

1ª Oficina de Modelagem em Dengue Modelos Matemáticos e Computacionais

I. C. Charret

14 de fevereiro de 2011

1 Modelos Matemáticos

- Equipe
- Modelo Proposto por Yang e Ferreira (2008)
- Controle Mecânico - Proposta
- Controle Químico - Proposta
- Interação com a população humana
- Controle Mecânico e Inseticida

2 Modelo Computacional

- Equipe
- Primeiros resultados
- Evolução da População
- Propagação da doença

3 Considerações Finais

- Modelo Matemático
- Modelo Computacional

Summary

1 Modelos Matemáticos

- Equipe
- Modelo Proposto por Yang e Ferreira (2008)
- Controle Mecânico - Proposta
- Controle Químico - Proposta
- Interação com a população humana
- Controle Mecânico e Inseticida

2 Modelo Computacional

- Equipe
- Primeiros resultados
- Evolução da População
- Propagação da doença

3 Considerações Finais

- Modelo Matemático

Equipe responsável

- Iraziet C. Charret
- Stella O. Silva (mestranda em Engenharia de Sistemas)
- Sylvestre Aureliano (licenciando em Física)

População de Mosquitos

$$\frac{d}{dt}E(t) = \phi\left[1 - \frac{E(t)}{C}\right]W(t) - (\sigma_e + \mu_e)E(t) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}L(t) = \sigma_e E(t) - (\sigma_l + \mu_l + \mu'_l)L(t)$$

$$\frac{d}{dt}P(t) = \sigma_l L(t) - (\sigma_p + \mu_p + \mu'_p)P(t)$$

$$\frac{d}{dt}W_1(t) = \sigma_p P(t) - \left(\beta_w \frac{I(t)}{N} + \mu_w + \mu'_w\right)W_1(t)$$

$$\frac{d}{dt}W_2(t) = \beta_w \frac{I(t)}{N} W_1(t) - (\gamma_w + \mu_w + \mu'_w)W_2(t)$$

$$\frac{d}{dt}W_3(t) = \gamma_w W_2(t) - (\mu_w + \mu'_w)W_3(t)$$

População de Humanos

$$\frac{d}{dt}s(t) = \mu_h - \left(\beta_h \frac{W_3(t)}{W(t)} + \mu_h\right)s(t) \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = \beta_h \frac{W_3(t)}{W(t)}s(t) - (\gamma_h + \mu_h)e(t)$$

$$\frac{d}{dt}i(t) = \gamma_h e(t) - (\sigma_h + \mu_h)i(t)$$

$$\frac{d}{dt}r(t) = \gamma_h i(t) - \mu_h r(t)$$

Capacidade de Suporte

- Ano dividido em três períodos.
- \Rightarrow Verão: Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro.
 \Rightarrow Inverno: Março, Abril, Maio e Junho.
 \Rightarrow Intermediário: Julho, Agosto, Setembro e Outubro.
- Controle Mecânico ao longo de todo o ano.
- Construção da capacidade de suporte para cada período do ano. Faixas de valores.
- Sem sorteio aleatório $\Rightarrow C = 500$ Verão e $C = 100$ Inverno
- Sorteio aleatório a partir desses valores. $C_a = C - f(C)$, com $0.05C < f(C) < 0.5C$

Capacidade de Suporte

- Ano dividido em três períodos.
- \Rightarrow Verão: Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro.
 \Rightarrow Inverno: Março, Abril, Maio e Junho.
 \Rightarrow Intermediário: Julho, Agosto, Setembro e Outubro.
- Controle Mecânico ao longo de todo o ano.
- Construção da capacidade de suporte para cada período do ano. Faixas de valores.
- Sem sorteio aleatório $\Rightarrow C = 500$ Verão e $C = 100$ Inverno
- Sorteio aleatório a partir desses valores. $C_a = C - f(C)$, com $0.05C < f(C) < 0.5C$

Capacidade de Suporte

- Ano dividido em três períodos.
- \Rightarrow Verão: Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro.
 \Rightarrow Inverno: Março, Abril, Maio e Junho.
 \Rightarrow Intermediário: Julho, Agosto, Setembro e Outubro.
- Controle Mecânico ao longo de todo o ano.
- Construção da capacidade de suporte para cada período do ano. Faixas de valores.
- Sem sorteio aleatório $\Rightarrow C = 500$ Verão e $C = 100$ Inverno
- Sorteio aleatório a partir desses valores. $C_a = C - f(C)$, com $0.05C < f(C) < 0.5C$

Capacidade de Suporte

- Ano dividido em três períodos.
- \Rightarrow Verão: Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro.
 \Rightarrow Inverno: Março, Abril, Maio e Junho.
 \Rightarrow Intermediário: Julho, Agosto, Setembro e Outubro.
- Controle Mecânico ao longo de todo o ano.
- Construção da capacidade de suporte para cada período do ano. Faixas de valores.
- Sem sorteio aleatório $\Rightarrow C = 500$ Verão e $C = 100$ Inverno
- Sorteio aleatório a partir desses valores. $C_a = C - f(C)$, com $0.05C < f(C) < 0.5C$

Capacidade de Suporte

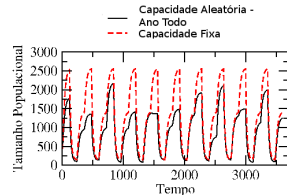
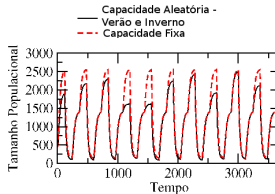
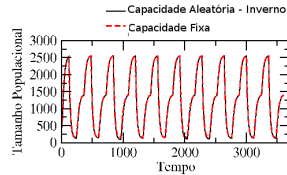
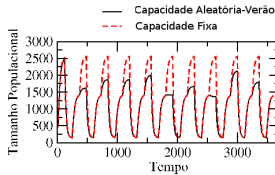
- Ano dividido em três períodos.
- \Rightarrow Verão: Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro.
 \Rightarrow Inverno: Março, Abril, Maio e Junho.
 \Rightarrow Intermediário: Julho, Agosto, Setembro e Outubro.
- Controle Mecânico ao longo de todo o ano.
- Construção da capacidade de suporte para cada período do ano. Faixas de valores.
- Sem sorteio aleatório $\Rightarrow C = 500$ Verão e $C = 100$ Inverno
- Sorteio aleatório a partir desses valores. $C_a = C - f(C)$, com $0.05C < f(C) < 0.5C$

Capacidade de Suporte

- Ano dividido em três períodos.
- \Rightarrow Verão: Novembro, Dezembro, Janeiro e Fevereiro.
 \Rightarrow Inverno: Março, Abril, Maio e Junho.
 \Rightarrow Intermediário: Julho, Agosto, Setembro e Outubro.
- Controle Mecânico ao longo de todo o ano.
- Construção da capacidade de suporte para cada período do ano. Faixas de valores.
- Sem sorteio aleatório $\Rightarrow C = 500$ Verão e $C = 100$ Inverno
- Sorteio aleatório a partir desses valores. $C_a = C - f(C)$, com $0.05C < f(C) < 0.5C$

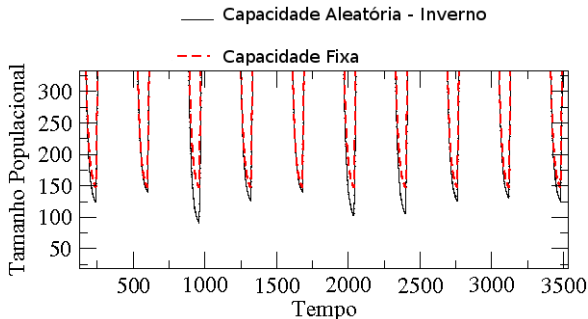
Primeiros Resultados

- Dinâmica da População de Mosquitos - 10 anos



Primeiros Resultados

- Pontos de mínimo com controle no inverno

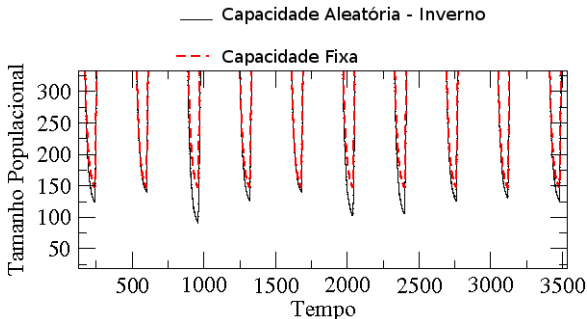


Controle no Inverno

Pontos de mínimo mais baixos.

Primeiros Resultados

- Pontos de mínimo com controle no inverno



Controle no Inverno

Pontos de mínimo mais baixos.

Controle químico

- Ajustes de Funções de Decaimento - ação do controle por 15 dias no ambiente.
- Capacidade de suporte mantida fixa.
- Termo de Larvicida - $(\sigma_l + \mu_l + \mu'_l)$:
Período Favorável: $\mu'_l(t) = 0.433e^{-0.0046t}$
Período Desfavorável $\mu'_l(t) = 0.375e^{-0.0046t}$
- Termo de Inseticida - $(\beta_w \frac{I(t)}{N} + \mu_w + \mu'_w)$
Período Favorável: $\mu'_i(t) = 0.942e^{-0.0046t}$
Período Desfavorável: $\mu'_i(t) = 0.96e^{-0.0046t}$

Controle químico

- Ajustes de Funções de Decaimento - ação do controle por 15 dias no ambiente.
- Capacidade de suporte mantida fixa.
- Termo de Larvicida - $(\sigma_l + \mu_l + \mu'_l)$:
Período Favorável: $\mu'_l(t) = 0.433e^{-0.0046t}$
Período Desfavorável $\mu'_l(t) = 0.375e^{-0.0046t}$
- Termo de Inseticida - $(\beta_w \frac{I(t)}{N} + \mu_w + \mu'_w)$
Período Favorável: $\mu'_i(t) = 0.942e^{-0.0046t}$
Período Desfavorável: $\mu'_i(t) = 0.96e^{-0.0046t}$

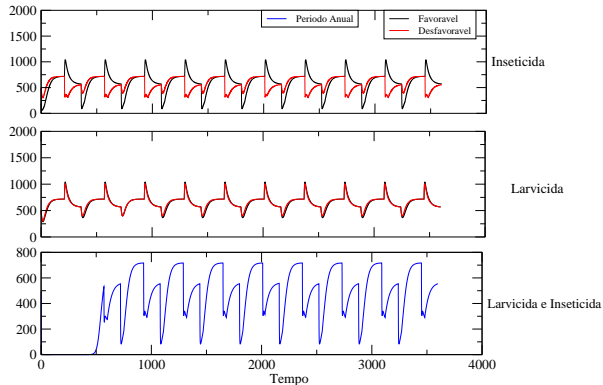
Controle químico

- Ajustes de Funções de Decaimento - ação do controle por 15 dias no ambiente.
- Capacidade de suporte mantida fixa.
- Termo de Larvicida - $(\sigma_I + \mu_I + \mu'_I)$:
Período Favorável: $\mu'_I(t) = 0.433e^{-0.0046t}$
Período Desfavorável $\mu'_I(t) = 0.375e^{-0.0046t}$
- Termo de Inseticida - $(\beta_w \frac{I(t)}{N} + \mu_w + \mu'_w)$
Período Favorável: $\mu'_i(t) = 0.942e^{-0.0046t}$
Período Desfavorável: $\mu'_i(t) = 0.96e^{-0.0046t}$

Controle químico

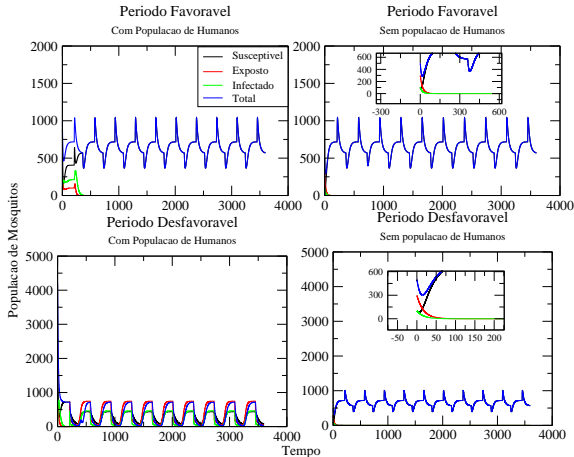
- Ajustes de Funções de Decaimento - ação do controle por 15 dias no ambiente.
- Capacidade de suporte mantida fixa.
- Termo de Larvicida - $(\sigma_l + \mu_l + \mu'_l)$:
Período Favorável: $\mu'_l(t) = 0.433e^{-0.0046t}$
Período Desfavorável $\mu'_l(t) = 0.375e^{-0.0046t}$
- Termo de Inseticida - $(\beta_w \frac{I(t)}{N} + \mu_w + \mu'_w)$
Período Favorável: $\mu'_i(t) = 0.942e^{-0.0046t}$
Período Desfavorável: $\mu'_i(t) = 0.96e^{-0.0046t}$

Primeiros Resultados - Mosquitos

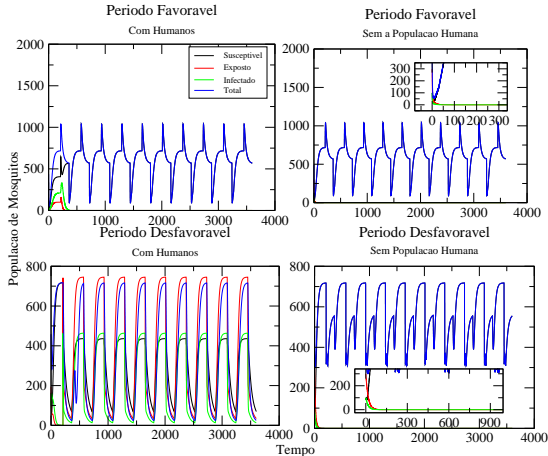


Controle por larvicida e inseticida ao mesmo tempo - Redução na população total de mosquitos. Não extinção.

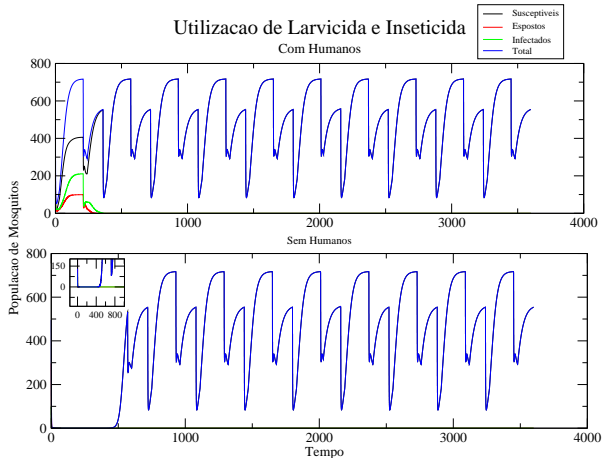
Interação com a população humana



Controle por inseticida



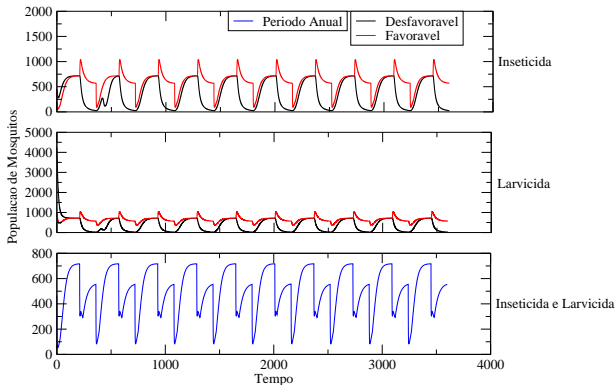
Controle por larvicida e inseticida



Controle Químico - 10 anos

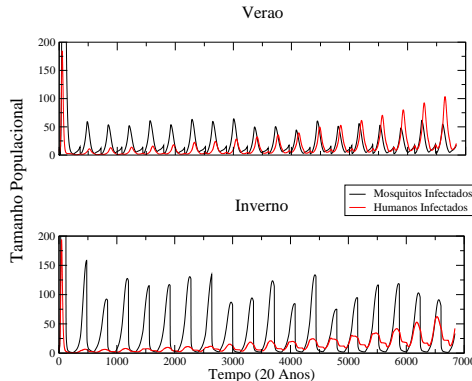
Capacidade de suporte mantida fixa durante toda a interação.

Com a População humana



Controle Mecânico e Inseticida

Infecteds menor \Rightarrow inseticida na primeira semana de cada mês com controle mecânico.



Summary

- 1 Modelos Matemáticos
 - Equipe
 - Modelo Proposto por Yang e Ferreira (2008)
 - Controle Mecânico - Proposta
 - Controle Químico - Proposta
 - Interação com a população humana
 - Controle Mecânico e Inseticida
- 2 **Modelo Computacional**
 - Equipe
 - Primeiros resultados
 - Evolução da População
 - Propagação da doença
- 3 Considerações Finais
 - Modelo Matemático

Equipe

- Iraziet C. Charret
- Renato R. Lima
- Crysttian Arantes Paixão (doutorando em Estatística e Experimentação Agropecuária)

Modelo de Bitstring

Objetivo

Criar um modelo computacional, usando a técnica de bitstring, que permita caracterizar e descrever a propagação da Dengue, incluindo toda a dinâmica das populações envolvidas no ciclo da doença, desde os mosquitos (4 fases) até a população humana.

Características incluídas no modelo

- Dinâmica das populações do Vírus, do Vetor e Humana.
- Características dos criadouros e das armadilhas.
- Evolução genética dos vírus e dos vetores.
- Análise da competição intra-específica do Vetor.
- Deslocamento espacial das populações envolvidas.
- Avaliação da eficácia das armadilhas.
- Interação entre diferentes regiões.
- Velocidade de propagação da doença.

Alguns parâmetros do modelo

Distribuição	Parâmetros	Característica Modelada
Poisson	$\lambda = 3$ (36 horas)	Tempo de desenvolvimento na Fase de Ovo.
Poisson	$\lambda = 8$ (96 horas)	Tempo de desenvolvimento na Fase de Larva.
Poisson	$\lambda = 6$ (72 horas)	Tempo de desenvolvimento na Fase de Pupa.
Poisson	Macho $\lambda = 10$ (120 horas) Fêmea $\lambda = 44$ (528 horas)	Tempo de desenvolvimento na Fase Alada .
Poisson	$\lambda = 100$	Número de ovos que podem ser postos.

Tabela: Geradores de Números Aleatórios.

Condições Iniciais - Mosquitos

- Indivíduos distribuídos inicialmente seguindo uma distribuição uniforme.
- 4 criadouros (posicionados nos vértices de uma rede quadrada).
- População máxima de 10.000 mosquitos.
- Inclusão de competição intraespecífica.
- Tempo de evolução da população: 10.000 horas (equivalente a aproximadamente 1 ano)

Efeito da Taxa de Competição

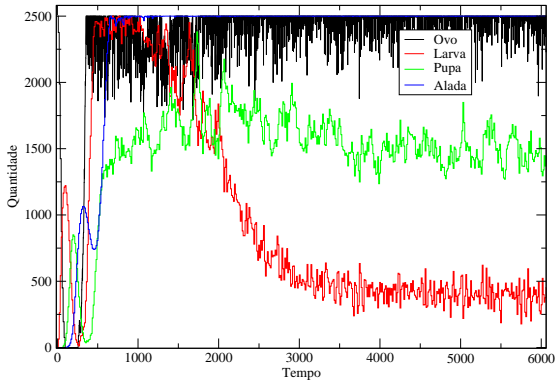


Figura: Evolução temporal com taxa de competição intraespecífica no estágio larval de $\xi = 0.5$.

Efeito da Taxa de Competição

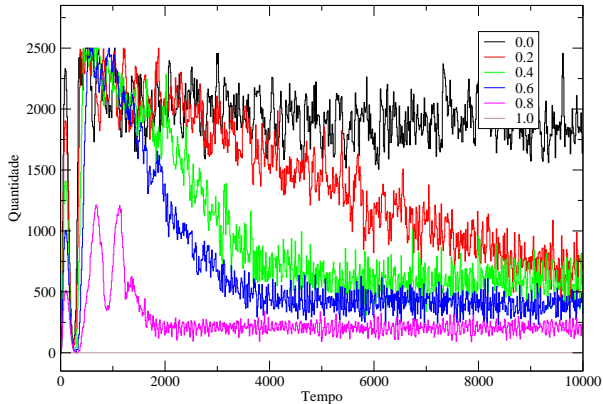


Figura: Evolução temporal considerando diferentes taxas de competição intraespecífica no estágio larval.

Efeito da Taxa de Competição na Fase Adulta.

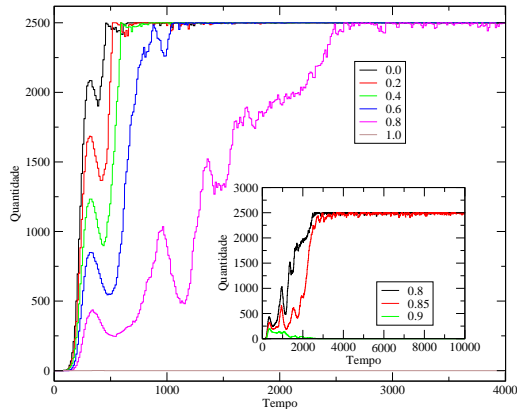


Figura: Evolução temporal da fase adulta com diferentes taxas de competição intraespecífica no estágio larval.

Características inseridas

- Reprodução Sexuada
- Cruzamento das tiras genéticas do macho e da fêmea. (A tira é formada pelas características do tempo médio de desenvolvimento dos indivíduos.)
- Hereditariedade.

Evolução Genética da População do Vetor

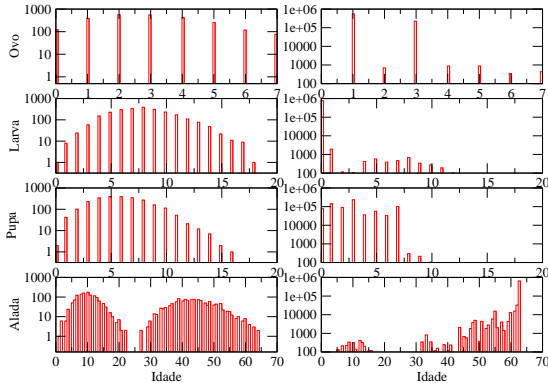
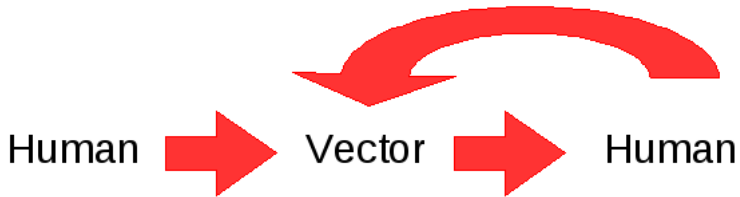


Figura: Mudança na distribuição etária da população.

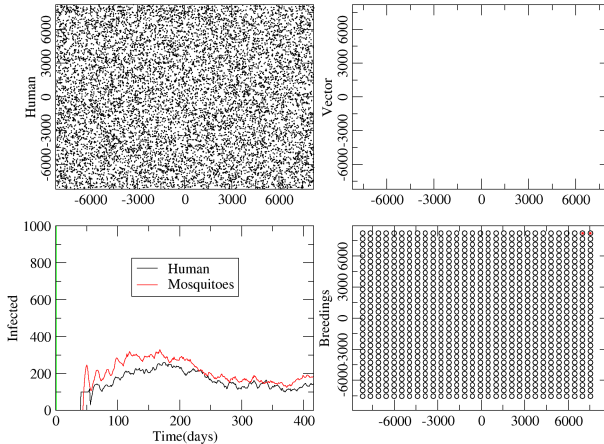
Propagação da doença - inclusão de humanos

- Distribuição uniforme de 900 criadouros
- Ovos presentes somente em alguns criadouros
- 100 humanos infectados são inseridos no sistema aleatoriamente no tempo $t = 1000$ horas
- População máxima de vetores: 20.000
- População máxima de humanos: 10.000
- Virus circulando do tipo DENV I
- Tempo de evolução: 10.000 horas
- Condições de contorno periódicas

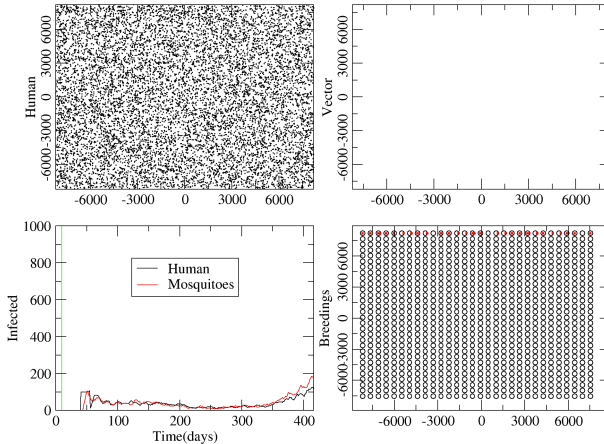
Processo de Contaminação



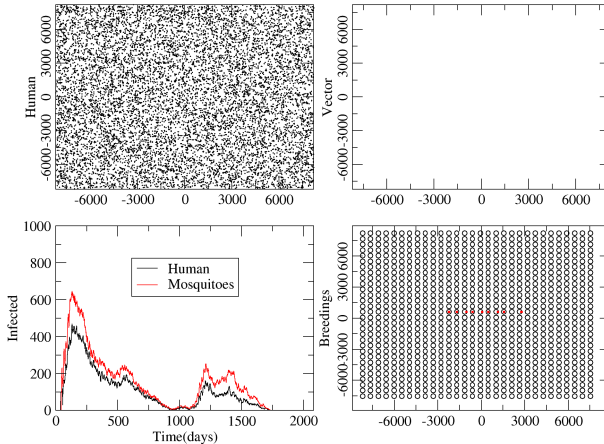
Análise da Evolução Espacial - No alto a direita



Análise da Evolução Espacial - No topo



Análise da Evolução Espacial - No centro



Summary

- 1 Modelos Matemáticos
 - Equipe
 - Modelo Proposto por Yang e Ferreira (2008)
 - Controle Mecânico - Proposta
 - Controle Químico - Proposta
 - Interação com a população humana
 - Controle Mecânico e Inseticida
- 2 Modelo Computacional
 - Equipe
 - Primeiros resultados
 - Evolução da População
 - Propagação da doença
- 3 Considerações Finais
 - Modelo Matemático
 - Modelo Computacional

Modelo Matemático

- Possibilidade de realização de diversos testes de estratégias de retirada de criadouros do meio. (Capacidade de suporte).
- Possibilidade de elaboração de propostas de funções para descrever o decaimento do inseticida e larvicida utilizados como controle.
- Inclusão da dependência com a temperatura nos fatores de mortalidade e natalidade do vetor - futuro.

Modelo Matemático

- Possibilidade de realização de diversos testes de estratégias de retirada de criadouros do meio. (Capacidade de suporte).
- Possibilidade de elaboração de propostas de funções para descrever o decaimento do inseticida e larvicida utilizados como controle.
- Inclusão da dependência com a temperatura nos fatores de mortalidade e natalidade do vetor - futuro.

Modelo Matemático

- Possibilidade de realização de diversos testes de estratégias de retirada de criadouros do meio. (Capacidade de suporte).
- Possibilidade de elaboração de propostas de funções para descrever o decaimento do inseticida e larvicida utilizados como controle.
- Inclusão da dependência com a temperatura nos fatores de mortalidade e natalidade do vetor - futuro.

Modelo Computacional

- O modelo consegue capturar as características da Dengue.
- Possibilidade de inclusão da hereditariedade nas populações.
- Possibilidade de realizar ensaios com as possíveis taxas de competição intraespecífica e interespecífica, ainda não considerada.
- Verificação dos efeitos da distribuição espacial dos criadouros na propagação da doença.
- Possibilidade de testar diferentes estratégias de controle, tais como colocação de barreiras, espalhamento de patógenos nos criadouros, predação por outros agentes, etc.
- Dentre outras possibilidades.

Modelo Computacional

- O modelo consegue capturar as características da Dengue.
- Possibilidade de inclusão da hereditariedade nas populações.
- Possibilidade de realizar ensaios com as possíveis taxas de competição intraespecífica e interespecífica, ainda não considerada.
- Verificação dos efeitos da distribuição espacial dos criadouros na propagação da doença.
- Possibilidade de testar diferentes estratégias de controle, tais como colocação de barreiras, espalhamento de patógenos nos criadouros, predação por outros agentes, etc.
- Dentre outras possibilidades.

Modelo Computacional

- O modelo consegue capturar as características da Dengue.
- Possibilidade de inclusão da hereditariedade nas populações.
- Possibilidade de realizar ensaios com as possíveis taxas de competição intraespecífica e interespecífica, ainda não considerada.
- Verificação dos efeitos da distribuição espacial dos criadouros na propagação da doença.
- Possibilidade de testar diferentes estratégias de controle, tais como colocação de barreiras, espalhamento de patógenos nos criadouros, predação por outros agentes, etc.
- Dentre outras possibilidades.

Modelo Computacional

- O modelo consegue capturar as características da Dengue.
- Possibilidade de inclusão da hereditariedade nas populações.
- Possibilidade de realizar ensaios com as possíveis taxas de competição intraespecífica e interespecífica, ainda não considerada.
- Verificação dos efeitos da distribuição espacial dos criadouros na propagação da doença.
- Possibilidade de testar diferentes estratégias de controle, tais como colocação de barreiras, espalhamento de patógenos nos criadouros, predação por outros agentes, etc.
- Dentre outras possibilidades.

Modelo Computacional

- O modelo consegue capturar as características da Dengue.
- Possibilidade de inclusão da hereditariedade nas populações.
- Possibilidade de realizar ensaios com as possíveis taxas de competição intraespecífica e interespecífica, ainda não considerada.
- Verificação dos efeitos da distribuição espacial dos criadouros na propagação da doença.
- Possibilidade de testar diferentes estratégias de controle, tais como colocação de barreiras, espalhamento de patógenos nos criadouros, predação por outros agentes, etc.
- Dentre outras possibilidades.

Modelo Computacional

- O modelo consegue capturar as características da Dengue.
- Possibilidade de inclusão da hereditariedade nas populações.
- Possibilidade de realizar ensaios com as possíveis taxas de competição intraespecífica e interespecífica, ainda não considerada.
- Verificação dos efeitos da distribuição espacial dos criadouros na propagação da doença.
- Possibilidade de testar diferentes estratégias de controle, tais como colocação de barreiras, espalhamento de patógenos nos criadouros, predação por outros agentes, etc.
- Dentre outras possibilidades.

Obrigada!