^5)$ e um erro global da ordem $O(h^4)$. Isso significa que a precisão da solução melhora significativamente com a diminuição do passo h . O erro local menor reduz a necessidade de passos muito pequenos para alcançar uma alta precisão, tornando o RK4 mais eficiente em termos de custo computacional.

Estabilidade

A estabilidade do Método de Runge-Kutta de Quarta Ordem (RK4) é geralmente melhor do que a de métodos de ordem inferior, como os métodos de Euler e Euler Modificado. A inclusão de múltiplas avaliações da inclinação em cada passo de iteração ajuda a suavizar variações bruscas e a manter a solução dentro de limites aceitáveis. No entanto, como todos os métodos numéricos explícitos, a escolha do passo de iteração h

é crucial para garantir a estabilidade. Embora o RK4 ofereça maior precisão, ele pode reduzir a região de estabilidade, exigindo passos de iteração menores para certos problemas. Os métodos implícitos, por outro lado, são incondicionalmente estáveis, mas geralmente requerem mais cálculos computacionais.

Vantagens, Desvantagens e Aplicações

Importante reforçar que embora métodos de alta ordem como o RK4 ofereçam benefícios em termos de precisão, eles também vêm com a desvantagem de uma região de estabilidade mais restrita, exigindo passos de iteração menores para manter a estabilidade, o que por sua vez, eleva o custo computacional.

Vantagens:

- **Alta Precisão:** A consideração de quatro pontos intermediários para calcular a inclinação geralmente proporciona uma solução muito precisa, especialmente quando o passo de iteração h é pequeno.
- **Eficiência Computacional:** Apesar de exigir mais cálculos por passo, o RK4 geralmente requer menos passos totais do que métodos de ordem inferior para alcançar a mesma precisão.
- **Estabilidade Controlada:** Melhor estabilidade em comparação com métodos de ordem inferior sob certas condições, como em problemas onde o passo de iteração pode ser mantido suficientemente pequeno.

Desvantagens:

- **Complexidade de Implementação:** Mais complexo de implementar em comparação com métodos de Euler.
- **Custo Computacional:** Cada passo de iteração é computacionalmente mais intenso devido às múltiplas avaliações da função. Além disso, a região de estabilidade do RK4 pode ser menor do que a de métodos de ordem inferior, exigindo passos menores para garantir estabilidade, o que pode aumentar o custo computacional.

Aplicações:

O RK4 é amplamente utilizado em diversas áreas, incluindo:

- **Modelagem Física e Engenharia:** Para simulações de sistemas mecânicos, elétricos e térmicos.
- **Biologia:** Em modelagem de populações e dinâmica de doenças.

- Financeiro: Para simulação de modelos econômicos e financeiros.
- Astrofísica e Cosmologia: Para resolver problemas em dinâmica de corpos celestes.

RK4 x Euler Modificado x Euler

Comparado ao Método de Euler simples e ao Método de Euler Modificado, o RK4 oferece precisão e estabilidade significativamente maiores. O Método de Euler simples calcula a inclinação em cada passo de iteração, utilizando a derivada da função no ponto atual. No entanto, a inclinação usada em cada passo é uma aproximação, exceto no primeiro passo, onde coincide com a inclinação da reta tangente à solução analítica. O Método de Euler Modificado utiliza uma média ponderada das inclinações no ponto inicial e no ponto médio. O RK4, por sua vez, calcula a inclinação em quatro pontos diferentes, proporcionando uma solução mais precisa e estável. Isso, porém, vem ao custo de uma maior complexidade de implementação e um maior custo computacional por passo. Em resumo, o RK4 é preferido em situações onde a precisão e a estabilidade são cruciais e os recursos computacionais permitem uma implementação mais complexa.

Em conclusão, o Método de Runge-Kutta de Quarta Ordem (RK4) é um método numérico poderoso e versátil para a solução de EDOs. Sua alta precisão e melhor estabilidade, aliadas a uma eficiência computacional razoável, o tornam a escolha preferida em muitas aplicações práticas. No entanto, neste trabalho, o Método de Euler foi escolhido como destaque após uma análise comparativa dos resultados obtidos com diferentes métodos. Observou-se que a diferença entre os resultados obtidos com o Método de Euler e os métodos de alta ordem, como o RK4, não foi significativa. As diferenças permaneceram em casas decimais na maioria dos casos e, em poucos resultados, houve algumas unidades de diferença. Portanto, considerou-se desnecessário utilizar métodos de alta ordem, pois, embora tenham alcançado uma maior precisão, essa precisão adicional não foi significativamente relevante para a situação analisada neste estudo.

5 MODELAGEM MATEMÁTICA DA CHIKUNGUNYA

Este capítulo apresenta um breve estudo de modelos matemáticos que foram usados para desenvolver um modelo aplicado à Chikungunya. Por meio de equações diferenciais, descrevemos as interações entre as populações de mosquitos vetores e humanos, analisando a influência de parâmetros epidemiológicos e ambientais na dinâmica da doença.

S - Pessoas suscetíveis à doença

I - Pessoas Infectadas

R - Pessoas Recuperadas ou removidas

A - Mosquitos na fase aquática

L - Mosquitos Fêmeas na fase alada

C - Mosquitos Fêmeas adultas contaminadas com o vírus

ϕ - Oviposição

ψ - Capacidade de suporte do meio

θ - Transmissão da doença (mosquito para pessoa)

ε - Transmissão da doença (pessoa para mosquito)

λ - Recuperação da doença (tornando-se imune)

γ - Passagem da fase aquática para a fase alada

μ - Mortalidades

α - Controle mecânico

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = -\theta SC \\ \frac{dI}{dt} = \theta SC - (\lambda + \mu_I)I \\ \frac{dR}{dt} = \lambda I + \mu_I I \\ \frac{dA}{dt} = \phi \left(1 - \frac{A}{\psi}\right) (L + C) - (\gamma + \mu_A + \alpha_A)A \\ \frac{dL}{dt} = \gamma A - \varepsilon LI - (\mu_L + \alpha_L)L \\ \frac{dC}{dt} = \varepsilon LI - (\mu_C + \alpha_C)C \end{array} \right. \quad (5.1)$$

O modelo (5.1) é o modelo CHIKV, um modelo matemático para estudar a dinâmica da doença Chikungunya no Brasil. A seguir, apresenta-se as bases adotadas para se chegar a estas equações.

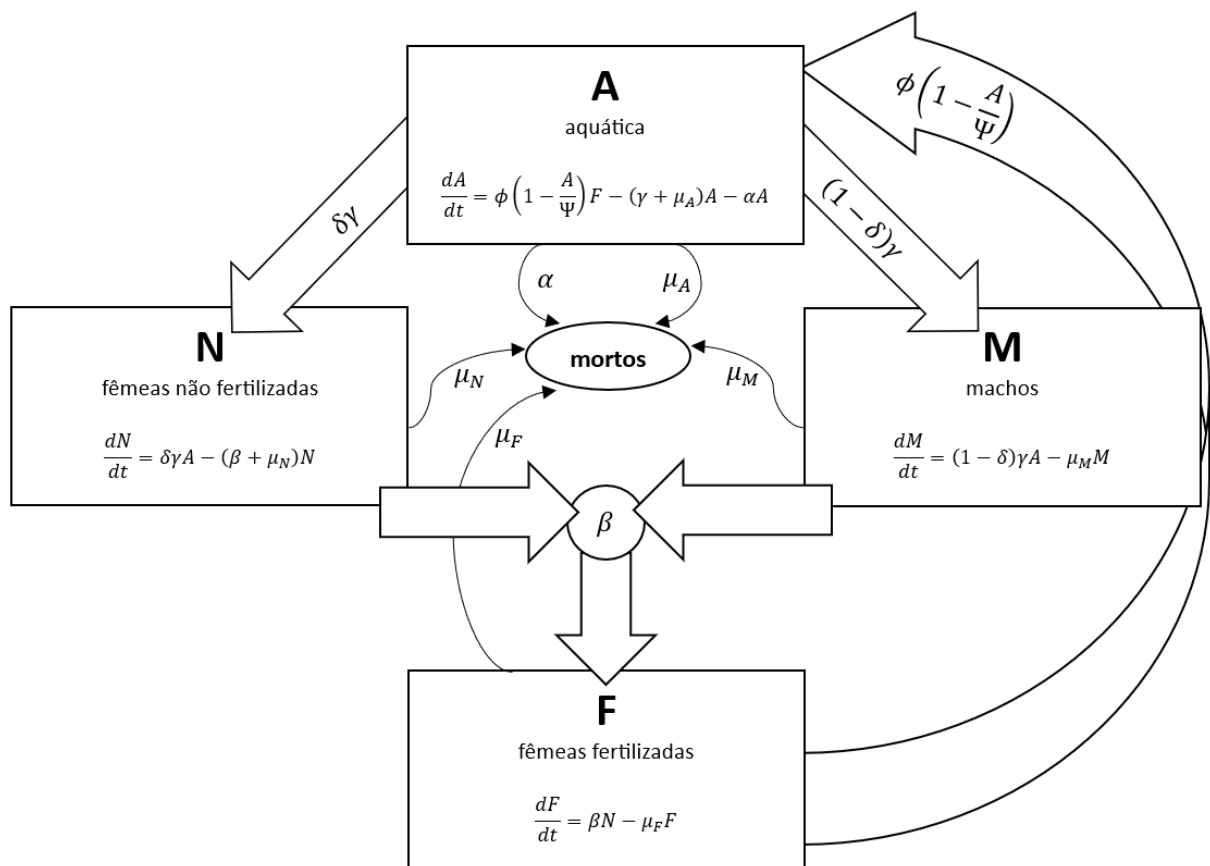
5.1 SIR - O MODELO MATEMÁTICO PARA A POPULAÇÃO DE PESSOAS

O modelo CHIKV incorporou um modelo SIR, para representar a dinâmica da população humana, o qual foi apresentado no Capítulo 3.

5.2 ANMF - O MODELO MATEMÁTICO PARA A POPULAÇÃO DE MOSQUITOS *Aedes Aegypti*

A seguir temos a descrição detalhada do modelo matemático ANMF, desenvolvido para descrever a dinâmica do mosquito *Aedes aegypti* e posteriormente ser acoplado com o modelo SIR.

Figura 11 – Modelo Compartimental ANMF



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 11 esta representando o modelo ANMF, uma adaptação do modelo apresentado por (Bernate, 2017) [2] com o propósito de descrever a dinâmica populacional do mosquito *Aedes aegypti* através de 4 compartimentos principais. Este modelo foi projetado com o intuito de ser integrado ao modelo SEIR, formando assim o modelo CHIKV, buscando modelar a dinâmica da transmissão da doença Chikungunya.

A transição entre os compartimentos deste modelo é regida por várias taxas, incluindo taxas de mortalidade natural e de controle mecânico aplicado na fase aquática.

5.2.1 Variáveis e Parâmetros

Variáveis

- A : População de mosquitos na fase aquática (ovo, larva, pupa)
- N : População de fêmeas adultas não-fertilizadas
- F : População de fêmeas adultas fertilizadas
- M : População de machos adultos

Parâmetros

- μ : Taxa de mortalidade
- ϕ : Taxa de oviposição
- ψ : Capacidade de suporte do meio
- γ : Taxa de passagem para a fase alada
- δ : Proporção de fêmeas
- $1 - \delta$: Proporção de machos
- β : Taxa de acasalamento
- α : Controle mecânico
- τ : Taxa de esquecimento de cuidados
- σ : Taxa de investimento de combate ao vetor

5.2.2 Equações Diferenciais

As equações que descrevem a dinâmica do modelo ANMF são as seguintes:

$$\begin{cases} \frac{dA}{dt} = \phi \left(1 - \frac{A}{\psi}\right) F - (\gamma + \mu_A + \alpha_A)A \\ \frac{dN}{dt} = \delta\gamma A - (\beta + \mu_N)N \\ \frac{dF}{dt} = \beta N - \mu_F F \\ \frac{dM}{dt} = (1 - \delta)\gamma A - \mu_M M \end{cases} \quad (5.2)$$

População Aquática (A)

$$\frac{dA}{dt} = \phi \left(1 - \frac{A}{\psi}\right) F - (\gamma + \mu_A + \alpha_A)A.$$

A variação da população aquática é determinada pela taxa de oviposição, capacidade de suporte do meio, taxa de passagem para a fase alada, taxa de mortalidade e controle mecânico.

Fêmeas Não-Fertilizadas (N)

$$\frac{dN}{dt} = \delta\gamma A - (\beta + \mu_N)N.$$

A população de fêmeas não-fertilizadas aumenta com a passagem da fase aquática para a fase alada e diminui com a taxa de acasalamento e mortalidade.

Fêmeas Fertilizadas (F)

$$\frac{dF}{dt} = \beta N - \mu_F F.$$

A população de fêmeas fertilizadas aumenta com a taxa de acasalamento e diminui com a mortalidade.

Machos (M)

$$\frac{dM}{dt} = (1 - \delta)\gamma A - \mu_M M.$$

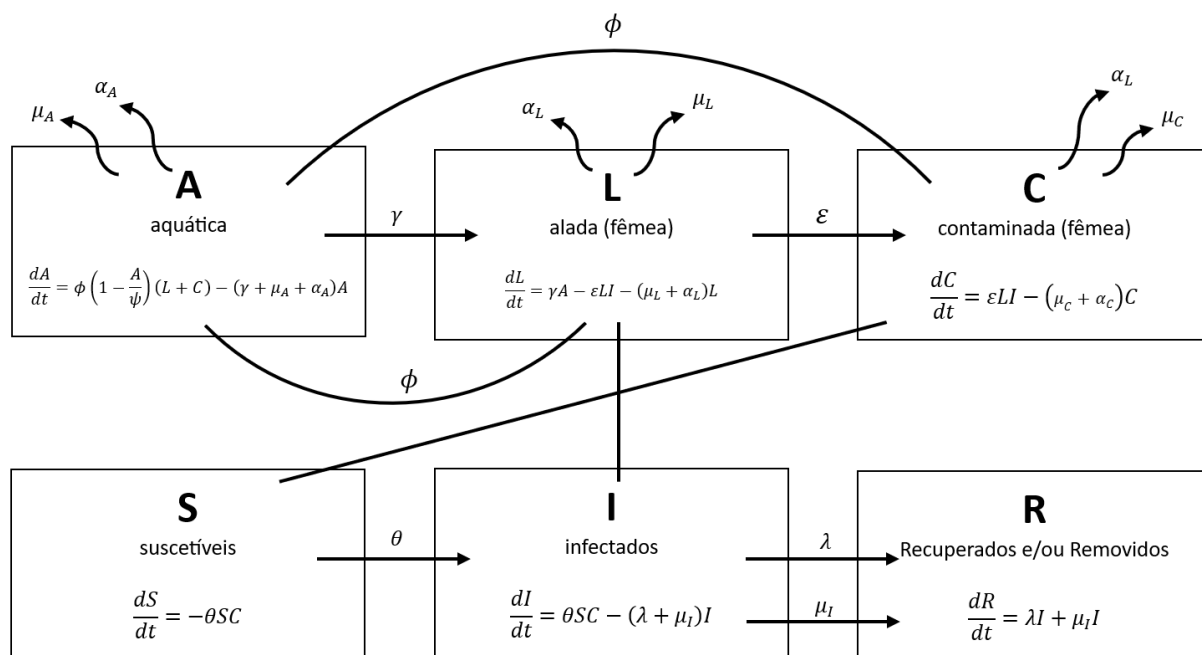
A população de machos aumenta com a passagem da fase aquática para a fase alada e diminui com a mortalidade.

5.3 CHIKV - MODELO MATEMÁTICO PARA A DOENÇA CHIKUNGUNYA

O modelo matemático proposto é um sistema de equações diferenciais que busca descrever a dinâmica da doença Chikungunya - transmitida por mosquitos, incorporando tanto a população humana SIR (suscetíveis, infectados e recuperados) quanto a população de mosquitos ALC (fase aquática, mosquitos fêmeas aladas, e mosquitos fêmeas contaminadas). Esta abordagem compartimental permite uma descrição detalhada das interações entre humanos e mosquitos, bem como a propagação da doença.

Ao acoplar os modelos SEIR e ANMF, chegamos a um modelo matemático de 6 compartimentos: ALCSIR. A Figura 12 representa a dinâmica entres esses compartimentos.

Figura 12 – O Modelo Compartimental CHIKV - Para a doença Chikungunya



Fonte: Elaborado pelo autor

Variáveis e Parâmetros

Variáveis:

- S : Pessoas suscetíveis à doença Chikungunya
- I : Pessoas infectadas pelo vírus CHIKV
- R : Pessoas recuperadas ou removidas

- A : Mosquitos na fase aquática
- L : Mosquitos fêmeas na fase alada, não contaminadas com a Chikungunya
- C : Mosquitos fêmeas adultas contaminadas com o vírus CHIKV

Parâmetros:

- ϕ : Oviposição (postura de ovos)
- ψ : Capacidade de suporte do meio para os mosquitos na fase aquática
- θ : Transmissão da doença de mosquitos para pessoas
- ε : Transmissão da doença de pessoas para mosquitos
- λ : Recuperação da doença em humanos
- γ : Transição da fase aquática para a fase alada dos mosquitos
- μ : Mortalidade específica para cada compartimento
- α : Controle mecânico específico para cada compartimento dos mosquitos

Equações Diferenciais

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\theta SC \\ \frac{dI}{dt} = \theta SC - (\lambda + \mu_I)I \\ \frac{dR}{dt} = \lambda I + \mu_I I \\ \frac{dA}{dt} = \phi \left(1 - \frac{A}{\psi}\right) (L + C) - (\gamma + \mu_A + \alpha_A)A \\ \frac{dL}{dt} = \gamma A - \varepsilon LI - (\mu_L + \alpha_L)L \\ \frac{dC}{dt} = \varepsilon LI - (\mu_C + \alpha_C)C \end{cases} \quad (5.3)$$

População Suscetível (S)

$$\frac{dS}{dt} = -\theta SC.$$

A variação da população suscetível é determinada pela transmissão da doença de mosquitos contaminados para humanos suscetíveis.

População Infectada (I)

$$\frac{dI}{dt} = \theta SC - (\lambda + \mu_I)I.$$

A população infectada aumenta pela infecção de suscetíveis e diminui pela recuperação (λ) e mortalidade (μ_I).

População Recuperada (R)

$$\frac{dR}{dt} = \lambda I + \mu_I I.$$

A população recuperada aumenta pela recuperação dos infectados e pela mortalidade dos infectados que são removidos do sistema (assumindo imunidade após recuperação).

Mosquitos na Fase Aquática (A)

$$\frac{dA}{dt} = \phi \left(1 - \frac{A}{\psi}\right) (L + C) - (\gamma + \mu_A + \alpha_A)A.$$

A dinâmica dos mosquitos na fase aquática depende da oviposição (ϕ), da capacidade de suporte (ψ), e da transição para a fase alada (γ), mortalidade (μ_A), e controle mecânico (α_A).

Mosquitos Fêmeas na Fase Alada (L)

$$\frac{dL}{dt} = \gamma A - \varepsilon LI - (\mu_L + \alpha_L)L.$$

A dinâmica dos mosquitos fêmeas na fase alada é determinada pela transição da fase aquática (γ), infecção pelos humanos (ε), mortalidade (μ_L), e controle mecânico (α_L).

Mosquitos Fêmeas Adultas Contaminadas (C)

$$\frac{dC}{dt} = \varepsilon LI - (\mu_C + \alpha_C)C.$$

A população de mosquitos contaminados aumenta pela infecção de mosquitos fêmeas aladas (ε) e diminui pela mortalidade (μ_C) e controle mecânico (α_C).

5.3.1 Considerações

O modelo buscou acoplar de forma coerente as dinâmicas das populações humanas e de mosquitos, capturando as principais interações e vias de transmissão do patógeno. Uma característica importante do modelo é a inclusão da capacidade de suporte do meio ambiente para os mosquitos na fase aquática, que limita o crescimento exponencial da população de mosquitos.

Além disso, os valores de transmissão (θ e ε) e os de controle (α) são essenciais para modelar a eficácia de intervenções e a propagação da doença. Diferenciar as taxas de mortalidade (μ) para cada compartimento específico (humanos infectados, mosquitos na fase aquática e mosquitos alados) permite buscar uma modelagem mais realista da dinâmica populacional.

No próximo capítulo, iremos discutir a formulação dos valores de cada um dos parâmetros do modelo a partir de dados empíricos ou literatura científica. Uma comparação entre os resultados do modelo e os resultados reais também será abordada, além de diferentes cenários simulados a fim de buscar uma maior compreensão da Chikungunya e aperfeiçoamento dos parâmetros do modelo.

6 CENÁRIOS E SIMULAÇÕES

Este estudo, fundamentado em pesquisas abrangentes de diversas fontes acadêmicas e governamentais previamente citadas, desenvolveu o seguinte modelo matemático com o objetivo de aprimorar a compreensão da dinâmica de transmissão da Chikungunya.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS}{dt} = -\theta SC \\ \frac{dI}{dt} = \theta SC - (\lambda + \mu_I)I \\ \frac{dR}{dt} = \lambda I + \mu_I I \\ \frac{dA}{dt} = \phi \left(1 - \frac{A}{\psi}\right) (L + C) - (\gamma + \mu_A + \alpha_A)A \\ \frac{dL}{dt} = \gamma A - \varepsilon LI - (\mu_L + \alpha_L)L \\ \frac{dC}{dt} = \varepsilon LI - (\mu_C + \alpha_C)C \end{array} \right. \quad (6.1)$$

- S : Pessoas suscetíveis à doença Chikungunya
- I : Pessoas infectadas pelo vírus CHIKV
- R : Pessoas recuperadas ou removidas
- A : Mosquitos na fase aquática
- L : Mosquitos fêmeas na fase alada, não contaminadas com a Chikungunya
- C : Mosquitos fêmeas adultas contaminadas com o vírus CHIKV
- ϕ : Oviposição (postura de ovos)
- ψ : Capacidade de suporte do meio para os mosquitos na fase aquática
- θ : Transmissão da doença de mosquitos para pessoas
- ε : Transmissão da doença de pessoas para mosquitos
- λ : Recuperação da doença em humanos
- γ : Transição da fase aquática para a fase alada dos mosquitos
- μ : Mortalidades específicas para cada compartimento
- α : Controle mecânico específico para cada compartimento dos mosquitos

Este modelo contempla algumas das interações complexas entre as populações humanas e de mosquitos, permitindo uma análise detalhada dos fatores que influenciam a disseminação da doença.

6.1 DETERMINAÇÃO DOS VALORES INICIAIS PARA CADA PARÂMETRO

***S*: Pessoas Suscetíveis à Doença Chikungunya**

Este compartimento representa a população de indivíduos que ainda não foram infectados pelo vírus CHIKV, mas que estão em risco de infecção.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [21], a população do Brasil cresceu 6,5% entre os anos de 2010 e 2022. Este crescimento corresponde a uma taxa anual média de aproximadamente 0,54%. Portanto, assumindo que a taxa de crescimento populacional anual permaneça constante, a população do Brasil em 2024 pode ser estimada em aproximadamente 205,3 milhões de habitantes.

Para estabelecer o valor inicial de S , é importante considerar que neste grupo não podem estar os indivíduos que já contraíram a Chikungunya e portanto são imunes à doença. Um artigo publicado em *The Lancet Microbe* [35] levantou que até 2022 o Brasil teve um total acumulado de 253.545 casos de Chikungunya confirmados laboratorialmente. Levando em consideração que o artigo relaciona apenas os casos confirmados laboratorialmente, estima-se que o total de pessoas que já tiveram a doença no Brasil, seja aproximadamente 500.000.

Com essas informações, o modelo matemático contará com o valor inicial de S em 204,8 milhões.

***I*: Pessoas Infectadas pelo Vírus CHIKV**

Este compartimento inclui os indivíduos que foram infectados e são capazes de transmitir a doença a outros suscetíveis.

De acordo com o Ministério da Saúde [10], as duas últimas semanas de 2023 registraram, respectivamente, 2.696 e 1.901 casos de Chikungunya. Portanto, considerando esses dados, podemos estimar que o ano de 2024 iniciou com aproximadamente 4.597 pessoas infectadas pelo vírus CHIKV.

***R*: Pessoas Recuperadas ou Removidas**

Este compartimento representa os indivíduos que se recuperaram da infecção e adquiriram imunidade, ou que foram removidos da população por motivos de mortalidade.

Vamos convencionar que este compartimento inicia zerado.

L: Mosquitos Fêmeas na Fase Alada, não Contaminadas com a Chikungunya

Este compartimento inclui as fêmeas adultas de mosquitos que não estão infectadas pelo vírus CHIKV.

Para estabelecer uma estimativa da população de *Aedes aegypti* no Brasil, utilizamos os dados de Bezerra (2010) [4]. Sua pesquisa fornece informações detalhadas sobre a densidade populacional dos mosquitos em uma amostra representativa. De acordo com os dados coletados, 65% dos mosquitos alados são fêmeas. A análise incluiu 272 imóveis, onde foram coletados 563 mosquitos, gerando uma média aproximada de 2,07 mosquitos por residência, destes 1,35 são fêmeas.

Para expandir esses dados a nível nacional, consideramos o total de domicílios no Brasil conforme o censo de 2022 [26].

- Total de domicílios no Brasil: 72.456.638.
- Estimativa total de mosquitos no Brasil: 149.985.241.
- Estimativa total de fêmeas no Brasil: 97.816.461.

Desta forma, estamos considerando os seguintes valores iniciais aproximados

$$L_0 + C_0 = 100.000.000 \text{ (estimativa ajustada para as fêmeas na fase alada).}$$

$$L_0 = 60.000.000$$

C: Mosquitos Fêmeas Adultas Contaminadas com o Vírus CHIKV

Este compartimento representa as fêmeas adultas de mosquitos que estão infectadas e são capazes de transmitir o vírus CHIKV.

Quantidade estimada no tópico anterior.

$$L_0 + C_0 = 100.000.000 \text{ (estimativa ajustada para as fêmeas na fase alada).}$$

$$C_0 = 40.000.000$$

Justificativa dos Valores Iniciais de L e C

Os valores iniciais de $L_0 = 60.000.000$ e $C_0 = 40.000.000$ foram escolhidos como estimativas preliminares para iniciar os cálculos do modelo. Esta abordagem permite ajustar os parâmetros à medida que os resultados são analisados, refletindo a dinâmica observada na população. Embora a escolha inicial desses valores não tenha uma justificativa empírica rigorosa, foi baseada na necessidade de iniciar a simulação

com dados razoáveis, que poderiam ser refinados posteriormente com base nos resultados obtidos e nas características observadas da população de mosquitos.

A: Mosquitos na Fase Aquática

Este compartimento abrange todas as fases aquáticas dos mosquitos, incluindo ovos, larvas e pupas.

De acordo com Oliveira (2022) [30], a taxa de mortalidade natural na fase aquática é de aproximadamente 29%. Com base nessa taxa, podemos estimar que no Brasil há aproximadamente $\frac{149.985.241}{0,71} \approx 211.246.818$ mosquitos na fase aquática.

Portanto, consideramos a estimativa ajustada para a fase aquática como $A_0 = 212.000.000$.

ϕ : Oviposição (Postura de Ovos)

Este parâmetro representa a taxa de postura de ovos pelas fêmeas de mosquitos.

De acordo com Lima (2017) [23], o ciclo gonotrófico do mosquito *Aedes aegypti*, que é o intervalo entre a alimentação sanguínea e a oviposição, varia de 2 a 8 dias. Durante cada ciclo, as fêmeas do mosquito depositam entre 100 e 200 ovos. Considerando que uma fêmea pode completar entre 4 e 6 ciclos gonotróficos ao longo de sua vida útil, que é em média de 5 semanas, podemos então estimar que a quantidade total de ovos que um mosquito é capaz de produzir durante sua vida está entre 400 e 1200 ovos.

Para obter uma estimativa da oviposição semanal, calculamos a média dos valores mínimos e máximos de ovos produzidos ao longo da vida do mosquito:

$$\frac{(100 \times 4) + (200 \times 6)}{2} = \frac{400 + 1200}{2} = \frac{1600}{2} = 800 \text{ ovos}$$

Com uma expectativa de vida média de 5 semanas, a oviposição semanal pode ser estimada dividindo a média de ovos pelo número de semanas de vida do mosquito:

$$\phi = \frac{800}{5} = 160 \text{ ovos por semana}$$

Portanto, estima-se que a oviposição semanal de uma fêmea de *Aedes aegypti* seja de aproximadamente 160 ovos.

ψ : Capacidade de Suporte do Meio para os Mosquitos na Fase Aquática

Este parâmetro limita o crescimento da população de mosquitos na fase aquática, refletindo a capacidade máxima do meio ambiente para suportar essas fases.

Apesar das extensas pesquisas realizadas, não foi possível obter dados suficientes para uma estimativa calculada precisa. Dessa forma, baseamo-nos nas informações estudadas e definimos um valor inicial, para ser ajustado posteriormente durante a calibração do modelo.

θ : Transmissão da Doença de Mosquitos para Pessoas

Este parâmetro representa a taxa de transmissão do vírus CHIKV dos mosquitos infectados para os humanos suscetíveis.

Para estimar θ , seguimos o seguinte raciocínio:

$$\frac{dS}{dt} = -\theta SC$$

Aplicamos nesta equação a média de infectados das 13 primeiras semanas, que é de aproximadamente 11.729. Consideramos $S = 204.800.000$ e $C = 40.000$.

$$-11.729 = -\theta \cdot 204.800.000 \cdot 40.000$$

$$\theta = \frac{11.729}{204.800.000 \cdot 40.000} \approx 1,43 \times 10^{-9}$$

ε : Transmissão da Doença de Pessoas para Mosquitos

Este parâmetro indica a taxa de transmissão do vírus CHIKV de humanos infectados para mosquitos suscetíveis.

Este parâmetro será ajustado durante a calibração do modelo.

λ : Recuperação da Doença em Humanos

Este parâmetro representa a taxa de recuperação dos humanos infectados, que se movem para o compartimento dos recuperados.

O tempo médio de recuperação da doença é de aproximadamente 10 dias. Portanto:

$$\lambda_{\text{diário}} = \frac{1}{10}$$

$$\lambda_{\text{semanal}} = \left(\frac{1}{10}\right) \times 7 = \frac{7}{10} = 0,7$$

γ : Transição da Fase Aquática para a Fase Alada dos Mosquitos

Este parâmetro indica a taxa na qual os mosquitos passam da fase aquática para a fase alada.

γ : Passagem da Fase Aquática para a Fase Alada

Este parâmetro representa a taxa de transição dos mosquitos da fase aquática para a fase alada.

O tempo médio para que os mosquitos *Aedes aegypti* completem essa transição é de aproximadamente 20 dias [30]. Portanto:

$$\gamma_{\text{diário}} = \frac{1}{20}$$

$$\gamma_{\text{semanal}} = \left(\frac{1}{20}\right) \times 7 = \frac{7}{20} = 0,35$$

Portanto, γ é aproximadamente 0,35 por semana.

 μ : Mortalidades Específicas para cada Compartimento

Este parâmetro representa as taxas de mortalidade específicas para cada compartimento, incluindo humanos infectados e diferentes fases dos mosquitos.

 μ_I Mortalidade dos Infectados

Considerando os dados atuais fornecidos pelo Ministério da Saúde em seu informe semanal nº 17 [9] com 206.055 casos prováveis, 115 óbitos confirmados e 125 óbitos em investigação, temos:

$$\text{Total de óbitos} = 115 + 125 = 240$$

$$\mu_I = \frac{240}{206055} \approx 0,001165$$

Portanto, a taxa de mortalidade semanal na fase infecciosa é aproximadamente 0,001165.

 μ_A Mortalidade na fase aquática

A expectativa de vida na fase aquática dos mosquitos é de aproximadamente 21 dias [30].

Primeiro, determinamos a taxa de mortalidade diária (μ_A) com base na expectativa de vida:

$$\mu_{A,\text{diário}} = \frac{1}{21}$$

$$\mu_{A,\text{semanal}} = \left(\frac{1}{21}\right) \times 7 = \frac{7}{21} = \frac{1}{3} \approx 0,333$$

μ_A Mortalidade dos Mosquitos na Fase Adulta

$$\mu_L = \mu_C$$

O tempo médio de vida do *Aedes aegypti* na fase adulta é de aproximadamente 35 dias.

$$\mu_{L\text{diário}} = \frac{1}{35}$$

$$\mu_{L\text{semanal}} = \left(\frac{1}{35}\right) \times 7 = \frac{7}{35} = 0,2$$

Portanto, μ_L é aproximadamente 0,2 por semana.

α : Controle Mecânico Específico para cada Compartimento dos Mosquitos

Este parâmetro descreve a eficácia das medidas de controle mecânico aplicadas a diferentes compartimentos dos mosquitos, como a remoção de criadouros.

As taxas de controle serão usadas como teste nas simulações de cenários.

6.2 PARÂMETROS INICIAIS

- S : Pessoas suscetíveis à doença Chikungunya

$$S = 204,8 \text{ milhões}$$

- I : Pessoas infectadas pelo vírus CHIKV

$$I = 4.597$$

- R : Pessoas recuperadas ou removidas

$$R = 0$$

- L : Mosquitos fêmeas na fase alada, não contaminadas com a Chikungunya

$$L = 60.000$$

- C : Mosquitos fêmeas adultas contaminadas com o vírus CHIKV

$$C = 40.000$$

- A : Mosquitos na fase aquática

$$A = 212.000.000$$

- ϕ : Oviposição (postura de ovos)

$$\phi = 160 \text{ ovos por semana}$$

- ψ : Capacidade de suporte do meio para os mosquitos na fase aquática

$$\psi = 250.000.000$$

- θ : Transmissão da doença de mosquitos para pessoas

$$\theta = 1.43 \times 10^{-9}$$

- ε : Transmissão da doença de pessoas para mosquitos

$$\varepsilon = 1 \times 10^{-10}$$

- λ : Recuperação da doença em humanos

$$\gamma = \left(\frac{1}{10}\right) \times 7$$

- γ : Transição da fase aquática para a fase alada dos mosquitos

$$\gamma = \left(\frac{1}{20}\right) \times 7$$

- μ : Mortalidades específicas para cada compartimento

μ_I : Mortalidade dos Infectados $\mu_I = 0.001165$ (semanal) μ_A : Mortalidade na fase aquática $\mu_A = 0.333$ (semanal) μ_L : Mortalidade dos mosquitos na fase alada

$$\mu_L = \left(\frac{1}{35}\right) \times 7$$

- α : Controle mecânico específico para cada compartimento dos mosquitos

$$\alpha_A = 0 \quad \alpha_L = 0 \quad \alpha_C = 0$$

6.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Todos os resultados dos cálculos apresentados nesta seção foram realizados utilizando o Método de Euler, implementados através da linguagem de programação Python [34].

Python foi escolhido por sua facilidade de compreensão para cálculos matemáticos e por permitir a implementação rápida e eficiente de métodos numéricos. A linguagem não só oferece uma curva de aprendizado amigável para iniciantes, mas também é poderosa o suficiente para lidar com tarefas computacionais intensivas. A flexibilidade do Python permite que pesquisadores ajustem e expandam seus modelos conforme necessário, sem a necessidade de reescrever grandes partes do código. Isso é particularmente vantajoso em estudos dinâmicos, onde os parâmetros podem mudar frequentemente com base em novos dados ou desenvolvimentos teóricos.

Além disso, Python oferece robustas bibliotecas científicas, como NumPy e SciPy, que facilitam a execução de operações matemáticas complexas. A linguagem também possibilita a geração de tabelas e gráficos, o que facilita consideravelmente a análise dos resultados e a calibração do modelo.

O Método de Euler foi selecionado para este estudo devido à sua simplicidade e eficácia na obtenção de resultados iniciais. Embora métodos de ordem superior, como o Runge-Kutta, ofereçam maior precisão, a diferença nos resultados obtidos com o Método de Euler foi mínima para a maioria dos casos analisados, sendo suficiente para os objetivos deste trabalho.

A implementação dos algoritmos necessários para as simulações foi feita de maneira a garantir precisão e eficiência computacional. Utilizando Python, foi possível desenvolver código claro e conciso, permitindo a fácil reprodução e verificação dos resultados. A capacidade de Python de integrar diversas ferramentas e bibliotecas especializadas foi essencial para a execução das análises numéricas necessárias para este estudo.

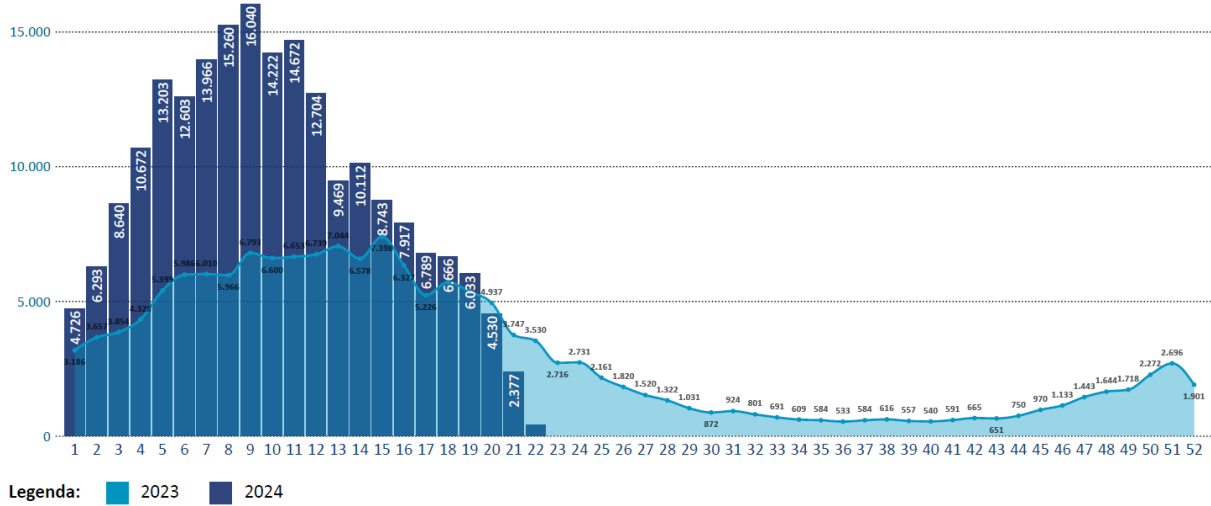
Portanto, o uso do Método de Euler, aliado à robustez e simplicidade da linguagem Python, proporcionou uma base sólida para a realização dos cálculos das simulações e análises, assegurando a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos ao longo deste trabalho.

6.3.1 Dados do Brasil

A Figura 13 ilustra o gráfico dos casos reportados de Chikungunya no Brasil, abrangendo todo o ano de 2023 e as primeiras 22 semanas de 2024. É crucial salientar que esses valores são dinâmicos, uma vez que há um intervalo temporal entre a coleta dos dados e sua subsequente compilação. Observa-se um aumento significativo de casos

no início de 2024 em comparação ao mesmo período de 2023. Além disso, a análise dos gráficos revela padrões sazonais distintos, com picos de incidência ocorrendo em períodos específicos do ano.

Figura 13 – Casos de Chikungunya no Brasil



Fonte: Brasil - Ministério da Saúde [9]

O objetivo central da calibração dos parâmetros consistiu em aproximar a curva gerada pelo modelo CHIKV aos dados observados nos três primeiros meses deste ano. Assim, com os parâmetros devidamente ajustados para refletir a realidade dos casos, realizar simulações de cenários hipotéticos, incorporando diferentes parâmetros de controle.

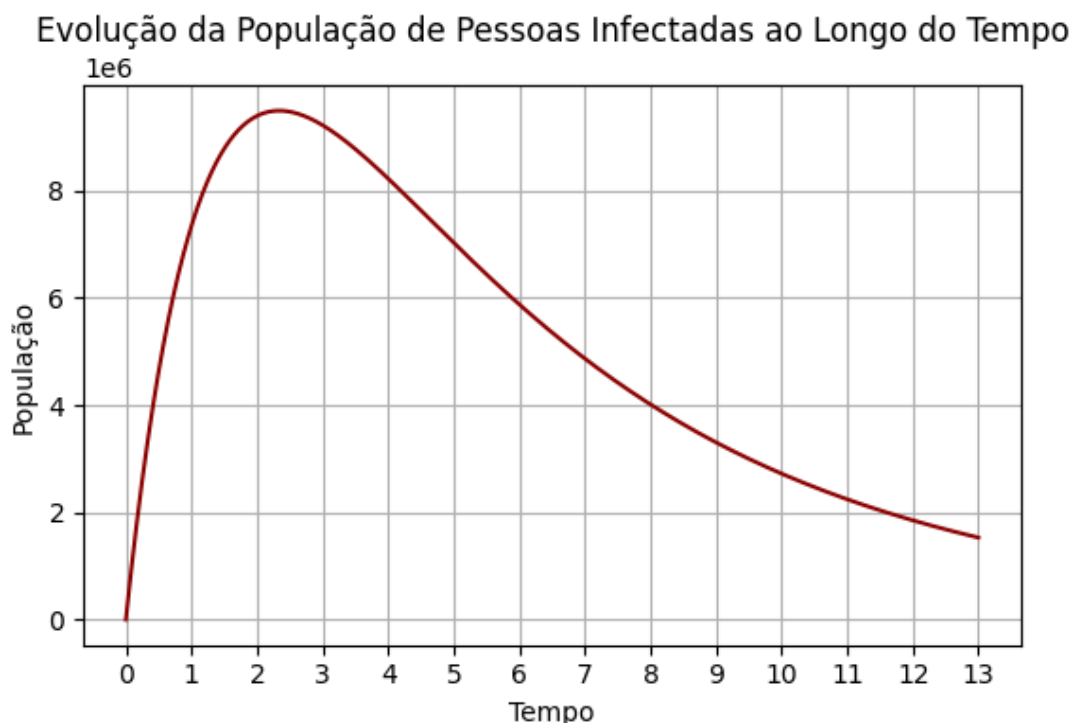
6.3.2 O Primeiro Resultado Gerado pelo Modelo CHIKV

Este é o primeiro resultado gerado pelo modelo CHIKV utilizando os dados que foram obtidos na Seção 6.1, com a maioria dos parâmetros gerados através de pesquisas em fontes acadêmicas e governamentais.

Valores dos Parâmetros - Figura 14

$$\begin{aligned}
 S_0 &= 204.8 \times 10^6 & \psi &= 250.000.000 & \mu_A &= \left(\frac{1}{21}\right) \times 7 \\
 I_0 &= 4.597 & \theta &= 1.43 \times 10^{-9} & \mu_L &= \left(\frac{1}{35}\right) \times 7 \\
 R_0 &= 0 & \varepsilon &= 1 \times 10^{-10} & \mu_C &= \mu_L \\
 A_0 &= 212.000.000 & \lambda &= \left(\frac{1}{10}\right) \times 7 & \alpha_A &= 0 \\
 L_0 &= 60.000.000 & \gamma &= \left(\frac{1}{20}\right) \times 7 & \alpha_L &= 0 \\
 C_0 &= 40.000.000 & \mu_I &= 0,001165 & \alpha_C &= \alpha_L \\
 \phi &= \frac{800}{5} & & & &
 \end{aligned}$$

Figura 14 – Primeiro Resultado



Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

Como visto na Figura 14 o primeiro resultado gerou um pico de infectados próximo a 9,4 milhões, o que está significativamente distante do valor apresentado pelo Ministério da Saúde (MS), que é de 16.040. Além disso, observa-se que o ponto máximo da curva também está deslocado em relação ao valor real, que ocorre na 9ª semana epidemiológica. No entanto, a curva decresce após esse pico, o que de certa forma equivale ao comportamento observado no gráfico do Ministério da Saúde (MS).

Resultados dos Parâmetros θ e ε

Seguem os resultados da tentativa de ajustar o pico da curva. Para tal, foram ajustados apenas dois parâmetros, enquanto todos os demais valores foram mantidos inalterados.

Valores dos Parâmetros - Figura 15

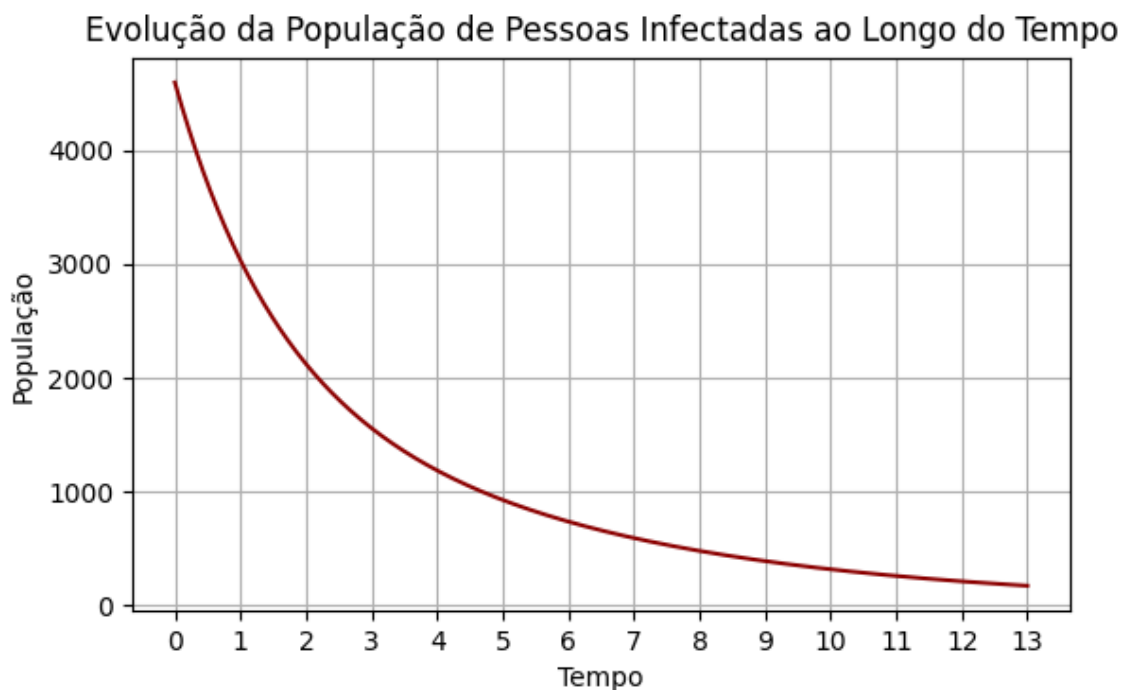
$$\theta = 1,43 \times 10^{-12}$$

$$\varepsilon = 1 \times 10^{-13}$$

A Figura 15 apresenta um êxito no objetivo de aproximar o ponto máximo dos infectados para mais próximo do valor real, alcançando um pico de aproximadamente 11.000 infectados. No entanto, não foi possível deslocar o pico da semana 2 para a semana 9.

Figura 15 – Alterando θ e ε - 1º resultado

Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

Figura 16 – Alterando θ e ε - 2º resultado

Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

Valores dos Parâmetros - Figura 16

$$\theta = 1,43 \times 10^{-13}$$

$$\varepsilon = 1 \times 10^{-14}$$

A Figura 16 revela um aspecto interessante. Ao acrescentar apenas mais uma casa decimal nos parâmetros θ e ε , observou-se uma mudança significativa na curva de infectados, transformando-a em uma curva predominantemente decrescente, partindo do valor inicial de infectados.

Valores dos Parâmetros - Figura 17

$$\theta = 1,43 \times 10^{-13}$$

$$\varepsilon = 1 \times 10^{-13}$$

Figura 17 – Alterando θ e ε - 3º resultado



Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

Valores dos Parâmetros - Figura 18

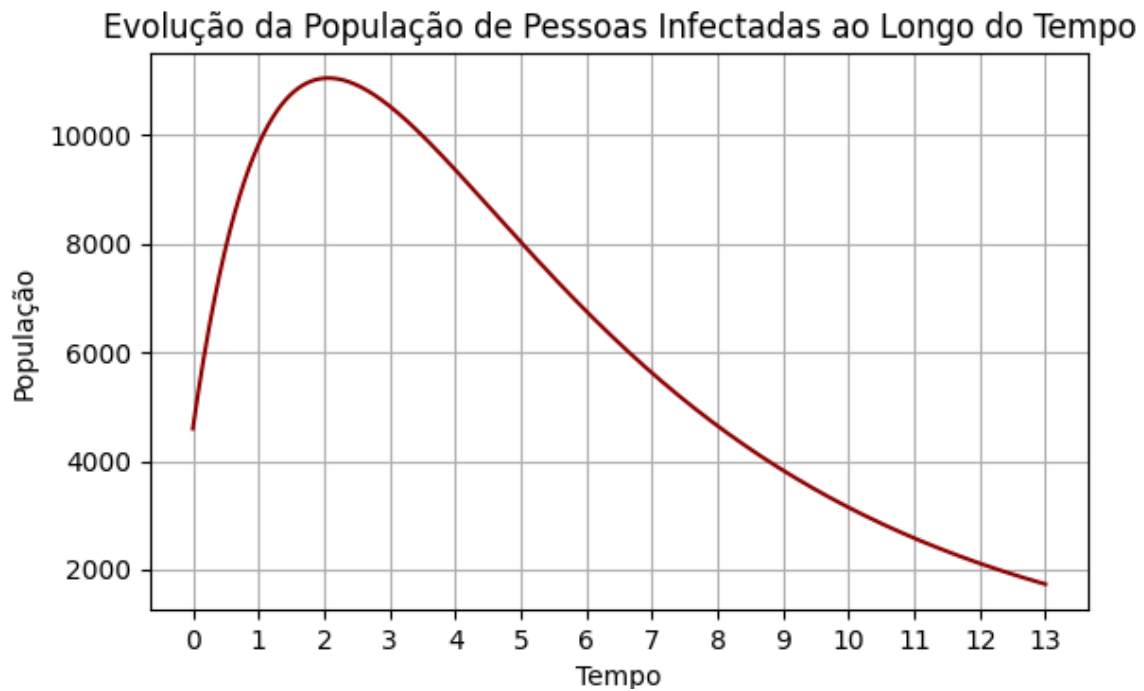
$$\theta = 1,43 \times 10^{-12}$$

$$\varepsilon = 1 \times 10^{-14}$$

As Figuras 17 e 18 evidenciam que a variação no coeficiente θ foi determinante para a alteração no comportamento da curva. A análise comparativa entre os gráficos demonstra que pequenas modificações no valor de θ resultaram em mudanças significativas

na tendência da curva de infectados, evidenciando a sensibilidade do modelo a este parâmetro específico.

Figura 18 – Alterando θ e ε - 4º resultado



Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

Resultados dos Parâmetros A_0 , L_0 e C_0

Mantiveram-se os novos valores dos parâmetros θ e ε , que geraram os melhores resultados na dinâmica dos infectados ao longo do tempo. A seguir, temos os parâmetros atualizados até este momento.

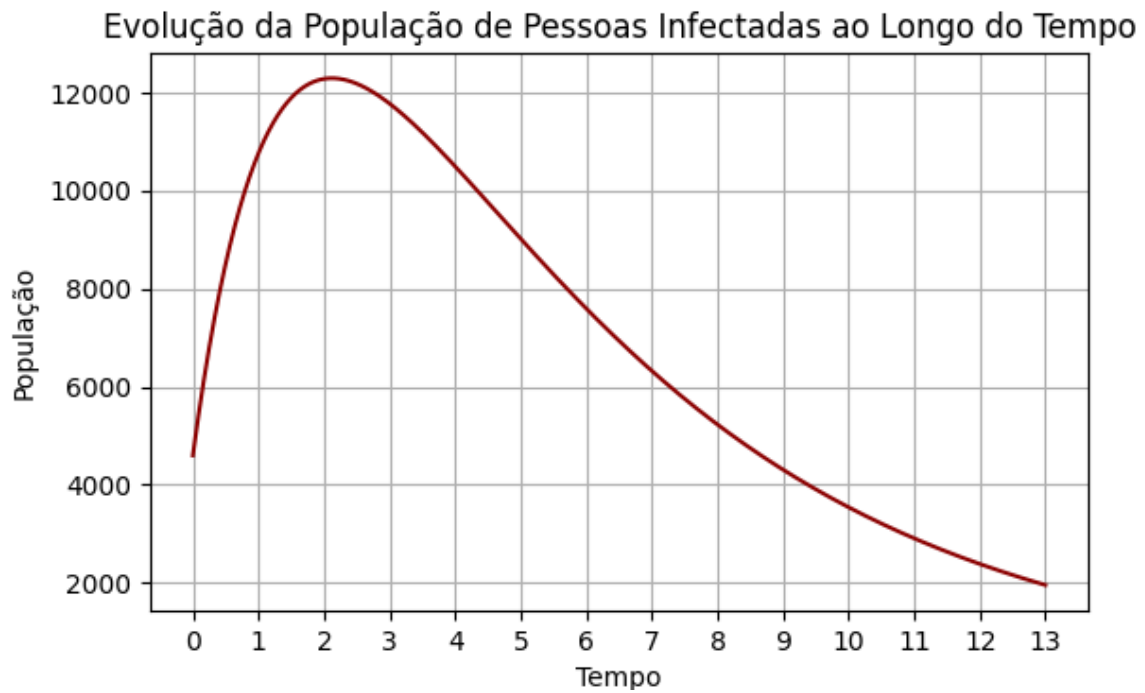
$$\begin{array}{lll}
 S_0 = 204.8 \times 10^6 & \psi = 250.000.000 & \mu_A = \left(\frac{1}{21}\right) \times 7 \\
 I_0 = 4.597 & \theta = 1,43 \times 10^{-12} & \mu_L = \left(\frac{1}{35}\right) \times 7 \\
 R_0 = 0 & \varepsilon = 1 \times 10^{-13} & \mu_C = \mu_L \\
 A_0 = 212.000.000 & \lambda = \left(\frac{1}{10}\right) \times 7 & \alpha_A = 0 \\
 L_0 = 60.000.000 & \gamma = \left(\frac{1}{20}\right) \times 7 & \alpha_L = 0 \\
 C_0 = 40.000.000 & \mu_I = 0,001165 & \alpha_C = \alpha_L \\
 \phi = \frac{800}{5} & &
 \end{array}$$

Valores dos Parâmetros - Figura 19

$$L_0 = 55.000.000$$

$$C_0 = 45.000.000$$

Figura 19 – Alterando L_0 e C_0 - 1º resultado



Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

A Figura 19 mostra que, com um pequeno ajuste em L_0 e C_0 , o ponto máximo de infectados se aproximou do valor que esta sendo buscado, aumentando cerca de 1500 casos.

Valores dos Parâmetros - Figura 20

$$A_0 = 112.000.000$$

$$L_0 = 55.000.000$$

$$C_0 = 45.000.000$$

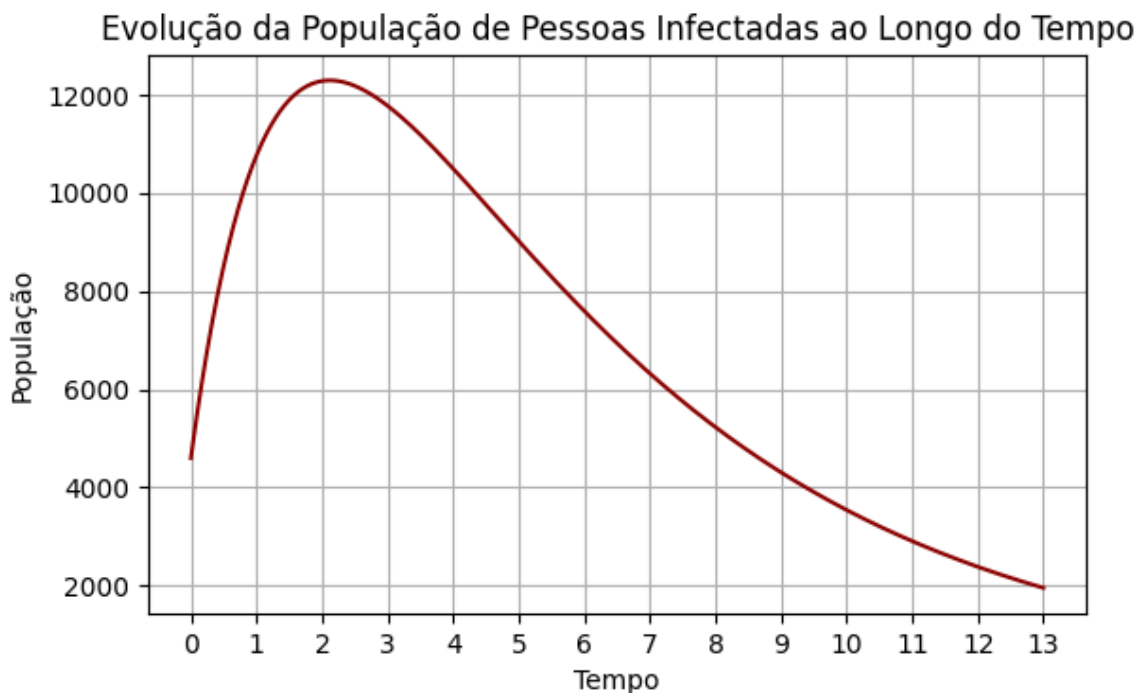
Valores dos Parâmetros - Figura 21

$$A_0 = 512.000.000$$

$$L_0 = 55.000.000$$

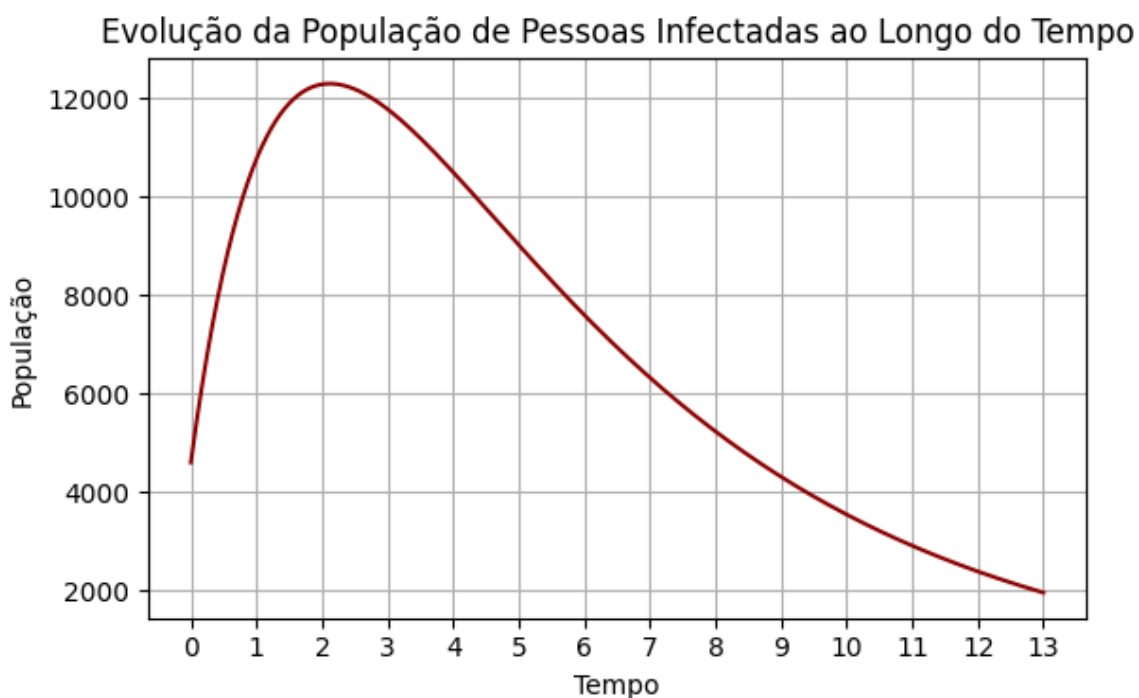
$$C_0 = 45.000.000$$

Figura 20 – Alterando A_0 , L_0 e C_0 - 2º resultado



Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

Figura 21 – Alterando A_0 , L_0 e C_0 - 3º resultado



Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

As Figuras 20 e 21 mostram que, com essas configurações de parâmetros, alterações em A_0 praticamente não geram efeito sobre o gráfico de infectados.

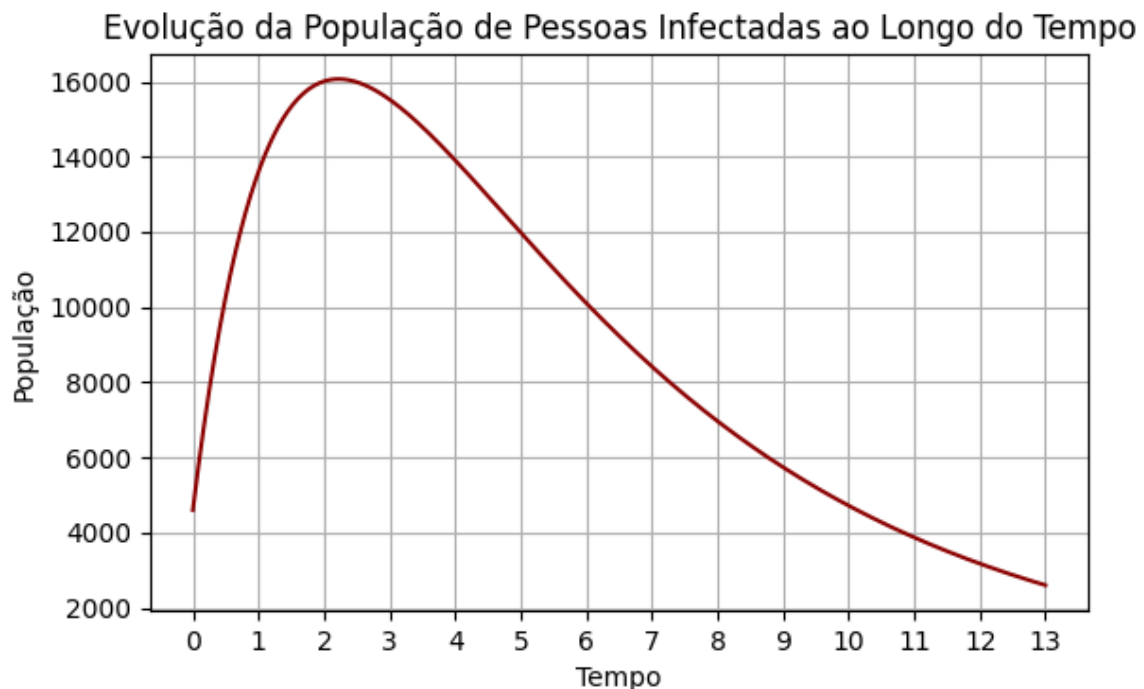
Valores dos Parâmetros - Figura 22

$$A_0 = 212.000.000$$

$$L_0 = 40.000.000$$

$$C_0 = 60.000.000$$

Figura 22 – Alterando A_0 , L_0 e C_0 - 3º resultado



Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

A Figura 22 revela os resultados dos parâmetros adotados após os testes realizados. Obtivemos sucesso em alcançar o ponto máximo de infectados muito próximo do valor real. No entanto, o momento em que a curva atinge esse ponto máximo permanece inalterado, ocorrendo próximo à segunda semana. Idealmente, esse ponto máximo deveria se mover para a semana 9.

Resultados do Parâmetro ψ

Essas são as configurações de coeficientes definidas até o momento. Usaremos esses valores para testar a influência do ψ sobre os resultados de infectados no modelo CHIKV.

$$S_0 = 204.8 \times 10^6$$

$$R_0 = 0$$

$$L_0 = 40.000.000$$

$$I_0 = 4.597$$

$$A_0 = 212.000.000$$

$$C_0 = 60.000.000$$

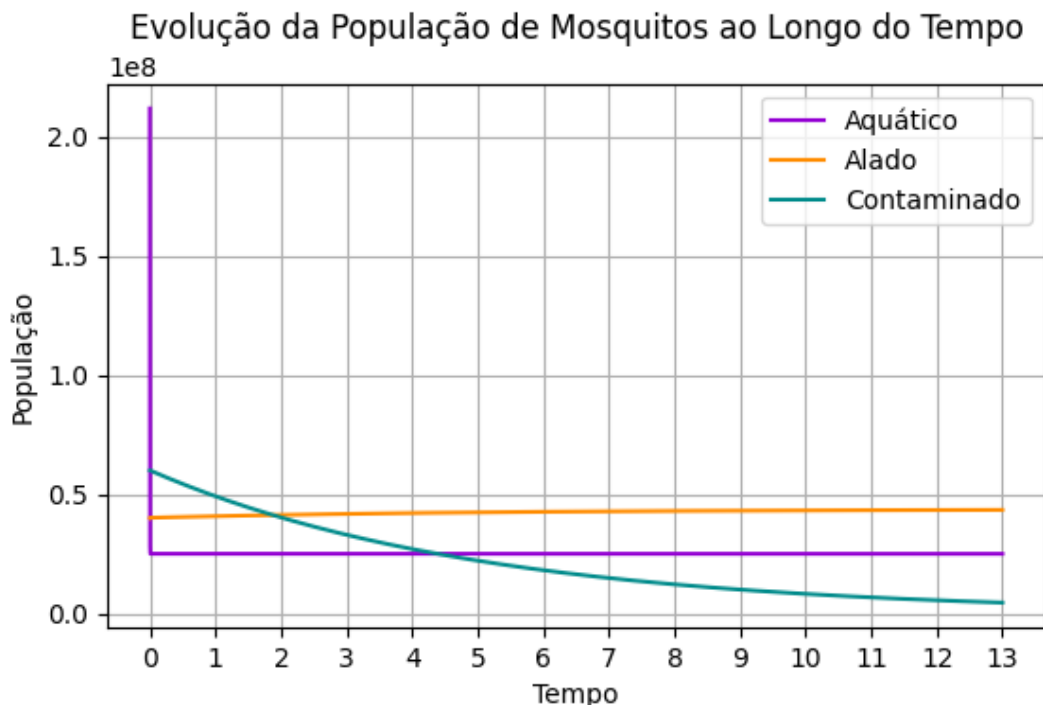
$$\begin{array}{lll}
 \phi = \frac{800}{5} & \gamma = \left(\frac{1}{20}\right) \times 7 & \mu_C = \mu_L \\
 \psi = 250.000.000 & \mu_I = 0,001165 & \alpha_A = 0 \\
 \theta = 1,43 \times 10^{-12} & \mu_A = \left(\frac{1}{21}\right) \times 7 & \alpha_L = 0 \\
 \varepsilon = 1 \times 10^{-13} & \mu_L = \left(\frac{1}{35}\right) \times 7 & \alpha_C = \alpha_L \\
 \lambda = \left(\frac{1}{10}\right) \times 7 & &
 \end{array}$$

Valores dos Parâmetros - Figura 23

$$A_0 = 212.000.000$$

$$\psi = 250.000.000$$

Figura 23 – Alterando A_0 e ψ - 1º resultado



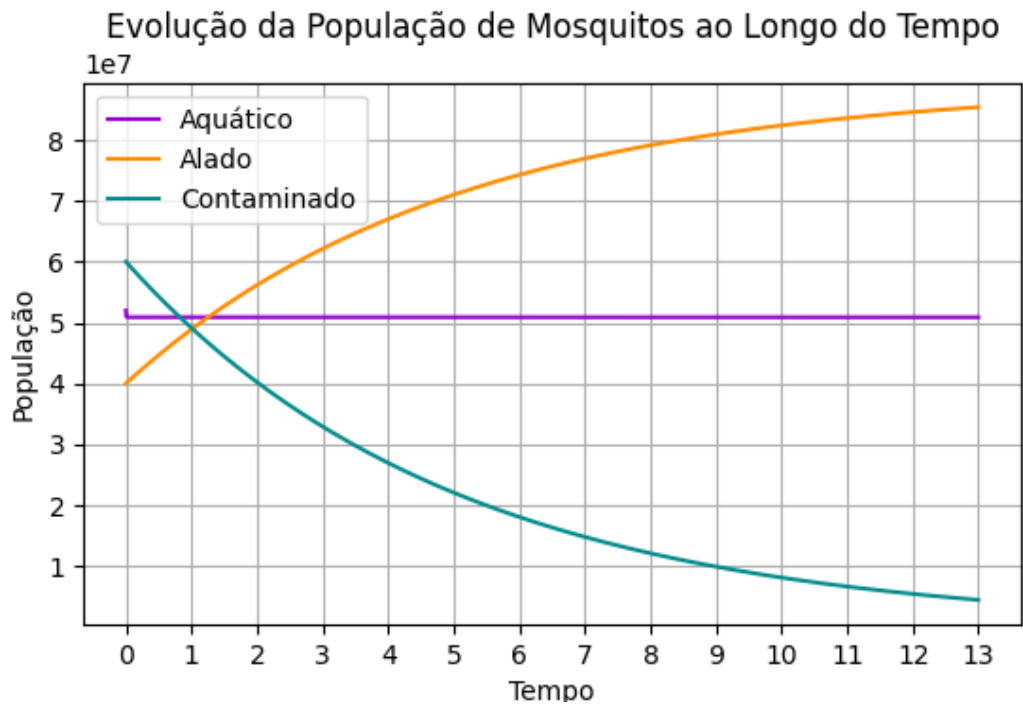
Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

Valores dos Parâmetros - Figuras 24 e 25

$$A_0 = 52.000.000$$

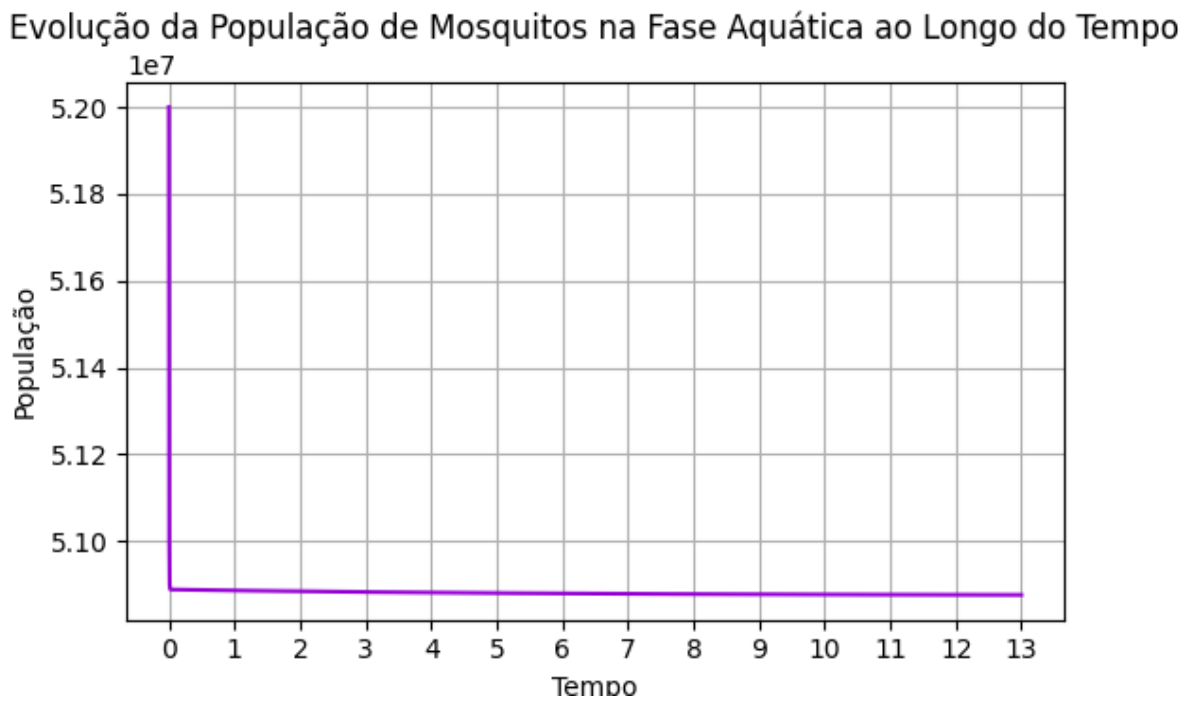
$$\psi = 51.000.000$$

Figura 24 – Alterando A_0 e ψ - 2º resultado a



Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

Figura 25 – Alterando A_0 e ψ - 2º resultado b



Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

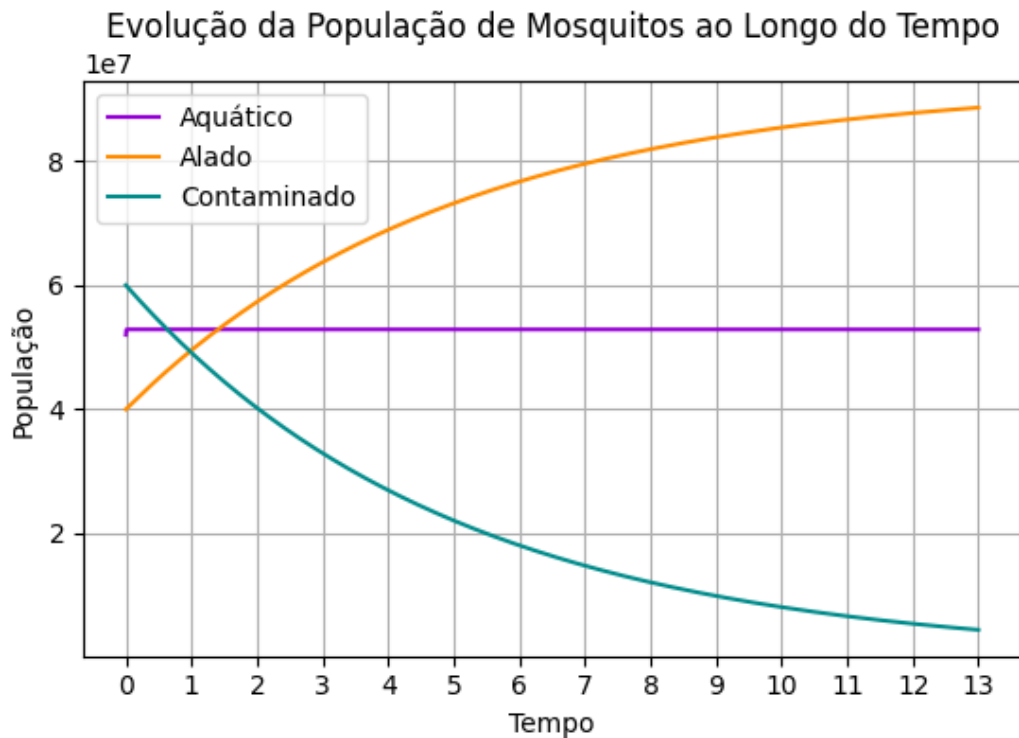
As Figuras 24 e 25 mostram que a curva dos mosquitos na fase aquática decresce e se estabiliza rapidamente, enquanto as curvas das outras fases apresentam dinâmicas diferentes.

Valores dos Parâmetros - Figuras 26 e 27

$$A_0 = 52.000.000$$

$$\psi = 53.000.000$$

Figura 26 – Alterando A_0 e ψ - 3º resultado a

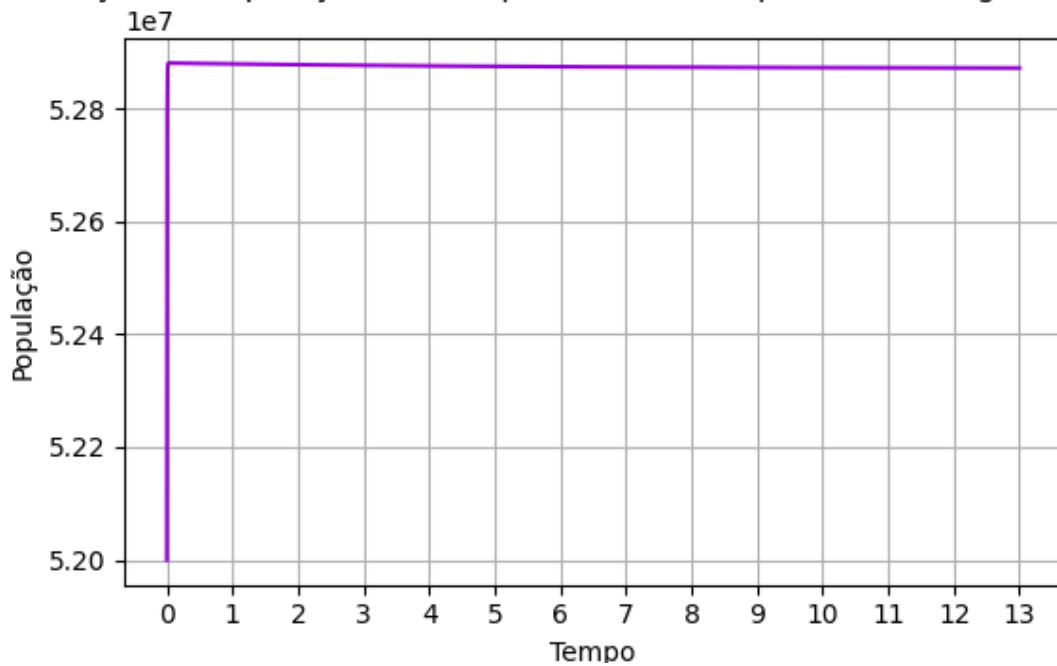


Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

As Figuras 26 e 27 ilustram a mudança na estabilidade das curvas; agora, o gráfico da fase aquática cresce rapidamente e se estabiliza, indicando a influência deste parâmetro na dinâmica dos mosquitos.

Figura 27 – Alterando A_0 e ψ - 3º resultado b

Evolução da População de Mosquitos na Fase Aquática ao Longo do Tempo



Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

Valores dos Parâmetros - Figura 28 e 29

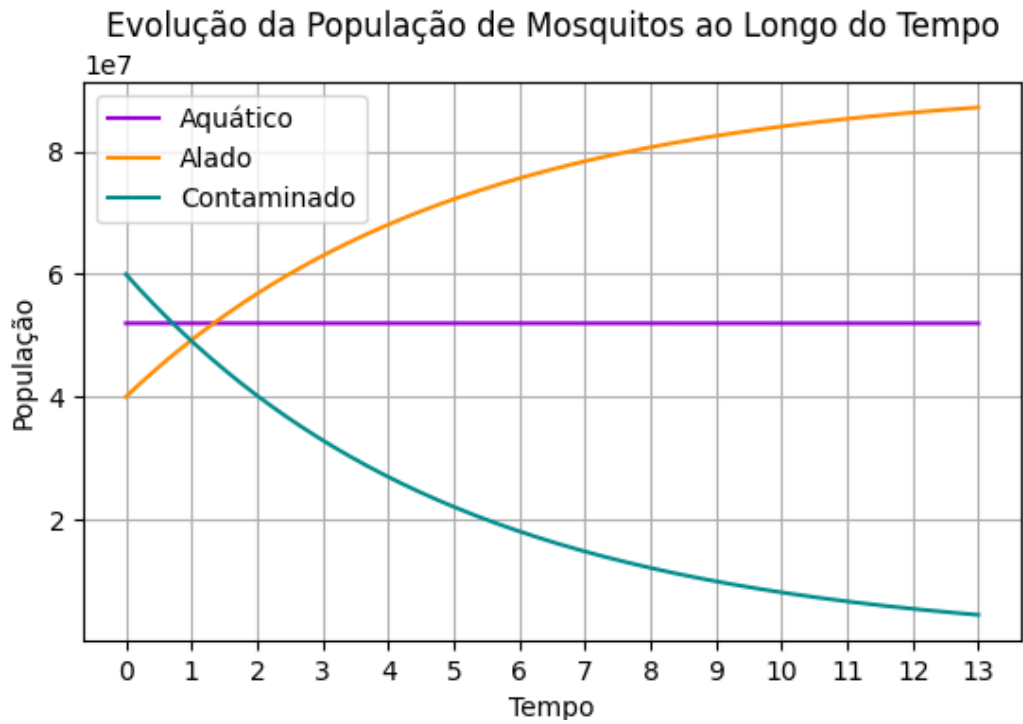
$$A_0 = 52.000.000$$

$$\psi = 52.116.000$$

As Figuras 28 e 29 resultam em uma curva decrescente mais suave, muito diferente das duas anteriores.

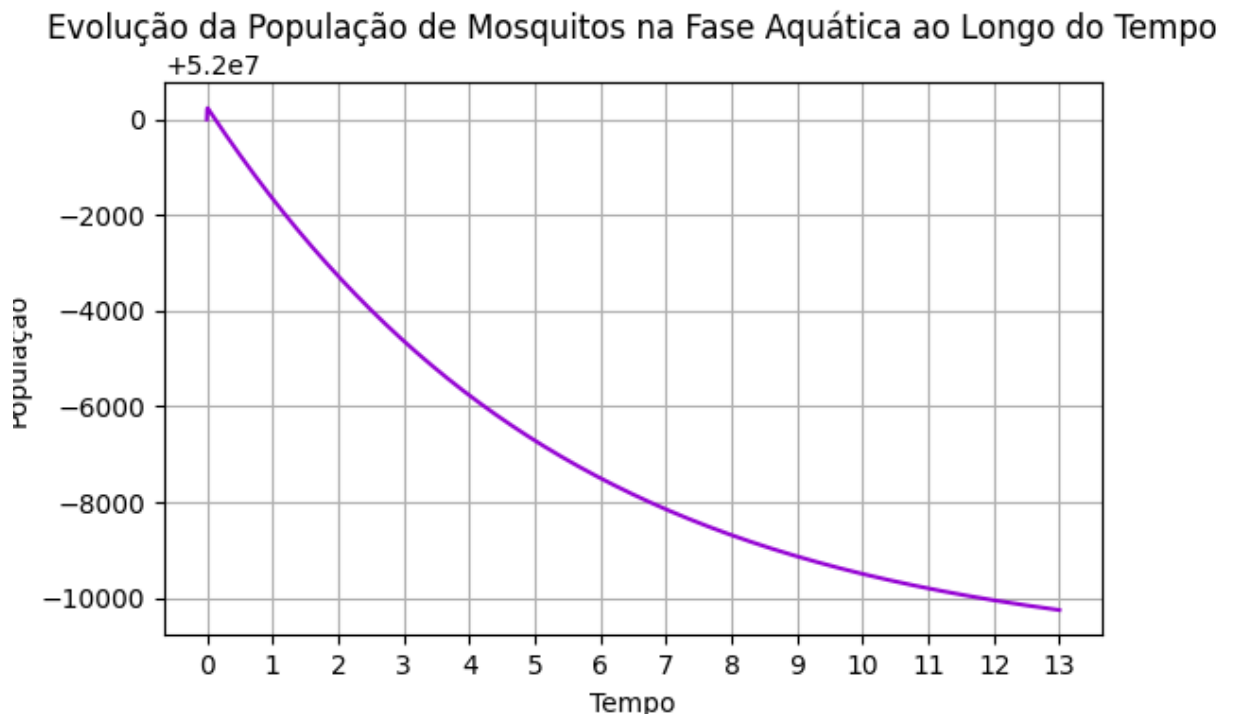
Pode-se notar que trata-se de um parâmetro que se destaca por sua sensibilidade notória sobre a dinâmica da população dos aquáticos.

Figura 28 – Alterando A_0 e ψ - 4º resultado a



Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

Figura 29 – Alterando A_0 e ψ - 4º resultado b



Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

Conclui-se então com a constatação de que o parâmetro ψ tem pouca influência sobre a curva de infectados, conforme podemos ver na Figura 30.

Figura 30 – Alterando A_0 e ψ - 4º resultado c



Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

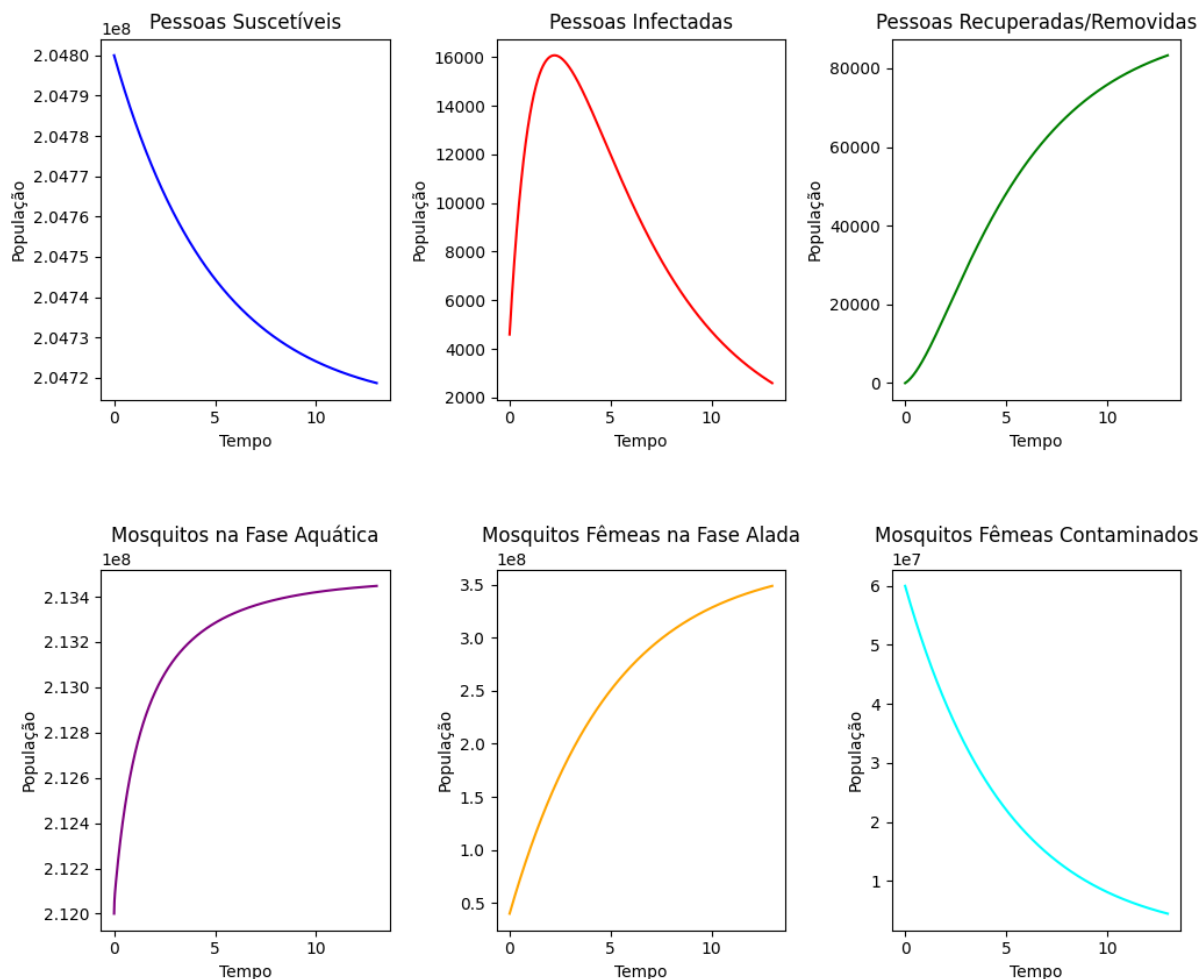
Resultados Parciais

A calibração dos parâmetros do modelo está conforme descrito a seguir:

$$\begin{array}{lll}
 S_0 = 204.8 \times 10^6 & \psi = 214.000.000 & \mu_A = \left(\frac{1}{21}\right) \times 7 \\
 I_0 = 4.597 & \theta = 1,43 \times 10^{-12} & \mu_L = \left(\frac{1}{35}\right) \times 7 \\
 R_0 = 0 & \varepsilon = 1 \times 10^{-13} & \mu_C = \mu_L \\
 A_0 = 212.000.000 & \lambda = \left(\frac{1}{10}\right) \times 7 & \alpha_A = 0 \\
 L_0 = 40.000.000 & \gamma = \left(\frac{1}{20}\right) \times 7 & \alpha_L = 0 \\
 C_0 = 60.000.000 & \mu_I = 0,001165 & \alpha_C = \alpha_L \\
 \phi = \frac{800}{5} & &
 \end{array}$$

A Figura 31 apresenta os resultados intermediários das simulações com os parâmetros parcialmente calibrados até o momento. O gráfico mostra a evolução temporal das populações de pessoas suscetíveis, infectadas e recuperadas/removidas, bem como das diferentes fases do mosquito *Aedes aegypti*, principal vetor da Chikungunya (aquática, fêmeas aladas e fêmeas contaminadas). Observa-se que:

Figura 31 – Resultado Intermediário - 1º resultado



Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

- A população de pessoas suscetíveis diminui gradualmente ao longo do tempo.
- A curva de infectados atinge um pico, que ainda persiste na 2ª semana; idealmente, esse pico deveria ocorrer na 9ª semana para melhor representar a realidade. Posteriormente, a curva decresce, refletindo a dinâmica da infecção, que historicamente apresenta um crescimento até um ponto máximo e, em seguida, começa a decrescer. Esse comportamento é amplamente influenciado pelo meio ambiente, especialmente pelo clima, que afeta a sobrevivência do mosquito vetor.
- A população de recuperados/removidos cresce conforme os infectados se recuperam, o que é coerente com a dinâmica real da doença.
- A fase aquática dos mosquitos mostra um aumento inicial e posterior estabilização; no entanto, não foram observados períodos mais longos para avaliar por quanto tempo essa estabilização se mantém.

- As fêmeas aladas apresentam um crescimento contínuo, o que é consistente com o crescimento contínuo observado na fase aquática.
- As fêmeas contaminadas apresentam uma diminuição contínua, refletindo a redução de mosquitos infectados ao longo do tempo. Essa diminuição é consistente com a redução de pessoas infectadas, uma vez que o mosquito depende de encontrar uma pessoa infectada para adquirir o vírus. Com menos pessoas infectadas, menores são as probabilidades de o mosquito encontrar um indivíduo portador do vírus CHIKV.

Conclui-se que a calibração dos parâmetros do modelo até o momento tem proporcionado uma compreensão da dinâmica das populações envolvidas, embora ajustes adicionais sejam necessários para alinhar os picos de infecção com os dados reais observados.

Resultados do Parâmetro λ

A conclusão desta parte de calibração dos parâmetros se dará analisando o λ , que representa a taxa de recuperação da doença. É importante destacar que a Chikungunya é uma infecção única; após a primeira infecção pelo vírus, o indivíduo desenvolve anticorpos que conferem imunidade permanente.

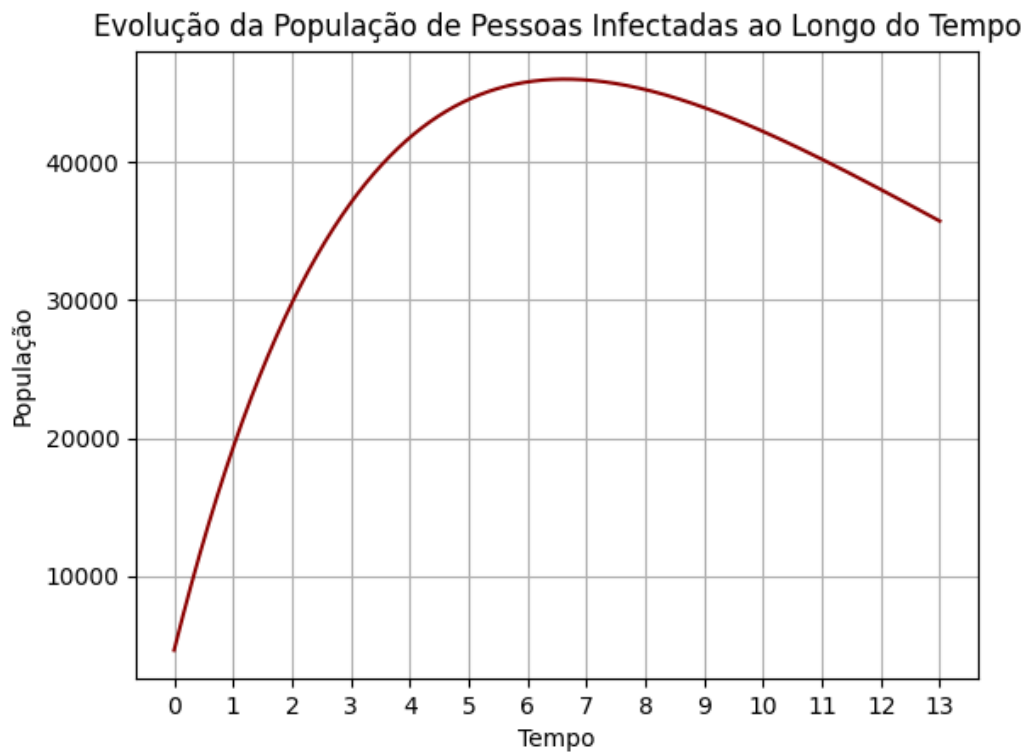
Após inúmeras tentativas exaustivas de encontrar uma combinação de parâmetros que melhor descrevesse a curva de infectados de forma mais próxima à realidade, decidimos testar os parâmetros definidos pela literatura e as características do mosquito *Aedes aegypti* e da doença Chikungunya.

Dentre todos os parâmetros testados, o λ demonstrou a maior flexibilidade para ajustar a curva de infectados.

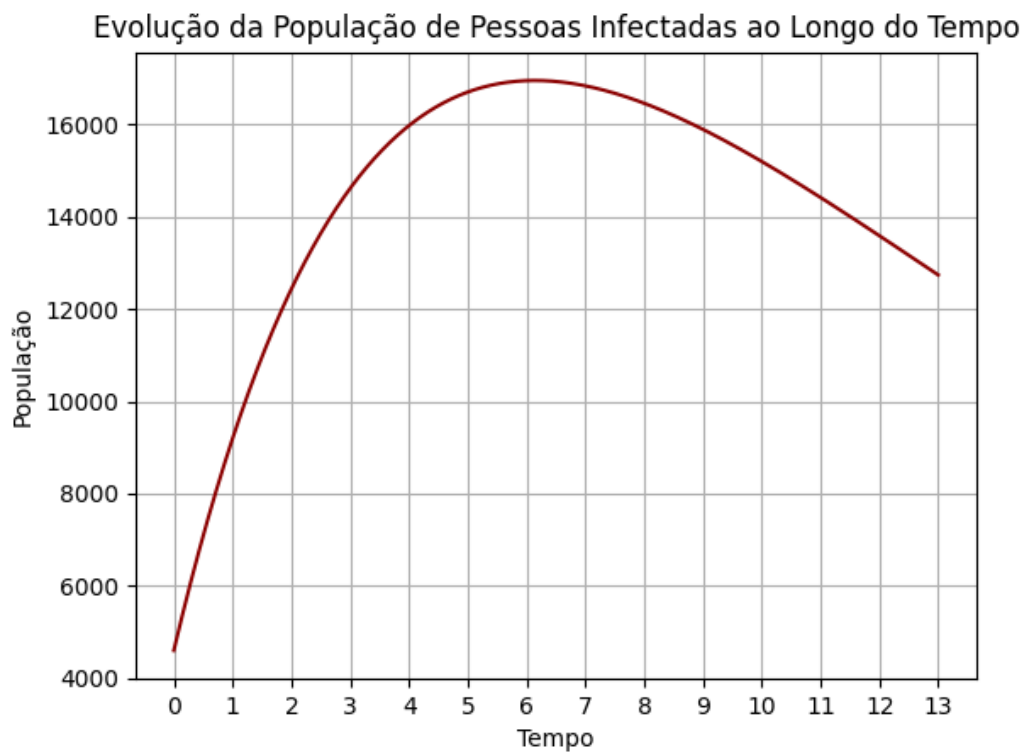
Valor do Parâmetro - Figura 32

$$\lambda = \frac{1}{10}$$

A Figura 32 representa um avanço no traçado da curva, deslocando o ponto máximo para a 6ª semana. No entanto, o total de casos aumentou significativamente, alcançando 45.000 infectados.

Figura 32 – Alterando λ - 1º resultado

Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

Figura 33 – Alterando λ - 2º resultado

Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

Valor dos Parâmetros - Figura 33

$$L_0 = 80.000.000$$

$$C_0 = 20.000.000$$

$$\lambda = \left(\frac{1}{10}\right)$$

A Figura 33 é a representação alcançada neste trabalho que visualmente mais se aproxima da curva real. No entanto, vale ressaltar que o parâmetro λ está inconsistente com o espaço temporal aplicado nestes cálculos, que foram realizados em intervalos semanais.

Resultados Finais

A calibração dos parâmetros do modelo se encerra da seguinte forma:

$$S_0 = 204.8 \times 10^6$$

$$\psi = 214.000.000$$

$$\mu_A = \left(\frac{1}{21}\right) \times 7$$

$$I_0 = 4.597$$

$$\theta = 1,43 \times 10^{-12}$$

$$\mu_L = \left(\frac{1}{35}\right) \times 7$$

$$R_0 = 0$$

$$\varepsilon = 1 \times 10^{-13}$$

$$\mu_C = \mu_L$$

$$A_0 = 212.000.000$$

$$\lambda = \left(\frac{1}{10}\right)$$

$$\alpha_A = 0$$

$$L_0 = 80.000.000$$

$$\gamma = \left(\frac{1}{20}\right) \times 7$$

$$\alpha_L = 0$$

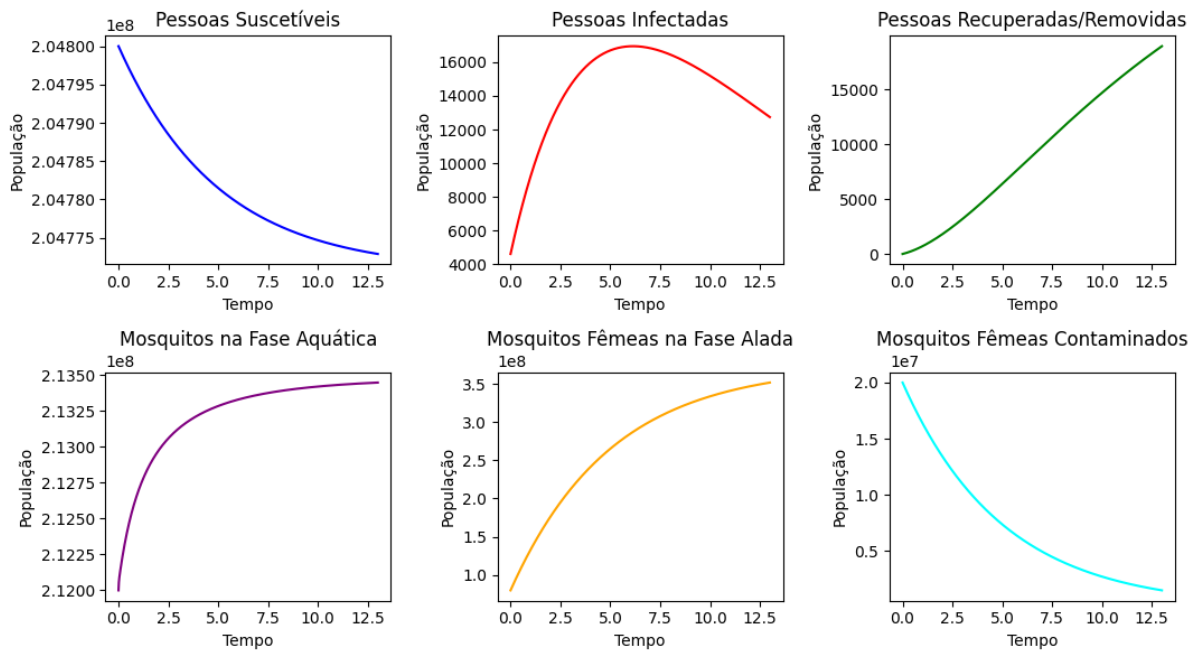
$$C_0 = 20.000.000$$

$$\phi = \frac{800}{5}$$

$$\mu_I = 0,001165$$

$$\alpha_C = \alpha_L$$

Figura 34 – Resultado do modelo CHIKV



Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

A Figura 34 apresenta os resultados da simulação do modelo CHIKV, mostrando a evolução temporal das populações de pessoas e mosquitos. A análise dos gráficos revela os seguintes aspectos:

- **Pessoas Suscetíveis:** A população de pessoas suscetíveis diminui gradualmente ao longo do tempo, refletindo a propagação da infecção entre a população.
- **Pessoas Infectadas:** A curva de infectados atinge um pico por volta da 6^a semana, com aproximadamente 16.000 casos, antes de começar a decrescer. Esse comportamento é consistente com a dinâmica da infecção, onde um rápido aumento é seguido por um declínio à medida que as pessoas se recuperam ou são removidas do grupo suscetível.
- **Pessoas Recuperadas/Removidas:** A população de recuperados/removidos cresce continuamente ao longo do tempo, indicando que os indivíduos estão se recuperando da infecção e adquirindo imunidade, o que é esperado na dinâmica da Chikungunya, uma vez que a infecção confere imunidade permanente.
- **Mosquitos na Fase Aquática:** A população de mosquitos na fase aquática mostra um aumento inicial rápido, seguido por uma estabilização. Esse padrão sugere que, após um período de crescimento, a população de mosquitos aquáticos atinge um equilíbrio dinâmico.
- **Mosquitos Fêmeas na Fase Alada:** A população de fêmeas aladas apresenta um crescimento contínuo ao longo do tempo. Isso pode estar associado ao crescimento inicial observado na fase aquática, que fornece um suprimento constante de mosquitos que se transformam em fêmeas aladas.
- **Mosquitos Fêmeas Contaminadas:** A população de fêmeas contaminadas diminui continuamente, refletindo a redução na taxa de transmissão do vírus à medida que o número de pessoas infectadas diminui. Com menos pessoas infectadas, há menos oportunidades para os mosquitos adquirirem o vírus e, portanto, a população de mosquitos infectados decresce.

Conclusão: A simulação com o modelo CHIKV mostra uma boa representação das dinâmicas populacionais esperadas para pessoas e mosquitos no contexto de uma epidemia de Chikungunya. No entanto, ajustes adicionais nos parâmetros podem ser necessários para alinhar a simulação ainda mais de perto com os dados empíricos. A análise detalhada dos gráficos revela que o modelo captura bem a propagação e o declínio da infecção, bem como as interações entre as diferentes fases dos mosquitos.

6.4 APLICAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CONTROLE

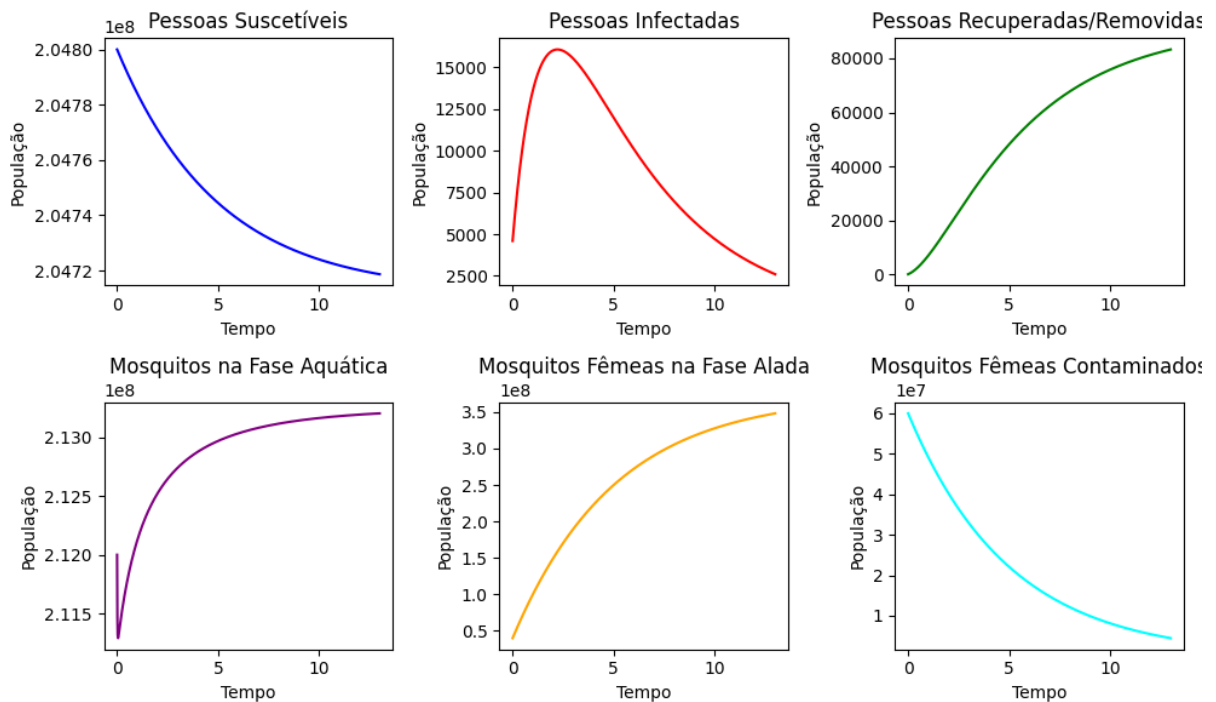
Vamos agora analisar o comportamento dos parâmetros de controle no modelo matemática CHIKV.

1ª Configuração de Parâmetros

$$\begin{array}{lll}
 S_0 = 204.8 \times 10^6 & \psi = 214.000.000 & \mu_A = \left(\frac{1}{21}\right) \times 7 \\
 I_0 = 4.597 & \theta = 1,43 \times 10^{-12} & \mu_L = \left(\frac{1}{35}\right) \times 7 \\
 R_0 = 0 & \varepsilon = 1 \times 10^{-13} & \mu_C = \mu_L \\
 A_0 = 212.000.000 & \lambda = \left(\frac{1}{10}\right) \times 7 & \alpha_A = 0 \\
 L_0 = 40.000.000 & \gamma = \left(\frac{1}{20}\right) \times 7 & \alpha_L = 0 \\
 C_0 = 60.000.000 & \mu_I = 0,001165 & \alpha_C = \alpha_L \\
 \phi = \frac{800}{5} & &
 \end{array}$$

Sem aplicação de controle

Figura 35 – Sem controle - Modelo 1



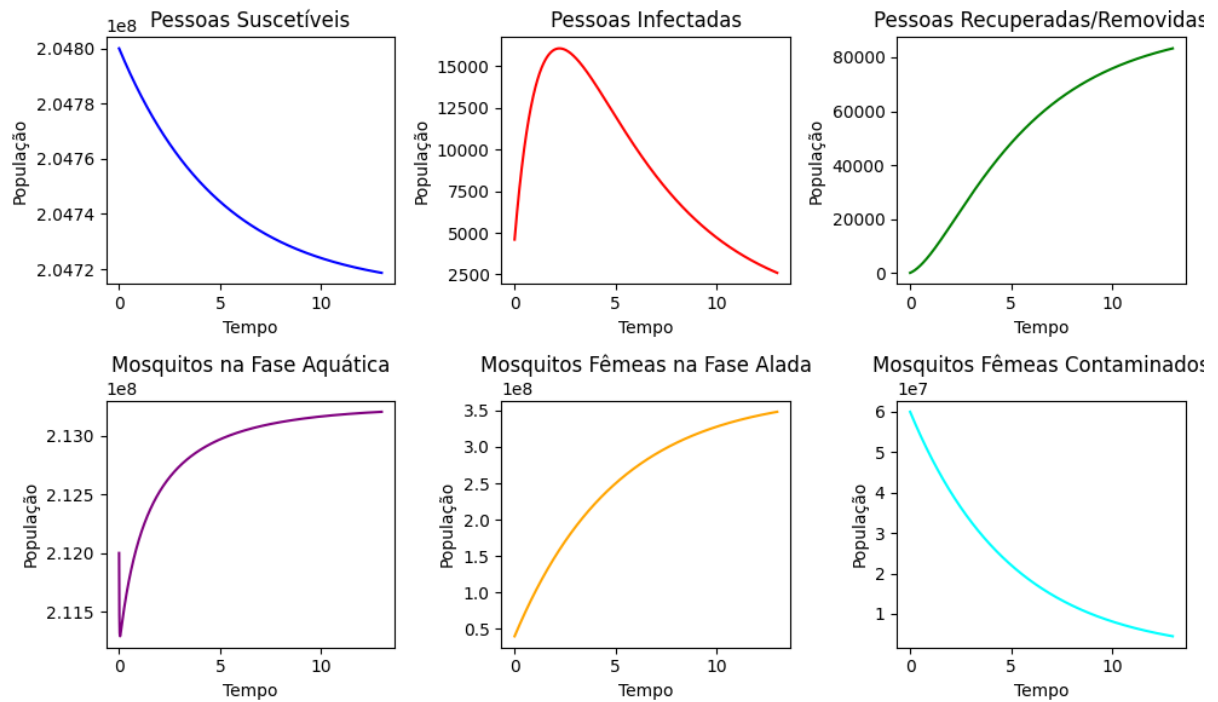
Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

α_A Controle Aplicado na Fase Aquática

Neste modelo matemático, α é uma variável que representa o combate ao vetor na fase em que está sendo aplicado.

Se $\alpha_A = 0,3$

Figura 36 – Com controle $\alpha_A = 0,3$ - Modelo 1

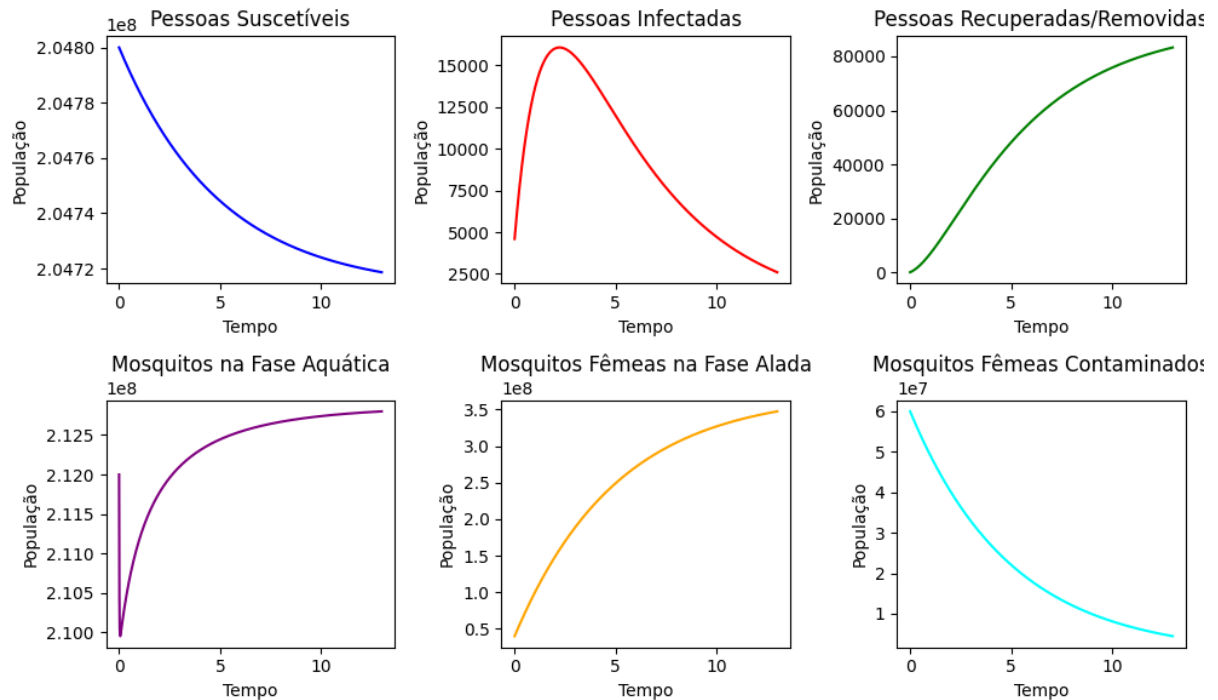


Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

Se $\alpha_A = 0,8$

Pelas Figuras 35, 36 e 37 vemos que o controle sobre a fase aquática não exerce influência significativa sobre os outros compartimentos do modelo.

Ao ser aplicada uma taxa de controle na fase aquática, há uma queda expressiva na população aquática, porém extremamente temporária, e logo a fase aquática começa a crescer novamente.

Figura 37 – Com controle $\alpha_A = 0,8$ - Modelo 1

Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

α_L Controle Aplicado na Fase Alada

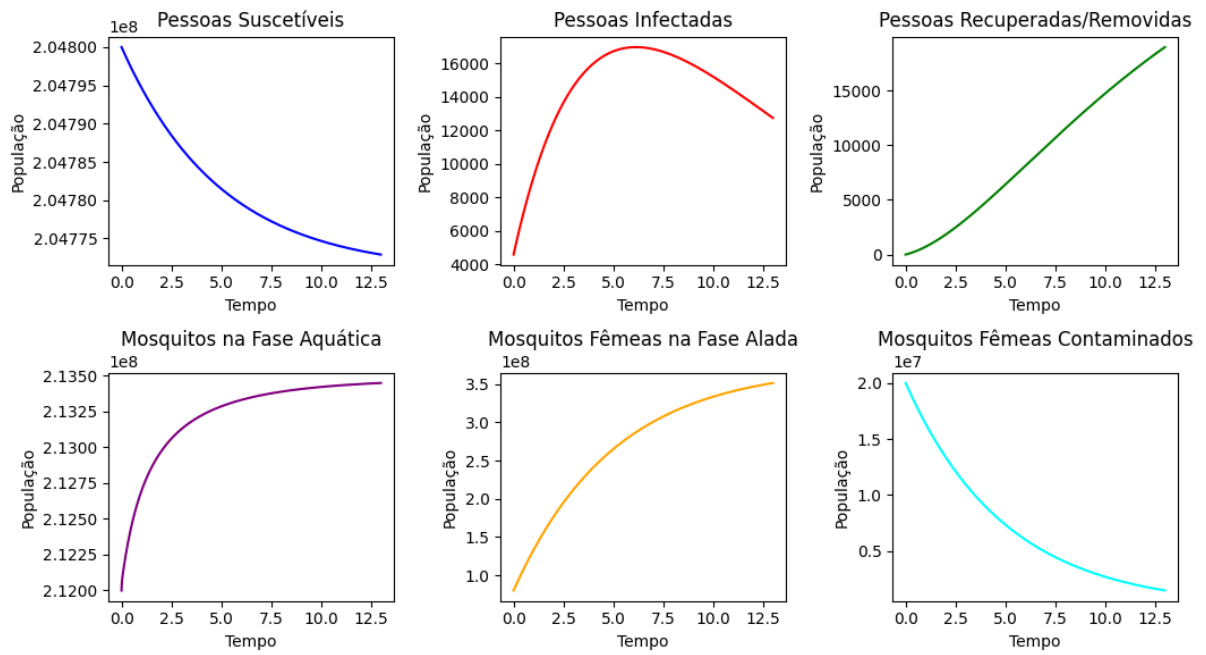
Seguem testes realizados aplicando controle na fase alada.

A Figura 38 representa os resultados sem nenhum tipo de controle.

A Figura 39 representa os resultados com um controle de $\alpha_A = 0,3$ aplicado na fase alada. Os resultados notados sobre a curva de infectados, sem alteração no ponto máximo, porém, gerando uma queda mais expressiva da doença. Nota-se também um aumento na população de fêmeas não infectadas em detrimento das fêmeas infectadas.

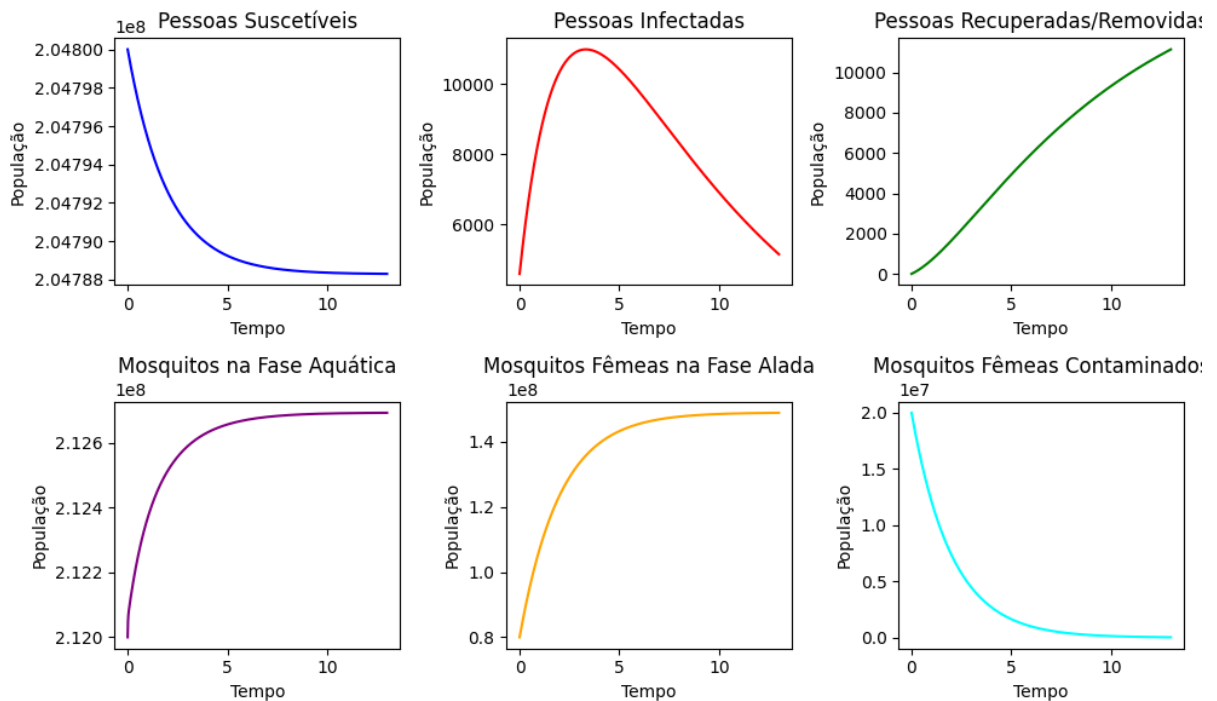
A Figura 40 mostra que os resultados com $\alpha_A = 0,8$ são similares aos anteriores, também não foi possível diminuir o ponto máximo de infectados. E todas as fases do mosquito sofreram alterações em suas populações.

Figura 38 – Sem controle - Modelo 2

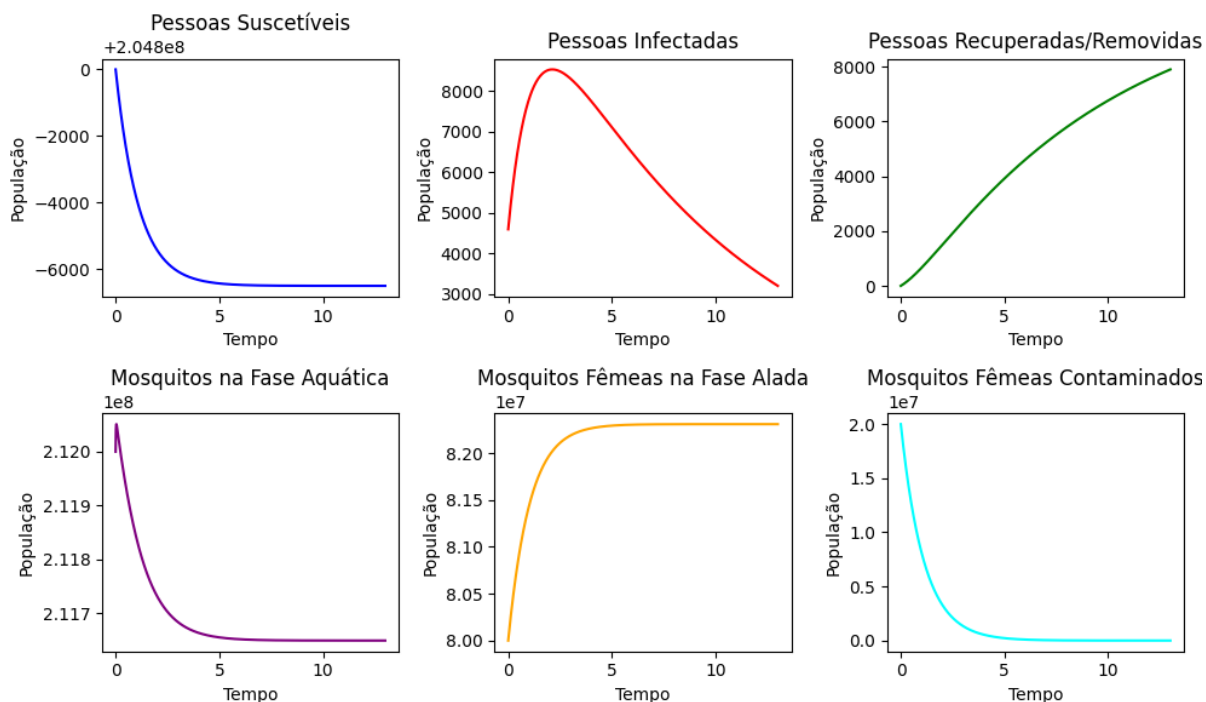


Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

Figura 39 – Com controle $\alpha_L = 0,3$ - Modelo 2



Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

Figura 40 – Com controle $\alpha_L = 0,7$ - Modelo 2

Fonte: Elaborado pelo autor (gerado em Python)

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os experimentos com medidas de controle demonstraram elevada eficácia nos resultados, evidenciando que o controle do mosquito *Aedes aegypti*, vetor da Chikungunya, é crucial para o combate a essa arbovirose. Embora não tenha reduzido de forma expressiva o pico máximo de infecções, o controle mostrou-se eficiente em diminuir significativamente a duração do período de incidência da doença.

A seguir, apresentamos algumas formas de controle na fase aquática e na fase alada.

Controle na Fase Aquática

Na fase aquática, o *Aedes aegypti* passa por estágios de ovo, larva e pupa, que se desenvolvem em ambientes com água parada. A eliminação desses criadouros é uma das estratégias mais eficazes para o controle do mosquito [42]. Medidas preventivas incluem:

- **Remoção de Criadouros:** Eliminar recipientes que possam acumular água, como pneus, vasos de plantas, garrafas e tampas. Manter caixas d'água, tonéis e outros reservatórios bem vedados para evitar o acesso das fêmeas aos locais de oviposição.
- **Tratamento de Água:** Aplicação de larvicidas biológicos ou químicos.

Também pode-se utilizar inseticidas reguladores de crescimento que impedem o desenvolvimento das larvas em adultos.

- **Limpeza Regular:** Manter a limpeza de piscinas, fontes e calhas, além de trocas frequentes de água em pratos de plantas e bebedouros de animais, para evitar que se tornem focos de larvas.

Controle na Fase Alada

Na fase alada, o *Aedes aegypti* é mais difícil de ser controlado devido à sua capacidade de voo e dispersão. No entanto, várias estratégias podem ser adotadas para reduzir a população de mosquitos adultos:

- **Uso de Inseticidas:** Pulverização de inseticidas em áreas endêmicas durante surtos, visando a redução rápida da população de mosquitos adultos.
- **Instalação de Telas:** Utilização de telas em portas e janelas para evitar a entrada de mosquitos nas residências. O uso de mosquiteiros durante o sono também é recomendado, especialmente em áreas de alta incidência de arboviroses.
- **Armadilhas para Mosquitos:** Implementação de armadilhas luminosas ou ovitrampas para atrair e capturar mosquitos adultos, ajudando a monitorar e reduzir a população de *Aedes aegypti*.
- **Repelentes e Vestuário:** Uso de repelentes tópicos e vestuário de manga longa tratado para reduzir as picadas de mosquitos. Essas medidas são especialmente importantes em áreas onde a exposição ao mosquito é alta.

O controle efetivo do *Aedes aegypti* requer um esforço contínuo e colaborativo entre autoridades de saúde, comunidades e indivíduos. A implementação de estratégias combinadas para combater o mosquito em suas fases aquática e alada é fundamental para a redução das arboviroses e a promoção da saúde pública.

7 ENSINO

7.1 PLANO DE AULA PARA ENSINO FUNDAMENTAL

Este projeto de aula foi desenvolvido para alunos do 9º ano do ensino fundamental, com o objetivo de integrar conceitos de epidemiologia e matemática aplicada, utilizando a Chikungunya como estudo de caso. Ao longo de seis aulas, os alunos terão a oportunidade de explorar conhecimentos teóricos e práticos, desenvolvendo habilidades essenciais para a interpretação de dados epidemiológicos e a tomada de decisões.

As aulas estão estruturadas de maneira progressiva e interativa, começando com a introdução aos conceitos básicos de epidemiologia e Chikungunya, passando pela aplicação de cálculos matemáticos (porcentagem e média), construção e interpretação de gráficos, até culminar em uma simulação prática de controle de epidemia. O plano detalhado dessas aulas se encontra no Apêndice A.

- **Aula 1:** Introdução à epidemiologia e Chikungunya, com discussões em grupo e atividades práticas sobre prevenção e controle de doenças.
- **Aula 2:** Aplicação de conceitos matemáticos na análise de dados epidemiológicos, focando em porcentagem e média, com exercícios práticos utilizando dados fictícios de Chikungunya.
- **Aula 3:** Construção e interpretação de gráficos (barras e pizza) com dados fictícios, discutindo como esses gráficos podem ser usados para interpretar informações epidemiológicas.
- **Aula 4:** Análise de dados epidemiológicos utilizando métodos descritivos e inferenciais, interpretando dados fictícios de Chikungunya e discutindo suas implicações para a saúde pública.
- **Aulas 5 e 6:** Simulação prática de controle de epidemia, onde os alunos, organizados em grupos, desenvolvem estratégias para controlar um surto fictício de Chikungunya, apresentando e discutindo suas estratégias.

A expectativa é que este projeto de aula proporcione aos alunos um entendimento teórico sólido sobre epidemiologia e matemática aplicada, além de desenvolver habilidades práticas e colaborativas essenciais para a resolução de problemas em saúde pública. Espera-se que essa experiência inspire os alunos a continuar explorando os campos da epidemiologia e matemática, reconhecendo a relevância desses conhecimentos para a saúde e bem-estar da sociedade.

7.2 PLANO DE AULA PARA O ENSINO MÉDIO

Este plano de aula foi desenvolvido para alunos do 3º ano do ensino médio, com o objetivo de integrar conceitos de epidemiologia e matemática aplicada, utilizando a Chikungunya como estudo de caso. O projeto visa proporcionar aos alunos uma compreensão geral de como a matemática pode ser aplicada na análise de dados epidemiológicos e na modelagem de epidemias.

As atividades propostas buscam desenvolver habilidades de cálculo, interpretação de gráficos, análise crítica, além de incentivar a realização de projetos de pesquisa. O plano detalhado dessas aulas se encontra no Apêndice B.

- **Aula 1:** Introdução à epidemiologia e Chikungunya, incluindo doenças transmitidas por vetores e arboviroses, com discussão de métodos de prevenção e cuidados.
- **Aula 2:** Aplicação de conceitos matemáticos na análise de dados epidemiológicos, com foco em taxas de crescimento e modelos compartimentais, especialmente o modelo SIR.
- **Aula 3:** Introdução aos métodos numéricos, com foco no método de Euler, incluindo apresentação teórica e exercícios guiados.
- **Aula 4:** Aplicação prática do método de Euler utilizando planilhas eletrônicas, com configuração inicial, aplicação e interpretação dos resultados.
- **Aula 5:** Interpretação de gráficos e tabelas, incluindo tipos de gráficos, exemplos práticos e atividade de interpretação de dados.
- **Aula 6:** Continuação da interpretação de gráficos e tabelas, com foco em revisão, exemplos práticos e atividade de interpretação de dados adicionais.

A expectativa é que este plano de aula proporcione aos alunos um entendimento teórico sólido sobre epidemiologia e matemática aplicada, além de desenvolver habilidades práticas e colaborativas essenciais para a resolução de problemas em saúde pública. Espera-se que essa experiência inspire os alunos a continuar explorando os campos da epidemiologia e matemática, reconhecendo a relevância desses conhecimentos para a saúde e bem-estar da sociedade.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação teve como objetivo explorar a dinâmica de transmissão da Chikungunya no Brasil, utilizando a modelagem matemática para descrever e prever a propagação da doença. Por meio da aplicação de modelos compartimentais e de métodos numéricos, foi possível obter uma compreensão aprofundada dos fatores que influenciam a disseminação do vírus e avaliar a eficácia de diferentes estratégias de controle.

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho indicam que a modelagem matemática é uma ferramenta poderosa na epidemiologia, permitindo simular cenários e prever o comportamento de surtos de doenças. Os modelos compartimentais SIR e ANMF, aplicados ao estudo da Chikungunya, mostraram-se funcionais na representação das dinâmicas populacionais e na identificação dos parâmetros críticos para o controle da infecção.

A eficácia desses modelos se deve à sua capacidade de segmentar a população em compartimentos distintos (Suscetíveis, Infectados e Recuperados, no caso do SIR) e de incluir fatores específicos ao vetor e ao ambiente (como no modelo ANMF), permitindo uma análise detalhada das interações entre humanos e mosquitos. Ao ajustar os parâmetros do modelo com base em dados empíricos, foi possível aproximar-se da dinâmica real da transmissão da doença, identificando parâmetros críticos para a propagação e controle da infecção, além de revelar pontos que necessitam de pesquisa adicional para aperfeiçoar o modelo e compreender melhor a dinâmica de transmissão da Chikungunya e seus fatores de controle.

Uma das principais conclusões deste estudo é a identificação da taxa de recuperação (λ) como um parâmetro-chave na dinâmica da doença. A flexibilidade deste parâmetro permitiu ajustar a curva de infectados para melhor corresponder aos dados empíricos observados. No entanto, outros parâmetros, como a taxa de transmissão (β) e a capacidade de suporte do meio (ψ), também se mostraram importantes na modelagem da Chikungunya. Uma pesquisa a respeito desses assuntos poderia oferecer ajustes finos ao modelo CHIKV e assim obter melhores resultados.

A análise dos cenários de controle revelou que medidas específicas aplicadas à fase aquática dos mosquitos, embora capazes de reduzir temporariamente a população de mosquitos, não tiveram um impacto duradouro na redução do número de infectados. Isso destaca a necessidade de estratégias integradas de controle que abranjam todas as fases do ciclo de vida dos mosquitos e considerem fatores ambientais.

Além disso, a dissertação sublinha a importância da educação e conscientização da comunidade como parte integrante das estratégias de controle da Chikungunya. A

disseminação de conhecimento sobre a doença e a promoção de práticas preventivas são essenciais para reduzir a incidência da infecção e proteger a saúde pública.

Em termos de contribuição científica, este trabalho oferece uma análise detalhada da dinâmica de transmissão da Chikungunya no Brasil, utilizando modelos matemáticos adaptados à Chikungunya e métodos numéricos adequados. As percepções obtidas a partir desta pesquisa podem auxiliar na formulação de políticas de saúde pública mais produtivas e na implementação de estratégias de controle adaptadas às especificidades regionais.

Para pesquisas futuras, recomenda-se a continuidade dos estudos sobre a integração de modelos estocásticos e a avaliação de novos parâmetros que possam influenciar a transmissão da Chikungunya. Adicionalmente, a aplicação de técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina pode oferecer novas perspectivas na predição de surtos e na otimização de estratégias de controle. Além disso, é importante estudar o modelo com pontos de equilíbrio livres da doença e pontos de equilíbrio endêmicos, realizando suas respectivas análises de estabilidade. O estudo do número básico de reprodução (R_0) pode ser considerado, pois indica a capacidade de propagação da doença e ajuda a identificar as condições necessárias para a erradicação ou controle da doença.

Conclui-se que a modelagem matemática, aliada a uma abordagem interdisciplinar e à colaboração entre pesquisadores, profissionais de saúde e a comunidade, desempenha um papel significativo no enfrentamento dos desafios impostos pela Chikungunya e outras arboviroses, contribuindo para a melhoria da saúde pública no Brasil e em outras regiões afetadas.

REFERÊNCIAS

- [1] BACHAËR, Nicolas et al. **Matemática e Epidemias**. Paris: Nicolas Bachaër, 2022. ISBN 979-10-396-2030-7. Disponível em: <<http://www.ummisco.ird.fr/perso/bacaer/pt2.pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado nas pp. 39, 41, 43.
- [2] BERNATE, Carmen Alicia Ramírez. **Modelagem Matemática e Simulações Computacionais de Estratégias Combinadas de Combate a um Inseto Vetor: o caso do Aedes aegypti**. 2017. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: <<https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2017.991646>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 66.
- [3] BERTONE, Ana Maria Amarillo; BASSANEZI, Rodney Carlos; JAFELICE, Rosana Sueli da Motta. **Modelagem Matemática**. Uberlândia, MG: UFU, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/25315>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado nas pp. 40, 48.
- [4] BEZERRA, Juliana Maria Trindade. **Densidade populacional de Aedes aegypti (Diptera: Culicidae) e taxa de infecção por vírus dengue em São Luís, Maranhão**. 2010. Dissertação (Mestrado em Saúde Materno-Infantil) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís. Orientadora: Valéria Cristina Soares Pinheiro, Co-orientador: Wanderli Pedro Tadei. Disponível em: <<https://tede2.ufma.br/jspui/handle/tede/1142>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 74.
- [5] BOYCE, William E.; DIPRIMA, Richard C. **Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems**. 10. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2012. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4668444/mod_folder/content/0/Boyce%20%20DiPrima.pdf?forcedownload=1>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado nas pp. 51–54, 57, 59, 60.
- [6] BRASIL. **Arboviroses**. Brasília: Ministério da Saúde, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/a/arboviroses>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 17.
- [7] BRASIL. **Chikungunya**. Brasília: Ministério da Saúde, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/c/chikungunya>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado nas pp. 29–32.
- [8] BRASIL. **Febre de Chikungunya**. Brasília: Ministério da Saúde, 2015. Disponível em: <<https://bvsm.s.saude.gov.br/febre-de-chikungunya/>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 14.

- [9] BRASIL. **Informe Semanal nº 17 – Centro de Operações de Emergências**. Brasília: Ministério da Saúde, jun. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/a/arboviroses/informe-semanal/informe-semanal-no-17.pdf/view>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado nas pp. 77, 81.
- [10] BRASIL. **Painel de Monitoramento das Arboviroses**. Brasília: Ministério da Saúde, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/a/aedes-aegypti/monitoramento-das-arboviroses>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado nas pp. 32, 34, 35, 37, 38, 73.
- [11] BRASIL. **Portal da Saúde**. Brasília: Ministério da Saúde, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/saude/pt-br>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 20.
- [12] BURDEN, Richard L.; FAIRES, J. Douglas. **Numerical Analysis**. 9. ed. Boston: Brooks/Cole, Cengage Learning, 2010. ISBN 978-0-538-73351-9. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4668444/mod_folder/content/0/Boyce%20%20DiPrima.pdf?forcedownload=1>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado nas pp. 51, 53–55, 57–60.
- [13] BUTANTAN, Instituto. **Vacina da Chikungunya mantém proteção em 99,1% dos vacinados seis meses após aplicação**. 15 maio 2024. Disponível em: <<https://butantan.gov.br/noticias/vacina-da-chikungunya-mantem-protecao-em-99-1-dos-vacinados-seis-meses-apos-aplicacao>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 36.
- [14] CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. **Catálogo de Teses e Dissertações**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <<https://catalogo.deteses.capes.gov.br/catalogo-teses/>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 14.
- [15] COLIZZA, Vittoria et al. *Predictability and epidemic pathways in global outbreaks of infectious diseases: the SARS case study*. **BMC Medicine**, v. 5, n. 34, 2007. Disponível em: <<https://bmcmmedicine.biomedcentral.com/articles/10.1186/1741-7015-5-34>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 40.
- [16] EATON, Jeffrey W. et al. *HIV Treatment as Prevention: Systematic Comparison of Mathematical Models of the Potential Impact of Antiretroviral Therapy on HIV Incidence in South Africa*. **PLoS Medicine**, v. 9, n. 7, e1001245, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001245>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 40.
- [17] EDELSTEIN-KESHET, Leah. **Mathematical Models in Biology**. Philadelphia: SIAM, 2005. P. 586. ISBN 978-0-89871-554-5. Disponível em: <<https://doi.org/>>

- 10.1137/1.9780898719147>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado nas pp. 39, 40, 42, 47, 48, 50.
- [18] FIOCRUZ, Fundação Oswaldo Cruz. **O longo trajeto da dengue no Brasil**. 2023. Disponível em: <<https://www.ioc.fiocruz.br/dengue/textos/longatraje.html>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 28.
- [19] FIOCRUZ, Fundação Oswaldo Cruz. **Portal Fiocruz**. 2024. Disponível em: <<http://www.fiocruz.br>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 20.
- [20] FREITAS, Andre Ricardo Ribas. **Pesquisa revela que a febre chikungunya, confundida com a dengue, é mais perigosa e fatal do que se imaginava**. Fev. 2024. Disponível em: <<https://theconversation.com/pesquisa-revela-que-a-febre-chikungunya-confundida-com-a-dengue-e-mais-perigosa-e-fatal-do-que-se-imaginava-220381>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 33.
- [21] IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **De 2010 a 2022, população brasileira cresce 6,5% e chega a 203,1 milhões**. Jun. 2023. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37237-de-2010-a-2022-populacao-brasileira-cresce-6-5-e-chega-a-203-1-milhoes>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 73.
- [22] KERMACK, William Ogilvy; MCKENDRICK, Anderson G. **A contribution to the mathematical theory of epidemics**. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, The Royal Society, v. 115, n. 772, p. 700–721, ago. 1927. ISSN 0950-1207. Disponível em: <<https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 47.
- [23] LIMA, Letícia Ferreira. **Análise do comportamento de oviposição do mosquito *Aedes aegypti* em Paquetá/RJ**. 2017. Dissertação (Mestrado em Biologia Computacional e Sistemas) – Instituto Oswaldo Cruz, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro. Orientadora: Dra. Renata Schama. Disponível em: <<https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/23799>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 75.
- [24] MARANHO, Luiz Cesar. **Aplicação do Método de Linearização de Lyapunov na Análise de uma Dinâmica Não Linear Para Controle Populacional do Mosquito *Aedes aegypti***. 2018. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru. Orientadora: Profa. Dra. Célia Aparecida dos Reis. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/items/ef1697d9-74fd-4e44-b5c6-632ffc44d2fe/full>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 14.

- [25] MARINS, Lázaro Rodrigo de. **Diagnóstico médico por meio de relações fuzzy: dengue, chikungunya ou zika**. 2016. Dissertação (Mestrado em Matemática) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba. Orientadora: Prof^a. Dr^a. Magda da Silva Peixoto. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/12072>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 14.
- [26] MARTINS, André; FURLAN, Letícia. *Censo 2022: veja quantas casas e apartamentos têm na sua cidade*. **Exame**, fev. 2024. Disponível em: <<https://exame.com/brasil/censo-2022-veja-quantas-casas-e-apartamentos-tem-na-sua-cidade/>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 74.
- [27] MASSAO, Lucas. *Como é a anatomia do mosquito da dengue?* **Superinteressante**, fev. 2024. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-e-a-anatomia-do-mosquito-da-dengue>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 26.
- [28] MURRAY, J. D. **Mathematical Biology: I. An Introduction**. 3. ed. New York: Springer, 2002. v. 17. (Interdisciplinary Applied Mathematics). Disponível em: <<http://debian.if.ufrgs.br/pub/listas-sistdin/MurrayI.pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado nas pp. 14, 39, 40, 42, 43, 48, 50.
- [29] NATGEO, National Geographic Brasil. **Mudanças climáticas aumentam casos de doenças como dengue e chikungunya**. Nov. 2022. Disponível em: <<https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2022/11/mudancas-climaticas-aumentam-casos-de-doencas-como-dengue-e-chikungunya>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 17.
- [30] OLIVEIRA, Stéfano Alves de. **Uma Análise da Longevidade do Aedes aegypti e do EIP da Dengue em Diferentes Configurações Climáticas**. 2022. Tese (Doutorado em Matemática) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Orientador: César Augusto Rodrigues Castilho. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/48777>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado nas pp. 18, 75, 77.
- [31] PAHO. **Pan American Health Organization**. 2024. Disponível em: <<http://www.paho.org>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 20.
- [32] PAHO, Pan American Health Organization. **Chikungunya**. 2023. Disponível em: <<https://www.paho.org/en/topics/chikungunya>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado nas pp. 25, 27, 29, 32.
- [33] PAHO, Pan American Health Organization. **Vectors: Integrated management and public health entomology**. 2024. Disponível em: <<https://www.paho.org/en/topics/vectors-integrated-management-and-public-health-entomology>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado nas pp. 17, 18.

- [34] PYTHON, Software Foundation. **Python Programming Language**. 2024. Disponível em: <<https://www.python.org/>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 80.
- [35] SOUZA, William M de et al. **Spatiotemporal dynamics and recurrence of chikungunya virus in Brazil: an epidemiological study**. *The Lancet Microbe*, v. 4, n. 5, e319–e329, 2023. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S2666-5247\(23\)00033-2](https://doi.org/10.1016/S2666-5247(23)00033-2)>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado nas pp. 33, 73.
- [36] UNITED STATES, Centers for Disease Control; PREVENTION. **CDC website**. [S. l.: s. n.], 2024. Disponível em: <<http://www.cdc.gov>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 20.
- [37] WHO, World Health Organization. **Chikungunya**. Dez. 2022. Disponível em: <<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/chikungunya>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado nas pp. 29, 33.
- [38] WHO, World Health Organization. **Dengue and severe dengue**. Abr. 2024. Disponível em: <<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe-dengue>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 25.
- [39] WHO, World Health Organization. **Global Arbovirus Initiative**. Maio 2024. Disponível em: <<https://www.who.int/initiatives/global-arbovirus-initiative>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 24.
- [40] WHO, World Health Organization. **Vector-borne diseases**. Mar. 2020. Disponível em: <<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/vector-borne-diseases>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado nas pp. 17, 19.
- [41] WHO, World Health Organization. **World Health Organization**. 2024. Disponível em: <<https://www.who.int/>>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 20.
- [42] ZARA, Ana Laura de Sene Amâncio et al. *Estratégias de controle do Aedes aegypti: uma revisão*. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 25, n. 2, p. 391–404, 2016. DOI: 10.5123/S1679-49742016000200017. Disponível em: <http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-497420160002000391&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 24 jun. 2024. Citado na p. 104.

APÊNDICE A – ENSINO FUNDAMENTAL

AULA PARA O 9º ANO DO ENSINO FUNDAMENTAL

Configuração do Projeto

Turma

- 9º ano das séries finais do Ensino Fundamental.

Tempo

- 6 aulas de 50 minutos cada.

Objetivos Gerais

- **Compreender a importância da epidemiologia na saúde pública:** Introduzir os alunos aos conceitos básicos de epidemiologia, explicando o que é e como se estuda a distribuição e os determinantes das doenças em populações. Os alunos entenderão o papel crucial da epidemiologia no controle e prevenção de doenças, como a Chikungunya, e como ela contribui para a saúde pública. Através de exemplos práticos e estudos de caso, os alunos irão compreender a importância da vigilância epidemiológica, das campanhas de prevenção e do planejamento de intervenções de saúde pública.
- **Aplicar conceitos matemáticos na análise de dados epidemiológicos:** Aplicação de conceitos matemáticos essenciais, como porcentagem, média e construção de gráficos, para a interpretação de dados epidemiológicos. Os alunos aprenderão a calcular taxas de incidência e prevalência, interpretar proporções e médias, e utilizar esses cálculos para analisar dados sobre a Chikungunya. Essa aplicação prática dos conceitos matemáticos permitirá aos alunos compreender a importância dos números na tomada de decisões em saúde pública e no planejamento de intervenções eficazes.
- **Desenvolver habilidades de interpretação de gráficos e cálculos estatísticos:** Os alunos serão capacitados para construir e interpretar diferentes tipos de gráficos, como gráficos de barras e gráficos de pizza, utilizando dados reais de Chikungunya. Este objetivo visa desenvolver a habilidade dos alunos em visualizar dados, identificar padrões e tendências, e comunicar informações de maneira clara e precisa. A prática

de cálculos estatísticos simples, como médias e porcentagens, também será enfatizada para fortalecer a compreensão dos alunos sobre a análise de dados.

- **Incentivar a pesquisa e a análise crítica de dados reais:** Incentivar os alunos a desenvolver projetos de pesquisa, promovendo o pensamento crítico e a investigação científica. Os alunos serão encorajados a formular perguntas de pesquisa, coletar e analisar dados, e apresentar suas conclusões. Através desse processo, os alunos aprenderão a importância da metodologia científica, a ética na pesquisa e a aplicação prática do conhecimento adquirido. Essa experiência também visa desenvolver habilidades de apresentação e comunicação, fundamentais para o compartilhamento de resultados científicos.

Competências Gerais da BNCC

- **Competência 1:** Valorizar e utilizar os conhecimentos históricos e culturais acumulados para compreender a importância da epidemiologia.
- **Competência 2:** Exercitar a curiosidade intelectual e recorrer à investigação científica para a análise de dados epidemiológicos.
- **Competência 4:** Utilizar diferentes linguagens – verbal, corporal, visual, sonora e digital – para expressar e compartilhar informações.
- **Competência 5:** Fazer observações sistemáticas de aspectos quantitativos e qualitativos da realidade.
- **Competência 7:** Desenvolver o raciocínio lógico, o espírito de investigação científica e a capacidade de análise crítica.

Objetivos Específicos

- Compreender a definição e a importância da epidemiologia.
- Identificar os principais aspectos da Chikungunya, incluindo transmissão, sintomas e prevenção.
- Calcular porcentagens e médias utilizando dados reais.
- Construir gráficos de barras e de pizza.
- Interpretar gráficos e tabelas epidemiológicas.
- Analisar dados epidemiológicos e discutir medidas preventivas.
- Desenvolver e apresentar projetos de pesquisa sobre Chikungunya.

Competências Matemáticas da BNCC

- **Competência 1:** Compreender as relações entre conceitos e processos matemáticos.
- **Competência 2:** Desenvolver o raciocínio lógico, o espírito de investigação e a capacidade de resolver problemas.
- **Competência 3:** Utilizar diferentes linguagens matemáticas para comunicar ideias e resultados.

Habilidades da BNCC

- **EF09MA01:** Reconhecer que, uma vez fixada uma unidade de medida, um número real pode ser representado por uma expressão decimal.
- **EF09MA02:** Reconhecer um número irracional como um número que não pode ser escrito na forma de uma fração.
- **EF09MA03:** Efetuar cálculos com números reais, incluindo potências com expoentes negativos e fracionários.
- **EF09MA04:** Ler e interpretar gráficos e tabelas.
- **EF09MA05:** Construir gráficos de barras e gráficos de pizza com dados fornecidos.
- **EF09MA06:** Analisar e interpretar dados epidemiológicos.

Conteúdo

- **Epidemiologia:** Definição, importância e histórico.
- **Chikungunya:** Transmissão, sintomas e medidas de prevenção.
- **Matemática Aplicada:** Conceitos de porcentagem, média e estatística básica.
- **Representação de Dados:** Construção e interpretação de gráficos de barras e de pizza.
- **Análise de Dados:** Métodos de análise de dados epidemiológicos e discussão de resultados.
- **Metodologia de Pesquisa:** Desenvolvimento de projetos de pesquisa e apresentação de resultados.

Atividades

- Exposição teórica sobre epidemiologia e Chikungunya.
- Exercícios práticos de cálculos matemáticos (porcentagens e médias).
- Construção de gráficos de barras e de pizza.
- Análise e discussão de dados epidemiológicos.
- Desenvolvimento e apresentação de projetos de pesquisa.
- Simulação prática de controle de epidemia.

Recursos

- Slides informativos.
- Planilhas com dados fictícios.
- Material gráfico: papel quadriculado, lápis de cor, régua.
- Quadro branco ou lousa.
- Computador e projetor.

Avaliação

- Participação ativa nas atividades e discussões.
- Precisão nos cálculos matemáticos e qualidade dos gráficos construídos.
- Clareza e coesão nos projetos de pesquisa e apresentações.
- Desempenho na simulação prática, avaliando a capacidade de trabalho em equipe e aplicação dos conceitos aprendidos.

Plano de Aula Detalhado

Aula 1: Introdução à Epidemiologia e Chikungunya

Introdução (10 minutos)

1. Boas-vindas e Introdução ao Tema:

- Cumprimente os alunos de forma amigável e faça uma breve introdução sobre o que será abordado na aula.

- Diga aos alunos que o objetivo da aula é introduzir conceitos básicos de epidemiologia e fornecer uma compreensão sobre a Chikungunya, uma doença transmitida por mosquitos que tem impacto significativo na saúde pública.

2. Importância da Epidemiologia:

- Explique o que é epidemiologia: “*A epidemiologia é a ciência que estuda a distribuição, os determinantes e os fatores de controle de doenças em populações.*”
- Destaque a importância da epidemiologia na saúde pública, mencionando como ela ajuda a entender como as doenças se espalham e quais são os melhores métodos para controlá-las.
- Utilize exemplos práticos, como a COVID-19, para ilustrar a importância da epidemiologia no controle de pandemias.

3. Relevância da Chikungunya:

- Introduza a Chikungunya, explicando que é uma doença viral transmitida por mosquitos do gênero *Aedes*.
- Descreva brevemente a história da Chikungunya, incluindo onde e quando foi identificada pela primeira vez.
- Mencione a importância de estudar a Chikungunya no contexto atual devido aos surtos ocorridos nos últimos anos.

Desenvolvimento (30 minutos)

1. Apresentação sobre Epidemiologia (15 minutos):

- Utilize slides para apresentar conceitos básicos de epidemiologia.
- **Slide 1:** Definição de epidemiologia e sua importância.
- **Slide 2:** Principais objetivos da epidemiologia: descrever, explicar, prever e controlar doenças.
- **Slide 3:** Exemplos de estudos epidemiológicos e como eles impactam a saúde pública.
- **Slide 4:** Introdução ao ciclo de uma epidemia: fontes de infecção, modos de transmissão e hospedeiros suscetíveis.
- Faça pausas entre os slides para perguntas e esclarecimentos, incentivando a participação dos alunos.

2. Vídeo sobre Chikungunya (5 minutos):

- Mostre um vídeo curto (3-5 minutos) sobre a Chikungunya, destacando a transmissão, sintomas e medidas preventivas.
- Utilize um vídeo educativo de uma fonte confiável, como o Ministério da Saúde ou uma organização internacional de saúde.

3. Discussão sobre Chikungunya (10 minutos):

- Após o vídeo, conduza uma discussão com os alunos sobre o que aprenderam.
- Pergunte sobre as partes mais impactantes do vídeo e peça aos alunos para resumirem os pontos principais (transmissão, sintomas, prevenção).
- Utilize um quadro branco para anotar as respostas dos alunos e estruturar as informações discutidas.

4. Slide sobre Transmissão da Chikungunya (5 minutos):

- **Slide 5:** Explique em detalhes o ciclo de transmissão da Chikungunya: do mosquito infectado ao ser humano e vice-versa.
- Utilize diagramas e imagens para ilustrar o ciclo de vida do mosquito *Aedes* e o processo de transmissão do vírus.
- Mencione as principais medidas preventivas, como evitar água parada e usar repelentes.

Atividade Prática (10 minutos)

1. Discussão em Grupo sobre Medidas Preventivas:

- Divida a turma em pequenos grupos (3-4 alunos por grupo).
- Dê a cada grupo um cenário fictício de uma comunidade afetada pela Chikungunya.
- Peça aos grupos para discutirem e listar as medidas preventivas que adotariam para controlar a epidemia na comunidade.
- Após 5 minutos de discussão, peça a um representante de cada grupo para compartilhar as ideias discutidas com a turma.

2. Análise das Medidas Preventivas:

- Comente sobre as ideias apresentadas pelos grupos, destacando as medidas mais eficazes e corrigindo qualquer concepção errada.
- Enfatize a importância de cada medida preventiva e como elas ajudam a controlar a disseminação da doença.

Conclusão e Encerramento (5 minutos)

1. Recapitulação:

- Faça um breve resumo dos principais pontos abordados na aula: definição de epidemiologia, importância da Chikungunya, transmissão e medidas preventivas.
- Reforce a relevância de entender a epidemiologia e as estratégias de controle de doenças para a saúde pública.

2. Preparação para a Próxima Aula:

- Informe aos alunos que na próxima aula eles aprenderão sobre a aplicação de conceitos matemáticos na análise de dados epidemiológicos.
- Incentive os alunos a refletirem sobre como a matemática pode ser utilizada para entender melhor a disseminação de doenças.

3. Perguntas Finais:

- Abra um espaço para perguntas finais, permitindo que os alunos esclareçam quaisquer dúvidas restantes.
- Agradeça a participação ativa dos alunos e encoraje-os a continuar interessados no tema.

- Recursos

- Slides informativos.
- Vídeo educativo sobre Chikungunya.
- Quadro branco e marcadores.
- Materiais para escrita (papel e canetas para a atividade em grupo).

- Avaliação

- Participação ativa nas discussões.
- Envolvimento e contribuição na atividade em grupo.
- Interesse demonstrado durante a apresentação e vídeo.

Aula 2: Matemática Aplicada à Epidemiologia

Introdução (10 minutos)

1. Recapitulação dos Conceitos de Epidemiologia:

- Cumprimente os alunos e faça uma breve recapitulação dos conceitos discutidos na aula anterior.
- Pergunte aos alunos o que lembram sobre epidemiologia e Chikungunya, incentivando a participação ativa.
- Reforce a importância da epidemiologia na saúde pública e a relevância do estudo da Chikungunya.

2. Introdução à Matemática Aplicada à Epidemiologia:

- Explique que nesta aula os alunos aprenderão a aplicar conceitos matemáticos para analisar dados epidemiológicos.
- Destaque a importância da matemática na interpretação de dados e na tomada de decisões em saúde pública.
- Explique que serão abordados conceitos como porcentagem, média e construção de gráficos.

Desenvolvimento (30 minutos)

1. Apresentação sobre Porcentagem e Média (10 minutos):

- Utilize slides para explicar os conceitos de porcentagem e média.
- **Slide 1:** Definição de porcentagem e como calcular.
- **Slide 2:** Exemplos práticos de cálculos de porcentagem.
- **Slide 3:** Definição de média e como calcular.
- **Slide 4:** Exemplos práticos de cálculos de média.
- Faça pausas entre os slides para perguntas e esclarecimentos, incentivando a participação dos alunos.

2. Exercícios Práticos de Porcentagem e Média (10 minutos):

- Distribua planilhas com dados fictícios de Chikungunya (número de casos em diferentes regiões, número total de habitantes, etc.).
- Peça aos alunos para calcular a porcentagem de casos em relação ao número total de habitantes em cada região.

- Oriente os alunos a calcular a média de casos de Chikungunya em todas as regiões.
- Circule pela sala para fornecer suporte e esclarecer dúvidas durante a realização dos cálculos.

3. Discussão dos Resultados (10 minutos):

- Peça a alguns alunos voluntários para apresentarem seus cálculos e resultados.
- Utilize um quadro branco para anotar e discutir os resultados apresentados pelos alunos.
- Reforce a importância da precisão nos cálculos matemáticos e como eles ajudam na interpretação de dados epidemiológicos.
- Discuta como a porcentagem e a média podem ser usadas para tomar decisões informadas em saúde pública.

Atividade Prática (10 minutos)

1. Análise de Dados Fictícios:

- Divida a turma em pequenos grupos (3-4 alunos por grupo).
- Dê a cada grupo um conjunto de dados fictícios de Chikungunya (número de casos em diferentes períodos do ano, distribuição de casos por idade, etc.).
- Peça aos grupos para calcular a porcentagem de casos em cada período e a média de casos por faixa etária.
- Oriente os grupos a discutir como esses dados poderiam ser utilizados para planejar intervenções de saúde pública.

2. Apresentação dos Grupos:

- Após 5 minutos de análise, peça a um representante de cada grupo para compartilhar as conclusões com a turma.
- Discuta as diferentes interpretações dos dados apresentados pelos grupos, destacando os pontos mais relevantes.
- Reforce a importância da análise crítica dos dados para a tomada de decisões eficazes.

Conclusão e Encerramento (5 minutos)

1. Recapitulação:

- Faça um breve resumo dos principais pontos abordados na aula: conceitos de porcentagem e média, aplicação desses conceitos na análise de dados epidemiológicos.
- Reforce a importância da matemática na interpretação de dados epidemiológicos e na tomada de decisões em saúde pública.

2. Preparação para a Próxima Aula:

- Informe aos alunos que na próxima aula eles aprenderão sobre a construção e interpretação de gráficos.
- Incentive os alunos a refletirem sobre como os gráficos podem ajudar a visualizar e interpretar dados epidemiológicos.

3. Perguntas Finais:

- Abra um espaço para perguntas finais, permitindo que os alunos esclareçam quaisquer dúvidas restantes.
- Agradeça a participação ativa dos alunos e encoraje-os a continuar interessados no tema.

- Recursos

- Slides informativos.
- Planilhas com dados fictícios de Chikungunya.
- Calculadoras.
- Quadro branco e marcadores.
- Materiais para escrita (papel e canetas para a atividade em grupo).

- Avaliação

- Participação ativa nas discussões.
- Precisão nos cálculos realizados durante os exercícios práticos.
- Envolvimento e contribuição na atividade em grupo.
- Interesse demonstrado durante a apresentação e discussão dos resultados.

Aula 3: Construção e Interpretação de Gráficos

Introdução (10 minutos)

1. Recapitulação dos Conceitos de Porcentagem e Média:

- Cumprimente os alunos e faça uma breve recapitulação dos conceitos discutidos na aula anterior.
- Pergunte aos alunos o que lembram sobre porcentagem e média, incentivando a participação ativa.
- Reforce a importância desses conceitos na análise de dados epidemiológicos.

2. Introdução à Construção e Interpretação de Gráficos:

- Explique que nesta aula os alunos aprenderão a construir e interpretar gráficos utilizando dados epidemiológicos.
- Destaque a importância dos gráficos na visualização e interpretação de dados.
- Explique que serão abordados diferentes tipos de gráficos, como gráficos de barras e gráficos de pizza.

Desenvolvimento (30 minutos)

1. Apresentação sobre Tipos de Gráficos (15 minutos):

- Utilize slides para explicar os diferentes tipos de gráficos.
- **Slide 1:** Definição e exemplos de gráficos de barras.
- **Slide 2:** Definição e exemplos de gráficos de pizza.
- **Slide 3:** Quando utilizar cada tipo de gráfico.
- **Slide 4:** Exemplos práticos de gráficos utilizando dados epidemiológicos.
- Faça pausas entre os slides para perguntas e esclarecimentos, incentivando a participação dos alunos.

2. Exercícios Práticos de Construção de Gráficos (15 minutos):

- Distribua planilhas com dados fictícios de Chikungunya (número de casos por região, faixa etária, etc.).
- Peça aos alunos para construírem gráficos de barras e gráficos de pizza utilizando os dados fornecidos.
- Oriente os alunos sobre como organizar os dados e construir os gráficos corretamente.

- Circule pela sala para fornecer suporte e esclarecer dúvidas durante a atividade.

Discussão e Interpretação dos Gráficos (10 minutos)

1. Apresentação dos Gráficos:

- Peça a alguns alunos voluntários para apresentarem os gráficos que construíram.
- Utilize um quadro branco ou projetor para exibir os gráficos dos alunos e discutir as interpretações.

2. Análise e Discussão:

- Analise os gráficos apresentados, discutindo os padrões e tendências observados.
- Explique como interpretar os dados representados nos gráficos e como essa interpretação pode ajudar na tomada de decisão em saúde pública.
- Reforce a importância da precisão e clareza na construção de gráficos.

Atividade Prática (10 minutos)

1. Construção de Gráficos em Grupo:

- Divida a turma em pequenos grupos (3-4 alunos por grupo).
- Dê a cada grupo um conjunto de dados fictícios de Chikungunya (número de casos em diferentes regiões, faixa etária, etc.).
- Peça aos grupos para construírem gráficos de barras e gráficos de pizza utilizando os dados fornecidos.
- Oriente os grupos a discutir e interpretar os dados representados nos gráficos.

2. Apresentação dos Grupos:

- Após 5 minutos de construção, peça a um representante de cada grupo para compartilhar os gráficos e interpretações com a turma.
- Discuta as diferentes interpretações apresentadas pelos grupos, destacando os pontos mais relevantes.
- Reforce a importância da análise crítica e da comunicação clara dos dados representados nos gráficos.

Conclusão e Encerramento (5 minutos)

1. Recapitulação:

- Faça um breve resumo dos principais pontos abordados na aula: tipos de gráficos, construção e interpretação de gráficos.
- Reforce a importância dos gráficos na visualização e interpretação de dados epidemiológicos.

2. Preparação para a Próxima Aula:

- Informe aos alunos que na próxima aula eles aprenderão sobre a análise de dados epidemiológicos utilizando gráficos.
- Incentive os alunos a refletirem sobre como os gráficos podem ajudar na análise e interpretação de dados.

3. Perguntas Finais:

- Abra um espaço para perguntas finais, permitindo que os alunos esclareçam quaisquer dúvidas restantes.
- Agradeça a participação ativa dos alunos e encoraje-os a continuar interessados no tema.

- Recursos

- Slides informativos.
- Planilhas com dados fictícios de Chikungunya.
- Papel quadriculado, lápis de cor e régua.
- Quadro branco e marcadores.
- Materiais para escrita (papel e canetas para a atividade em grupo).

- Avaliação

- Participação ativa nas discussões.
- Qualidade e precisão dos gráficos construídos.
- Envolvimento e contribuição na atividade em grupo.
- Interesse demonstrado durante a apresentação e discussão dos gráficos.

Aula 4: Análise de Dados Epidemiológicos

Introdução (10 minutos)

1. Recapitulação dos Conceitos de Construção e Interpretação de Gráficos:

- Cumprimente os alunos e faça uma breve recapitulação dos conceitos discutidos na aula anterior.
- Pergunte aos alunos o que lembram sobre construção e interpretação de gráficos, incentivando a participação ativa.
- Reforce a importância dos gráficos na visualização e interpretação de dados epidemiológicos.

2. Introdução à Análise de Dados Epidemiológicos:

- Explique que nesta aula os alunos aprenderão a analisar dados epidemiológicos utilizando os gráficos construídos.
- Destaque a importância da análise crítica dos dados para a tomada de decisões em saúde pública.
- Explique que serão abordados métodos de análise de dados e a interpretação de resultados.

Desenvolvimento (30 minutos)

1. Apresentação sobre Métodos de Análise de Dados (15 minutos):

- Utilize slides para explicar os diferentes métodos de análise de dados.
- **Slide 1:** Introdução à análise de dados epidemiológicos.
- **Slide 2:** Métodos de análise descritiva: média, mediana e moda.
- **Slide 3:** Métodos de análise inferencial: testes de hipóteses e intervalos de confiança.
- **Slide 4:** Exemplos práticos de análise de dados utilizando gráficos.
- Faça pausas entre os slides para perguntas e esclarecimentos, incentivando a participação dos alunos.

2. Exercícios Práticos de Análise de Dados (15 minutos):

- Distribua planilhas com dados fictícios de Chikungunya (número de casos por região, faixa etária, etc.).
- Peça aos alunos para analisar os dados utilizando os métodos discutidos (média, mediana, moda, etc.).

- Oriente os alunos sobre como interpretar os resultados das análises e discutir suas implicações.
- Circule pela sala para fornecer suporte e esclarecer dúvidas durante a atividade.

Discussão e Interpretação dos Resultados (10 minutos)

1. Apresentação dos Resultados:

- Peça a alguns alunos voluntários para apresentarem os resultados das análises que realizaram.
- Utilize um quadro branco ou projetor para exibir os resultados dos alunos e discutir as interpretações.

2. Análise e Discussão:

- Analise os resultados apresentados, discutindo os padrões e tendências observados.
- Explique como interpretar os dados analisados e como essa interpretação pode ajudar na tomada de decisão em saúde pública.
- Reforce a importância da precisão e clareza na análise de dados epidemiológicos.

Atividade Prática (10 minutos)

1. Análise de Dados em Grupo:

- Divida a turma em pequenos grupos (3-4 alunos por grupo).
- Dê a cada grupo um conjunto de dados fictícios de Chikungunya (número de casos em diferentes períodos do ano, distribuição de casos por idade, etc.).
- Peça aos grupos para analisar os dados utilizando os métodos discutidos (média, mediana, moda, etc.).
- Oriente os grupos a discutir e interpretar os resultados das análises.

2. Apresentação dos Grupos:

- Após 5 minutos de análise, peça a um representante de cada grupo para compartilhar os resultados e interpretações com a turma.
- Discuta as diferentes interpretações apresentadas pelos grupos, destacando os pontos mais relevantes.
- Reforce a importância da análise crítica e da comunicação clara dos dados analisados.

Conclusão e Encerramento (5 minutos)

1. Recapitulação:

- Faça um breve resumo dos principais pontos abordados na aula: métodos de análise de dados, interpretação de resultados.
- Reforce a importância da análise de dados epidemiológicos na tomada de decisões em saúde pública.

2. Preparação para a Próxima Aula:

- Informe aos alunos que na próxima aula eles participarão de uma simulação prática de controle de epidemia.
- Incentive os alunos a refletirem sobre como a análise de dados pode ajudar no planejamento e execução de medidas de controle de doenças.

3. Perguntas Finais:

- Abra um espaço para perguntas finais, permitindo que os alunos esclareçam quaisquer dúvidas restantes.
- Agradeça a participação ativa dos alunos e encoraje-os a continuar interessados no tema.

- Recursos

- Slides informativos.
- Planilhas com dados fictícios de Chikungunya.
- Calculadoras.
- Quadro branco e marcadores.
- Materiais para escrita (papel e canetas para a atividade em grupo).

- Avaliação

- Participação ativa nas discussões.
- Precisão nas análises realizadas durante os exercícios práticos.
- Envolvimento e contribuição na atividade em grupo.
- Interesse demonstrado durante a apresentação e discussão dos resultados.

Aula 5: Simulação Prática de Controle de Epidemia (Parte 1)

Introdução (10 minutos)

1. Contextualização da Atividade:

- Cumprimente os alunos e explique que a aula de hoje será uma simulação prática onde eles aplicarão os conceitos aprendidos para controlar um surto fictício de Chikungunya.
- Descreva o cenário da simulação: uma cidade fictícia está enfrentando um surto de Chikungunya, e os alunos, como especialistas, precisam desenvolver um plano de ação para controlar a epidemia.
- Destaque a importância da atividade como uma oportunidade para aplicar conhecimentos teóricos em um contexto prático.

2. Divisão em Grupos e Distribuição de Papéis:

- Divida a turma em pequenos grupos, cada um representando uma equipe de especialistas (por exemplo, equipe de epidemiologistas, equipe de matemáticos, equipe de saúde pública, etc.).
- Garanta que os grupos sejam equilibrados em termos de habilidades e conhecimentos dos alunos.
- Atribua a cada grupo um conjunto específico de tarefas e responsabilidades dentro da simulação. Explique claramente as funções de cada grupo e como elas se complementam.

Desenvolvimento da Simulação (30 minutos)

1. Análise de Dados:

- Forneça aos grupos planilhas com dados fictícios sobre a epidemia (número de casos, áreas afetadas, etc.).
- Oriente os grupos a analisar esses dados e identificar padrões. Eles podem usar os conceitos de porcentagem, média e gráficos aprendidos nas aulas anteriores.
- Incentive os grupos a considerar diferentes abordagens, como campanhas de prevenção, estratégias de vacinação, medidas de controle do vetor, etc.
- Estimule a colaboração entre os diferentes grupos, permitindo que compartilhem suas estratégias e discutam a melhor abordagem conjunta.
- Facilite a comunicação entre os grupos, destacando a importância do trabalho em equipe.

Preparação para Apresentação (10 minutos)

1. Desenvolvimento das Estratégias:

- Cada grupo deve desenvolver suas estratégias específicas para controlar a epidemia, baseando-se nos dados analisados.
- Oriente os grupos a preparar uma apresentação clara e concisa de suas estratégias.
- Circule pela sala para fornecer suporte e esclarecer dúvidas durante a preparação.

Conclusão e Encerramento (5 minutos)

1. Preparação para a Próxima Aula:

- Informe aos alunos que na próxima aula eles apresentarão suas estratégias e discutirão as diferentes abordagens.
- Incentive os alunos a revisar os dados e estratégias discutidos para uma apresentação eficaz.

- Recursos

- Planilhas com dados fictícios sobre a epidemia.
- Materiais para escrita (papel, canetas, cartazes).
- Quadro branco e marcadores para anotações e orientações.

- Avaliação

- Participação ativa na análise de dados e desenvolvimento de estratégias.
- Capacidade de colaboração e comunicação entre os grupos.

Aula 6: Simulação Prática de Controle de Epidemia (Parte 2)

Revisão e Preparação (10 minutos)

1. Revisão das Atividades Anteriores:

- Inicie a aula revisando rapidamente as atividades e estratégias desenvolvidas na aula anterior.

- Garanta que todos os grupos estejam prontos para a apresentação de suas estratégias.

Apresentação das Estratégias (25 minutos)

1. Apresentação dos Grupos:

- Cada grupo terá um tempo determinado (cerca de 5 minutos) para apresentar suas estratégias à turma.
- Os grupos devem explicar como planejam controlar a epidemia e justificar suas escolhas baseadas nos dados analisados.
- Utilize um quadro branco ou projetor para exibir as apresentações dos grupos.

2. Feedback e Discussão:

- Após cada apresentação, forneça feedback construtivo, destacando os pontos fortes e sugerindo melhorias.
- Incentive os alunos a fazer perguntas e promover um debate saudável sobre as estratégias apresentadas.

Discussão e Reflexão (10 minutos)

1. Análise das Estratégias:

- Promova uma discussão geral sobre as estratégias apresentadas, incentivando a turma a refletir sobre as diferentes abordagens e suas eficácias.
- Destaque a importância da colaboração interdisciplinar e do uso de dados na tomada de decisões informadas em saúde pública.

2. Reflexão sobre o Aprendizado:

- Encoraje os alunos a compartilhar o que aprenderam com a atividade e como podem aplicar esses conhecimentos em outras situações.
- Reforce a importância de aplicar conhecimentos teóricos em contextos práticos e reais.

Conclusão e Encerramento (5 minutos)

1. Recapitulação:

- Faça um breve resumo dos principais pontos abordados na aula: desenvolvimento e apresentação de estratégias de controle de epidemia.

- Reforce a importância da análise de dados e da colaboração interdisciplinar na tomada de decisões em saúde pública.

2. Encerramento:

- Agradeça a participação ativa dos alunos durante a simulação prática.
- Encoraje os alunos a continuar aplicando os conhecimentos adquiridos em situações reais e a se interessarem por temas de saúde pública e epidemiologia.

- Recursos

- Computador e projetor para a apresentação das estratégias.
- Quadro branco e marcadores para anotações e orientações.

- Avaliação

- Qualidade e clareza das estratégias apresentadas.
- Participação na discussão e reflexão sobre as estratégias.
- Habilidade dos alunos em comunicar suas ideias de maneira eficaz durante as apresentações.

APÊNDICE B – ENSINO MÉDIO

AULA PARA O 3º ANO DO ENSINO MÉDIO

Configuração do Projeto

Turma

- 3º ano do ensino médio.

Tempo

- 6 aulas de 50 minutos cada.

Objetivos Gerais

- **Compreender a importância da epidemiologia na saúde pública:** Introduzir os alunos aos conceitos avançados de epidemiologia, explicando o que é e como se estuda a distribuição e os determinantes das doenças em populações. Os alunos entenderão o papel crucial da epidemiologia no controle e prevenção de doenças, como a Chikungunya, e como ela contribui para a saúde pública. Através de exemplos práticos e estudos de caso, os alunos irão compreender a importância da vigilância epidemiológica, das campanhas de prevenção e do planejamento de intervenções de saúde pública. Eles também explorarão a inter-relação entre a epidemiologia e outras disciplinas científicas e como a epidemiologia se aplica a diferentes contextos de saúde pública.
- **Aplicar conceitos matemáticos na análise de dados epidemiológicos:** Aplicar conceitos matemáticos essenciais, como taxas de crescimento, modelos matemáticos de epidemias e construção de gráficos avançados, para a interpretação de dados epidemiológicos. Os alunos aprenderão a calcular taxas de crescimento, interpretar dados utilizando modelos matemáticos, e utilizar esses cálculos para analisar dados sobre a Chikungunya. Essa aplicação prática dos conceitos matemáticos permitirá aos alunos compreender a importância dos números na tomada de decisões em saúde pública e no planejamento de intervenções eficazes. Eles também aprenderão a utilizar software de análise estatística para interpretar grandes conjuntos de dados epidemiológicos.

- **Desenvolver habilidades de interpretação de gráficos e cálculos estatísticos:** Capacitar para construir e interpretar diferentes tipos de gráficos, como gráficos de dispersão e histogramas, utilizando dados fictícios e reais de Chikungunya. Este objetivo visa desenvolver a habilidade dos alunos em visualizar dados, identificar padrões e tendências, e comunicar informações de maneira clara e precisa. A prática de cálculos estatísticos avançados, como análises de correlação e regressão, também será enfatizada para fortalecer a compreensão dos alunos sobre a análise de dados. Eles aprenderão a interpretar os resultados dessas análises e a utilizá-los para tomar decisões informadas em saúde pública.
- **Incentivar a pesquisa e a análise crítica de dados reais:** Incentivar os alunos a desenvolver projetos de pesquisa, promovendo o pensamento crítico e a investigação científica. Os alunos serão encorajados a formular perguntas de pesquisa, coletar e analisar dados, e apresentar suas conclusões. Através desse processo, os alunos aprenderão a importância da metodologia científica, a ética na pesquisa e a aplicação prática do conhecimento adquirido. Essa experiência também visa desenvolver habilidades de apresentação e comunicação, fundamentais para o compartilhamento de resultados científicos. Os alunos também terão a oportunidade de trabalhar em grupos para desenvolver projetos de pesquisa colaborativos, promovendo habilidades de trabalho em equipe e liderança.
- **Aplicar conceitos de equações de diferenças através de Planilhas Eletrônicas:** Ensinar aos alunos como resolver equações de diferenças, uma técnica fundamental em modelagem matemática discreta. Os alunos aprenderão a implementar equações de diferenças em planilhas eletrônicas, permitindo-lhes aplicar os conceitos teóricos de forma prática e acessível. Eles irão resolver exercícios práticos utilizando dados reais e fictícios de Chikungunya, visualizando como as equações de diferenças podem ser utilizadas para prever a disseminação de doenças e ajudar na tomada de decisão em saúde pública. Esta abordagem prática irá desenvolver as habilidades técnicas dos alunos em ferramentas digitais e análise numérica, preparando-os para desafios acadêmicos e profissionais futuros.

Competências Gerais da Base Nacional Comum Curricular (BNCC)

- **Competência 1:** Valorizar e utilizar os conhecimentos históricos e culturais acumulados para compreender a importância da epidemiologia.
- **Competência 2:** Exercitar a curiosidade intelectual e recorrer à investigação científica para a análise de dados epidemiológicos.
- **Competência 4:** Utilizar diferentes linguagens – verbal, corporal, visual, sonora e digital – para expressar e compartilhar informações.

- **Competência 5:** Fazer observações sistemáticas de aspectos quantitativos e qualitativos da realidade.
- **Competência 7:** Desenvolver o raciocínio lógico, o espírito de investigação científica e a capacidade de análise crítica.

Objetivos Específicos

- Compreender a definição e a importância da epidemiologia.
- Identificar os principais aspectos da Chikungunya, incluindo transmissão, sintomas e prevenção.
- Calcular taxas de crescimento e interpretar dados epidemiológicos utilizando modelos matemáticos.
- Construir e interpretar gráficos avançados, como gráficos de dispersão e histogramas.
- Analisar dados epidemiológicos e discutir medidas preventivas.
- Desenvolver e apresentar projetos de pesquisa sobre Chikungunya.
- Aplicar conceitos de equações de diferenças através de planilhas eletrônicas.

Competências de Matemática da BNCC

- **Competência 1:** Compreender as relações entre conceitos e processos matemáticos.
- **Competência 2:** Desenvolver o raciocínio lógico, o espírito de investigação e a capacidade de resolver problemas.
- **Competência 3:** Utilizar diferentes linguagens matemáticas para comunicar ideias e resultados.

Habilidades da BNCC

- **EM13MAT101:** Utilizar conhecimentos matemáticos para resolver problemas reais.
- **EM13MAT202:** Analisar e interpretar dados estatísticos.
- **EM13MAT303:** Modelar situações reais utilizando funções matemáticas.
- **EM13MAT304:** Construir e interpretar gráficos de funções e dados estatísticos.

Conteúdos

- **Epidemiologia:** Definição, importância e histórico.
- **Chikungunya:** Transmissão, sintomas e medidas de prevenção.
- **Doenças Transmitidas por Vetores e Arboviroses:** Principais arboviroses do Brasil e métodos de prevenção e cuidados.
- **Matemática Aplicada:** Taxas de crescimento, modelagem matemática de epidemias e estatística avançada.
- **Representação de Dados:** Construção e interpretação de gráficos de dispersão e histogramas.
- **Análise de Dados:** Métodos de análise de dados epidemiológicos e discussão de resultados.
- **Modelos Compartimentais:** Introdução aos modelos compartimentais (SIR, SEIR, etc.), com foco detalhado no modelo SIR.
- **Métodos Numéricos:** Introdução a equações de diferenças e sua aplicação na modelagem de epidemias utilizando planilhas eletrônicas.

Observação sobre Equações de Diferenças: Neste plano de aula, utilizamos equações de diferenças para modelar a dinâmica de epidemias. As equações de diferenças são adequadas para lidar com variáveis discretas e são particularmente úteis no contexto de ensino médio. Elas proporcionam uma aproximação intuitiva e prática para os alunos, permitindo a visualização e análise da disseminação de doenças de forma simplificada. Além disso, o método de Euler, tradicionalmente aplicado na resolução de equações diferenciais ordinárias (EDOs), também pode ser utilizado em equações de diferenças, facilitando a compreensão dos conceitos matemáticos aplicados na epidemiologia.

Atividades

- Exposição teórica sobre epidemiologia e Chikungunya.
- Exercícios práticos de cálculos matemáticos (taxas de crescimento e modelos matemáticos).
- Construção de gráficos de dispersão e histogramas.
- Análise e discussão de dados epidemiológicos.
- Desenvolvimento e apresentação de projetos de pesquisa.

- Simulação prática de controle de epidemia.
- Aplicação de equações de diferenças através de planilhas eletrônicas.

Recursos

- Slides informativos.
- Planilhas com dados fictícios e reais.
- Material gráfico: papel milimetrado, lápis de cor, régua.
- Quadro branco e marcadores.
- Computador e projetor.
- Software de análise estatística (opcional).
- Planilhas eletrônicas para aplicação de equações de diferenças.

Avaliação

- Participação ativa nas atividades e discussões.
- Precisão nos cálculos matemáticos e qualidade dos gráficos construídos.
- Clareza e coesão nos projetos de pesquisa e apresentações.
- Desempenho na simulação prática, avaliando a capacidade de trabalho em equipe e aplicação dos conceitos aprendidos.
- Aplicação correta de equações de diferenças em planilhas eletrônicas.

Plano de Aula Detalhado

Aula 1: Epidemiologia e Chikungunya

Introdução (10 minutos)

1. Boas-vindas e Introdução ao Tema:

- Cumprimente os alunos e faça uma breve introdução sobre o que será abordado na aula.
- Explique a importância de estudar epidemiologia e Chikungunya no contexto atual de saúde pública.

- Apresente um panorama geral da aula, destacando os tópicos que serão abordados: epidemiologia, Chikungunya, doenças transmitidas por vetores e arboviroses, e métodos de prevenção e cuidados.

2. Definição e Importância da Epidemiologia:

- Explique o que é epidemiologia: “*A epidemiologia é a ciência que estuda a distribuição, os determinantes e os fatores de controle de doenças em populações.*”
- Utilize exemplos históricos e atuais (como a COVID-19) para ilustrar a importância da epidemiologia na saúde pública.
- Destaque como a epidemiologia ajuda a entender a disseminação de doenças, a identificar fatores de risco e a planejar intervenções eficazes.

Desenvolvimento (30 minutos)

1. Apresentação sobre Chikungunya (10 minutos):

- Utilize slides para apresentar informações detalhadas sobre a Chikungunya.
- **Slide 1:** Definição de Chikungunya e histórico da doença.
- **Slide 2:** Modo de transmissão: mosquitos *Aedes* (principais vetores).
- **Slide 3:** Sintomas principais: febre alta, dores articulares intensas, erupções cutâneas.
- **Slide 4:** Complicações possíveis e grupos de risco.
- **Slide 5:** Medidas de prevenção: controle do vetor, uso de repelentes, eliminação de criadouros de mosquitos.
- Faça pausas entre os slides para perguntas e esclarecimentos, incentivando a participação dos alunos.

2. Vídeo sobre Chikungunya (5 minutos):

- Mostre um vídeo curto (3-5 minutos) sobre a Chikungunya, destacando a transmissão, sintomas e medidas preventivas.
- Utilize um vídeo educativo de uma fonte confiável, como o Ministério da Saúde ou uma organização internacional de saúde.
- Após o vídeo, pergunte aos alunos o que mais chamou a atenção e discuta brevemente as informações apresentadas.

3. Discussão sobre Doenças Transmitidas por Vetores e Arboviroses (10 minutos):

- Apresente os principais conceitos de doenças transmitidas por vetores e arboviroses.
- **Slide 6:** Definição de doenças transmitidas por vetores e exemplos comuns (dengue, zika, Chikungunya).
- **Slide 7:** Principais arboviroses no Brasil e seu impacto na saúde pública.
- **Slide 8:** Métodos de prevenção e controle das arboviroses.
- Peça aos alunos que compartilhem exemplos de arboviroses que conhecem e discutam medidas de prevenção.

4. Discussão em Grupo sobre Métodos de Prevenção e Cuidados (5 minutos):

- Divida a turma em pequenos grupos (3-4 alunos por grupo).
- Dê a cada grupo um cenário fictício de uma comunidade afetada pela Chikungunya.
- Peça aos grupos para discutirem e listar as medidas preventivas e cuidados que adotariam para controlar a epidemia na comunidade.
- Após 5 minutos de discussão, peça a um representante de cada grupo para compartilhar as ideias discutidas com a turma.

5. Análise das Medidas Preventivas (5 minutos):

- Comente sobre as ideias apresentadas pelos grupos, destacando as medidas mais eficazes e corrigindo qualquer concepção errada.
- Enfatize a importância de cada medida preventiva e como elas ajudam a controlar a disseminação da doença.

Conclusão e Encerramento (10 minutos)

1. Recapitulação:

- Faça um breve resumo dos principais pontos abordados na aula: definição de epidemiologia, importância da Chikungunya, doenças transmitidas por vetores e arboviroses, e métodos de prevenção e cuidados.
- Reforce a relevância de entender a epidemiologia e as estratégias de controle de doenças para a saúde pública.

2. Preparação para a Próxima Aula:

- Informe aos alunos que na próxima aula eles aprenderão sobre a aplicação de conceitos matemáticos na análise de dados epidemiológicos e introdução aos modelos compartimentais.

- Incentive os alunos a refletirem sobre como a matemática pode ser utilizada para entender melhor a disseminação de doenças.

3. Perguntas Finais:

- Abra um espaço para perguntas finais, permitindo que os alunos esclareçam quaisquer dúvidas restantes.
- Agradeça a participação ativa dos alunos e encoraje-os a continuar interessados no tema.

- Recursos

- Slides informativos.
- Vídeo educativo sobre Chikungunya.
- Quadro branco e marcadores.
- Materiais para escrita (papel e canetas para a atividade em grupo).

- Avaliação

- Participação ativa nas discussões.
- Envolvimento e contribuição na atividade em grupo.
- Interesse demonstrado durante a apresentação e vídeo.

Aula 2: Matemática e Epidemiologia

Introdução (10 minutos)

1. Recapitulação da Aula Anterior:

- Cumprimente os alunos e faça uma breve recapitulação dos principais pontos abordados na aula anterior.
- Pergunte aos alunos o que mais lhes chamou a atenção sobre epidemiologia, Chikungunya e arboviroses, incentivando a participação ativa.

2. Introdução à Matemática Aplicada à Epidemiologia:

- Explique que nesta aula os alunos aprenderão como a matemática pode ser aplicada na análise de dados epidemiológicos.

- Destaque a importância da matemática na modelagem de epidemias e na previsão da disseminação de doenças.
- Apresente um panorama geral da aula, destacando os tópicos que serão abordados: conceitos matemáticos básicos, modelos compartimentais e exemplos práticos.

Desenvolvimento (30 minutos)

1. Conceitos Matemáticos Básicos (10 minutos):

- Utilize slides para apresentar conceitos matemáticos essenciais para a epidemiologia.
- **Slide 1:** Definição de taxas de crescimento e sua importância na epidemiologia.
- **Slide 2:** Introdução a equações de diferenças e sua aplicação na modelagem de epidemias.
- **Slide 3:** Exemplos práticos de cálculos de taxas de crescimento utilizando dados fictícios de Chikungunya.
- Faça pausas entre os slides para perguntas e esclarecimentos, incentivando a participação dos alunos.

2. Introdução aos Modelos Compartimentais (10 minutos):

- Explique o que são modelos compartimentais e como eles são usados na epidemiologia.
- Utilize slides para apresentar os principais modelos compartimentais.
- **Slide 4:** Introdução ao modelo SIR (Susceptível-Infetado-Recuperado).
- **Slide 5:** Descrição das equações de diferenças do modelo SIR.
- **Slide 6:** Exemplos de aplicação do modelo SIR na previsão da disseminação de epidemias.
- **Slide 7:** Outros modelos compartimentais: SEIR, SIS, etc. (breve menção).

3. Exemplos Práticos (10 minutos):

- Apresente exemplos práticos de aplicação do modelo SIR utilizando dados fictícios de Chikungunya.
- **Exemplo 1:** Calcular a taxa de crescimento da infecção utilizando dados fornecidos.
- **Exemplo 2:** Aplicar as equações de diferenças do modelo SIR para prever a disseminação da doença.

- Utilize um quadro branco para resolver os exemplos passo a passo, explicando cada etapa do cálculo.
- Peça aos alunos que acompanhem os cálculos e façam anotações.

Atividade Prática (10 minutos)

1. Exercícios em Grupo:

- Divida a turma em pequenos grupos (3-4 alunos por grupo).
- Distribua planilhas com dados fictícios de Chikungunya para cada grupo.
- Peça aos grupos para calcular as taxas de crescimento da infecção e aplicar o modelo SIR para prever a disseminação da doença.
- Oriente os grupos a discutir e registrar suas soluções.

2. Apresentação dos Resultados:

- Após 5 minutos de trabalho em grupo, peça a um representante de cada grupo para apresentar suas soluções e discussões à turma.
- Utilize um quadro branco para anotar e discutir os resultados apresentados pelos grupos.
- Comente sobre os pontos fortes das soluções e sugira melhorias quando necessário.

Conclusão e Encerramento (10 minutos)

1. Recapitulação:

- Faça um breve resumo dos principais pontos abordados na aula: conceitos matemáticos, introdução aos modelos compartimentais e exemplos práticos.
- Reforce a importância da matemática na análise de dados epidemiológicos e na previsão da disseminação de doenças.

2. Preparação para a Próxima Aula:

- Informe aos alunos que na próxima aula eles aprenderão sobre métodos numéricos, especificamente o método de Euler, e como aplicá-los na resolução de equações de diferenças utilizando planilhas eletrônicas.
- Incentive os alunos a refletirem sobre a conexão entre os conceitos matemáticos aprendidos e sua aplicação prática.

3. Perguntas Finais:

- Abra um espaço para perguntas finais, permitindo que os alunos esclareçam quaisquer dúvidas restantes.
- Agradeça a participação ativa dos alunos e encoraje-os a continuar interessados no tema.

- Recursos

- Slides informativos.
- Planilhas com dados fictícios de Chikungunya.
- Quadro branco e marcadores.
- Materiais para escrita (papel e canetas para a atividade em grupo).

- Avaliação

- Participação ativa nas discussões.
- Precisão nos cálculos realizados durante os exemplos práticos.
- Envolvimento e contribuição na atividade em grupo.
- Clareza na apresentação dos resultados dos exercícios em grupo.

Aula 3: Métodos Numéricos e o Método de Euler (Parte 1)

Introdução (10 minutos)

1. Recapitulação da Aula Anterior:

- Cumprimente os alunos e faça uma breve recapitulação dos principais pontos abordados na aula anterior.
- Pergunte aos alunos o que mais lhes chamou a atenção sobre matemática aplicada à epidemiologia e modelos compartimentais.

2. Introdução aos Métodos Numéricos:

- Explique o que são métodos numéricos e sua importância na solução de problemas matemáticos e científicos.
- Destaque que nesta aula os alunos aprenderão sobre o método de Euler, um dos métodos numéricos mais básicos e importantes.

Desenvolvimento (30 minutos)

1. Apresentação sobre Métodos Numéricos (10 minutos):

- Utilize slides para apresentar uma introdução aos métodos numéricos.
- **Slide 1:** Definição de métodos numéricos e sua aplicação.
- **Slide 2:** Exemplos de problemas que podem ser resolvidos usando métodos numéricos.
- **Slide 3:** Breve introdução ao método de Euler.
- Faça pausas entre os slides para perguntas e esclarecimentos, incentivando a participação dos alunos.

2. Detalhamento do Método de Euler (10 minutos):

- Explique detalhadamente o método de Euler e como ele é utilizado para resolver equações de diferenças.
- **Slide 4:** Formulação matemática do método de Euler.
- **Slide 5:** Passo a passo do algoritmo do método de Euler.
- **Slide 6:** Exemplo prático: Resolução de uma equação de diferenças simples utilizando o método de Euler.
- Utilize um quadro branco para resolver o exemplo passo a passo, explicando cada etapa do cálculo.

3. Exercício Guiado (10 minutos):

- Proponha um exercício guiado onde os alunos aplicam o método de Euler para resolver uma equação de diferenças simples.
- Distribua planilhas com o enunciado do problema e os passos para resolver utilizando o método de Euler.
- Oriente os alunos a seguirem os passos e realizarem os cálculos, circulando pela sala para fornecer suporte e esclarecer dúvidas.

Conclusão e Encerramento (10 minutos)**1. Recapitulação:**

- Faça um breve resumo dos principais pontos abordados na aula: introdução aos métodos numéricos e ao método de Euler.
- Reforce a importância do método de Euler na solução de equações de diferenças e na modelagem de problemas científicos.

2. Preparação para a Próxima Aula:

- Informe aos alunos que na próxima aula eles continuarão a explorar o método de Euler, desta vez aplicando-o a problemas mais complexos e utilizando planilhas eletrônicas.
- Incentive os alunos a revisarem os conceitos aprendidos e a refletirem sobre a aplicação prática do método de Euler.

3. Perguntas Finais:

- Abra um espaço para perguntas finais, permitindo que os alunos esclareçam quaisquer dúvidas restantes.
- Agradeça a participação ativa dos alunos e encoraje-os a continuar interessados no tema.

- Recursos

- Slides informativos.
- Planilhas com enunciados dos exercícios.
- Quadro branco e marcadores.
- Materiais para escrita (papel e canetas para os exercícios).

- Avaliação

- Participação ativa nas discussões.
- Precisão nos cálculos realizados durante o exercício guiado.
- Interesse demonstrado durante a apresentação e resolução dos exercícios.

Aula 4: Métodos Numéricos e o Método de Euler (Parte 2)

Introdução (10 minutos)

1. Recapitulação da Aula Anterior:

- Cumprimente os alunos e faça uma breve recapitulação dos principais pontos abordados na aula anterior sobre o método de Euler.
- Pergunte aos alunos se tiveram alguma dificuldade com o método de Euler e esclareça eventuais dúvidas.

2. Introdução ao Uso de Planilhas Eletrônicas:

- Explique que nesta aula os alunos aprenderão a aplicar o método de Euler utilizando planilhas eletrônicas.
- Destaque a importância do uso de ferramentas digitais para a resolução de problemas numéricos e a visualização de resultados.

Desenvolvimento (30 minutos)

1. Configuração Inicial da Planilha Eletrônica (10 minutos):

- Instrua os alunos a abrirem uma planilha eletrônica em seus computadores no laboratório de informática.
- Mostre passo a passo como configurar a planilha para aplicar o método de Euler.
- **Passo 1:** Definir as colunas para tempo (t), valor da função (y) e a diferença ($\Delta y/\Delta t$).
- **Passo 2:** Inserir os valores iniciais e as fórmulas necessárias para calcular os valores de y utilizando o método de Euler.
- Circulando pelo laboratório, auxilie os alunos a configurarem corretamente suas planilhas.

2. Aplicação do Método de Euler em Planilha (10 minutos):

- Proponha um problema simples onde os alunos devem aplicar o método de Euler utilizando a planilha eletrônica configurada.
- **Exemplo:** Resolução de uma equação de diferenças com condição inicial, aplicando o método de Euler para calcular os valores de y em diferentes instantes de tempo.
- Oriente os alunos a seguirem os passos mostrados na configuração inicial e a preencherem suas planilhas com os cálculos necessários.

3. Análise e Interpretação dos Resultados (10 minutos):

- Peça aos alunos que gerem gráficos a partir dos dados calculados na planilha.
- Explique como visualizar e interpretar os resultados utilizando os gráficos gerados.
- Discuta com os alunos os resultados obtidos e a precisão dos cálculos realizados.
- Destaque a importância de verificar a consistência dos resultados e de comparar com soluções analíticas, se possível.

Conclusão e Encerramento (10 minutos)

1. Recapitulação:

- Faça um breve resumo dos principais pontos abordados na aula: configuração da planilha eletrônica para o método de Euler, aplicação prática e interpretação dos resultados.
- Reforce a importância do uso de ferramentas digitais na solução de problemas numéricos.

2. Preparação para a Próxima Aula:

- Informe aos alunos que na próxima aula eles aprenderão a interpretar gráficos e tabelas, e como construir gráficos a partir de dados epidemiológicos.
- Incentive os alunos a revisarem os conceitos aprendidos e a refletirem sobre a aplicação prática do método de Euler utilizando a planilha eletrônica.

3. Perguntas Finais:

- Abra um espaço para perguntas finais, permitindo que os alunos esclareçam quaisquer dúvidas restantes.
- Agradeça a participação ativa dos alunos e encoraje-os a continuar interessados no tema.

- Recursos

- Computadores com planilha eletrônica no laboratório de informática.
- Slides informativos.
- Planilhas com enunciados dos exercícios.
- Quadro branco e marcadores.
- Materiais para escrita (papel e canetas para os exercícios).

- Avaliação

- Participação ativa nas discussões.
- Precisão nos cálculos realizados durante o exercício guiado.
- Interesse demonstrado durante a apresentação e resolução dos exercícios.
- Qualidade dos gráficos gerados a partir dos dados calculados na planilha.

Aula 5: Interpretação de Gráficos e Tabelas (Parte 1)

Introdução (10 minutos)

1. Recapitulação das Aulas Anteriores:

- Cumprimente os alunos e faça uma breve recapitulação dos principais pontos abordados nas aulas anteriores, com foco no método de Euler e o uso de planilhas eletrônicas.
- Pergunte aos alunos se tiveram alguma dificuldade com os conceitos e a aplicação prática, e esclareça eventuais dúvidas.

2. Introdução à Interpretação de Gráficos e Tabelas:

- Explique que nesta aula os alunos aprenderão a interpretar gráficos e tabelas, habilidades essenciais para a análise de dados epidemiológicos.
- Destaque a importância de saber ler e interpretar gráficos e tabelas para a compreensão de informações complexas e a tomada de decisões informadas.

Desenvolvimento (30 minutos)

1. Tipos de Gráficos e Tabelas (10 minutos):

- Utilize slides para apresentar os diferentes tipos de gráficos e tabelas comumente usados na análise de dados epidemiológicos.
- **Slide 1:** Gráficos de linha e sua aplicação na visualização de dados ao longo do tempo.
- **Slide 2:** Gráficos de barras e histogramas para representar distribuições de frequências.
- **Slide 3:** Gráficos de dispersão para visualizar relações entre duas variáveis.
- **Slide 4:** Tabelas de dados e como organizá-las para facilitar a análise.
- Faça pausas entre os slides para perguntas e esclarecimentos, incentivando a participação dos alunos.

2. Exemplos Práticos de Interpretação (10 minutos):

- Apresente exemplos práticos de gráficos e tabelas utilizando dados fictícios de Chikungunya.
- **Exemplo 1:** Interpretação de um gráfico de linha mostrando a evolução dos casos de Chikungunya ao longo do tempo.

- **Exemplo 2:** Análise de um histograma representando a distribuição de casos por faixa etária.
- **Exemplo 3:** Leitura de uma tabela de dados mostrando a incidência de Chikungunya em diferentes regiões.
- Utilize um quadro branco para resolver os exemplos passo a passo, explicando cada etapa da interpretação.

3. Atividade Prática de Interpretação (10 minutos):

- Proponha uma atividade prática onde os alunos devem interpretar gráficos e tabelas utilizando dados fornecidos.
- Distribua planilhas com gráficos e tabelas de dados fictícios de Chikungunya.
- Oriente os alunos a trabalharem em duplas para interpretar os dados e responder a perguntas específicas sobre os gráficos e tabelas.
- Circulando pela sala, auxilie os alunos a realizarem a interpretação correta e esclareça dúvidas.

Conclusão e Encerramento (10 minutos)

1. Recapitulação:

- Faça um breve resumo dos principais pontos abordados na aula: tipos de gráficos e tabelas, exemplos práticos de interpretação e atividade prática.
- Reforce a importância de saber ler e interpretar gráficos e tabelas para a análise de dados epidemiológicos.

2. Preparação para a Próxima Aula:

- Informe aos alunos que na próxima aula eles aprenderão a construir gráficos e tabelas utilizando dados epidemiológicos.
- Incentive os alunos a revisarem os conceitos aprendidos e a refletirem sobre a importância da interpretação correta de gráficos e tabelas.

3. Perguntas Finais:

- Abra um espaço para perguntas finais, permitindo que os alunos esclareçam quaisquer dúvidas restantes.
- Agradeça a participação ativa dos alunos e encoraje-os a continuar interessados no tema.

- Recursos

- Slides informativos.
- Planilhas com gráficos e tabelas de dados fictícios de Chikungunya.
- Quadro branco e marcadores.
- Materiais para escrita (papel e canetas para a atividade prática).

- Avaliação

- Participação ativa nas discussões.
- Precisão na interpretação dos gráficos e tabelas durante a atividade prática.
- Interesse demonstrado durante a apresentação e resolução dos exercícios.

Aula 6: Interpretação de Gráficos e Tabelas (Parte 2)

Introdução (10 minutos)

1. Recapitulação da Aula Anterior:

- Cumprimente os alunos e faça uma breve recapitulação dos principais pontos abordados na aula anterior sobre construção de gráficos e tabelas.
- Pergunte aos alunos se tiveram alguma dificuldade com a construção de gráficos e tabelas e esclareça eventuais dúvidas.

2. Objetivos da Aula:

- Explique que nesta aula os alunos continuarão a interpretar gráficos e tabelas utilizando dados epidemiológicos.
- Destaque a importância de saber interpretar gráficos e tabelas para a análise clara e precisa dos dados.

Desenvolvimento (30 minutos)

1. Revisão Rápida de Tipos de Gráficos e Tabelas (10 minutos):

- Utilize slides para revisar os diferentes tipos de gráficos e tabelas apresentados na aula anterior.
- **Slide 1:** Gráficos de linha e sua aplicação na visualização de dados ao longo do tempo.
- **Slide 2:** Gráficos de barras e histogramas para representar distribuições de frequências.

- **Slide 3:** Gráficos de dispersão para visualizar relações entre duas variáveis.
- **Slide 4:** Tabelas de dados e como organizá-las para facilitar a análise.
- Faça pausas entre os slides para perguntas e esclarecimentos, incentivando a participação dos alunos.

2. Exemplos Práticos de Interpretação (10 minutos):

- Apresente exemplos práticos de gráficos e tabelas utilizando dados fictícios de Chikungunya.
- **Exemplo 1:** Interpretação de um gráfico de linha mostrando a evolução dos casos de Chikungunya ao longo do tempo.
- **Exemplo 2:** Análise de um histograma representando a distribuição de casos por faixa etária.
- **Exemplo 3:** Leitura de uma tabela de dados mostrando a incidência de Chikungunya em diferentes regiões.
- Utilize um quadro branco para resolver os exemplos passo a passo, explicando cada etapa da interpretação.

3. Atividade Prática de Interpretação (10 minutos):

- Proponha uma atividade prática onde os alunos devem interpretar gráficos e tabelas utilizando dados fornecidos.
- Distribua planilhas com gráficos e tabelas de dados fictícios de Chikungunya.
- Oriente os alunos a trabalharem em duplas para interpretar os dados e responder a perguntas específicas sobre os gráficos e tabelas.
- Circulando pela sala, auxilie os alunos a realizarem a interpretação correta e esclareça dúvidas.

Conclusão e Encerramento (10 minutos)

1. Recapitulação:

- Faça um breve resumo dos principais pontos abordados na aula: revisão de tipos de gráficos e tabelas, exemplos práticos de interpretação e atividade prática.
- Reforce a importância de saber ler e interpretar gráficos e tabelas para a análise de dados epidemiológicos.

2. Preparação para a Próxima Aula:

- Informe aos alunos que na próxima aula eles continuarão a prática de construção e análise de gráficos e tabelas com novos conjuntos de dados.

- Incentive os alunos a revisarem os conceitos aprendidos e a refletirem sobre a importância da interpretação correta de gráficos e tabelas.

3. Perguntas Finais:

- Abra um espaço para perguntas finais, permitindo que os alunos esclareçam quaisquer dúvidas restantes.
- Agradeça a participação ativa dos alunos e encoraje-os a continuar interessados no tema.

- Recursos

- Slides informativos.
- Planilhas com gráficos e tabelas de dados fictícios de Chikungunya.
- Computador e projetor.
- Software de planilhas eletrônicas (Excel, Google Planilhas, LibreOffice ou similar).
- Materiais para escrita (papel e canetas para a atividade prática).

- Avaliação

- Participação ativa nas discussões.
- Precisão na interpretação dos gráficos e tabelas durante a atividade prática.
- Interesse demonstrado durante a apresentação e resolução dos exercícios.