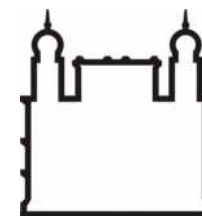




Modelagem matemática aplicada ao monitoramento e controle da dengue

Cláudia Codeço
Fiocruz, Rio de Janeiro

ENCE, Rio de Janeiro, 1 setembro 2011



Ministério da Saúde

FIOCRUZ

Fundação Oswaldo Cruz

Tópicos

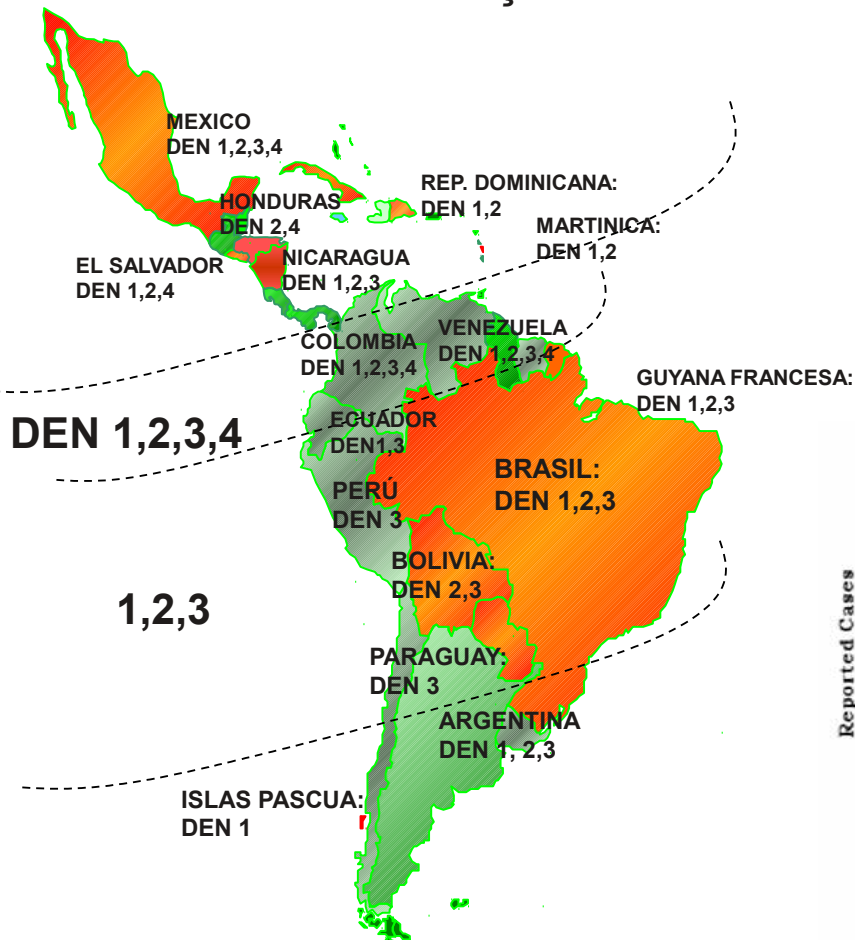
- O problema
- Os dados
- Modelo fenomenológico
- Modelo mecanicista
- Conclusões e discussões

Dengue no Brasil

Padrão sazonal com anos epidêmicos
Intercalados

Tendência de aumento da gravidade

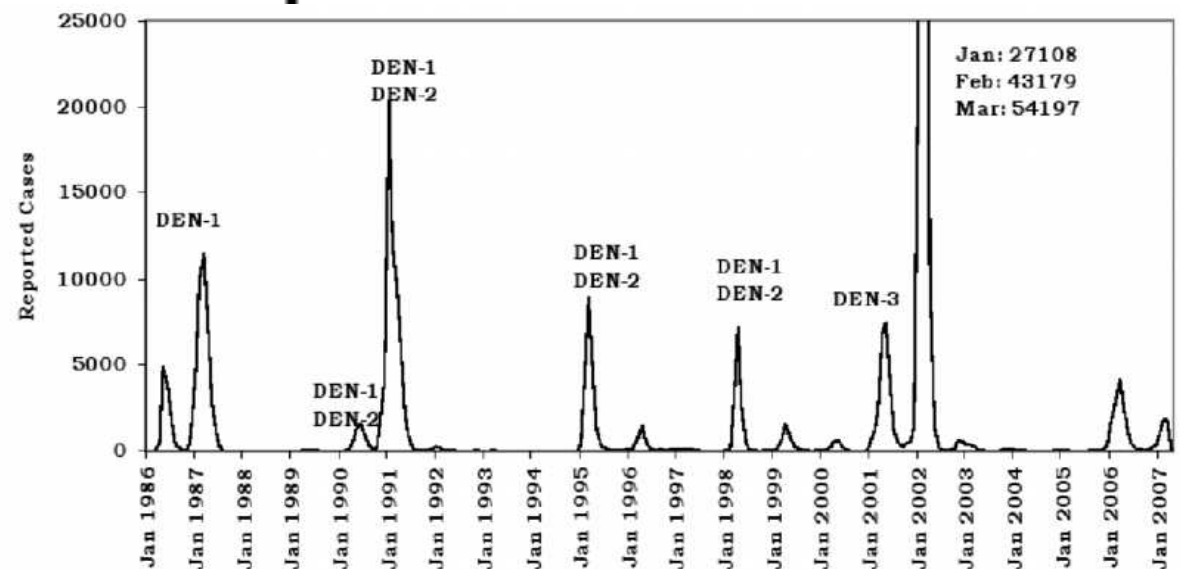
Tendência de redução da idade média



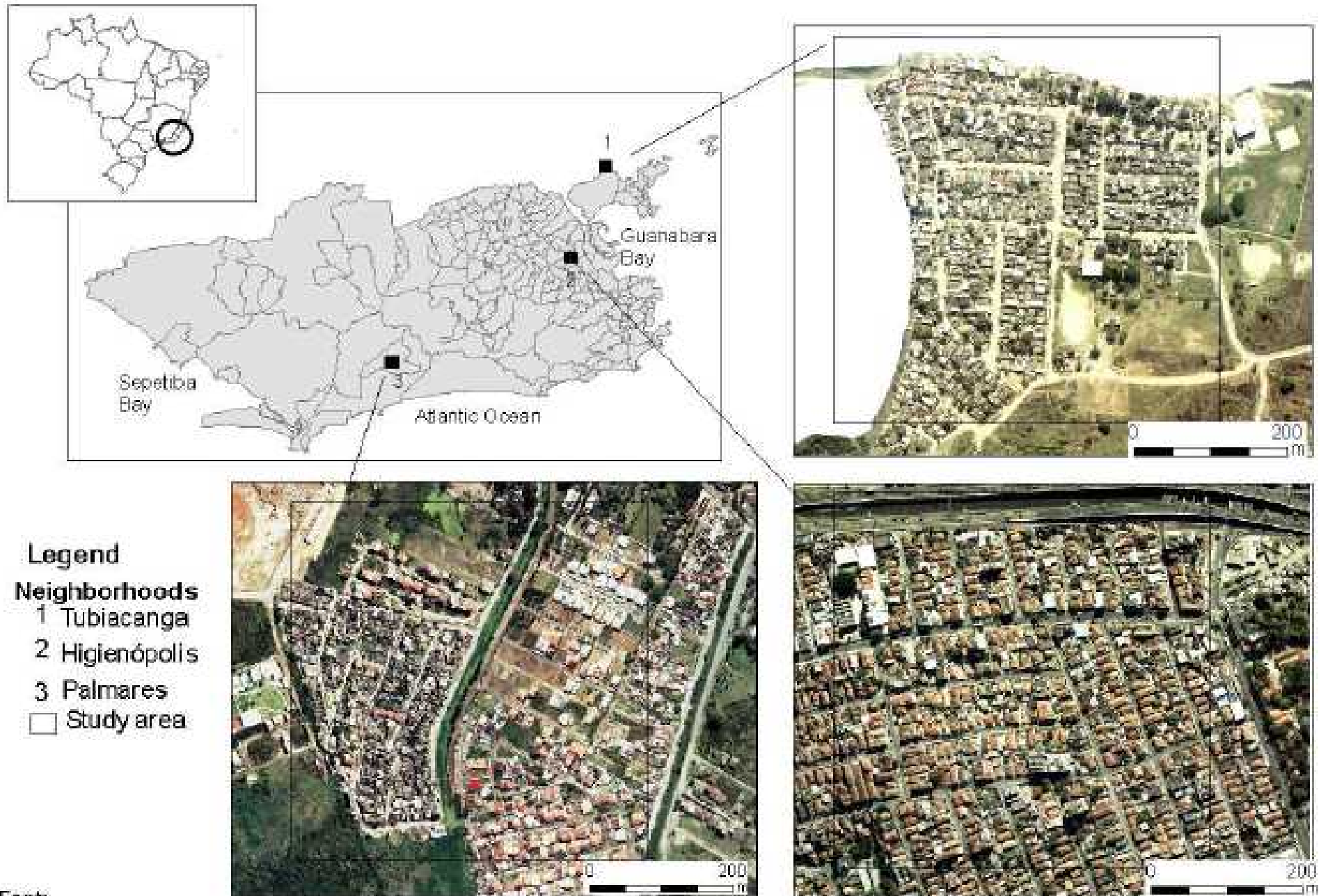
Febre Hemorrágica

1,200

Sazonalidade e padrões interanuais



Estudo longitudinal de 82 semanas (setembro 2006 a março de 2008)



Font:

Ortophoto: PorataGeo - IPP- Rio de Janeiro

Digital map: Geoprocessing Laboratory - ICICT/ Fiocruz

Honorio et al 2009

● OVITRAMP
● MOSQUITRAP

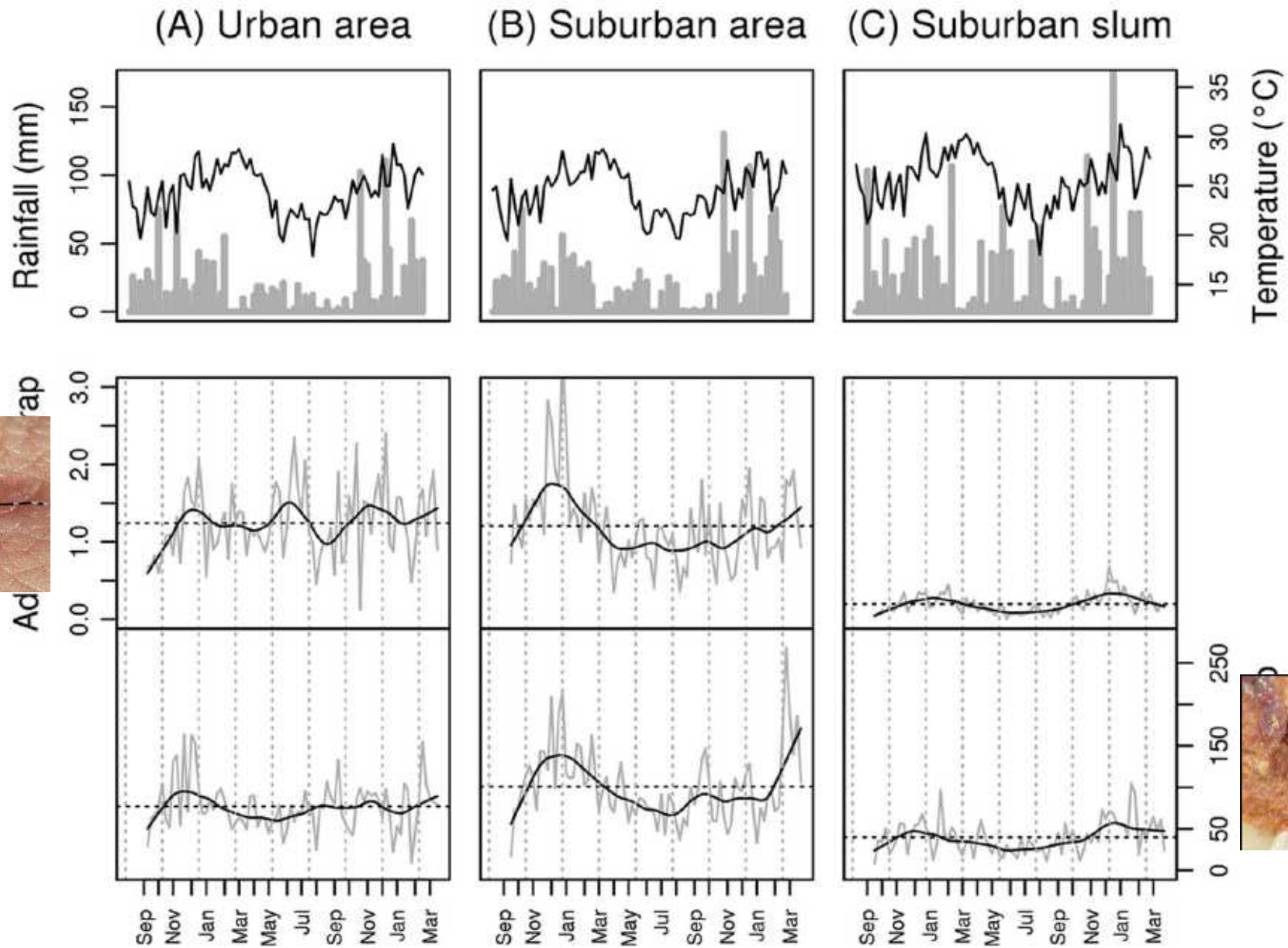
● + ● = ● PONTOS ESTRATÉGICOS

40

40



Existe relação entre infestação e clima?

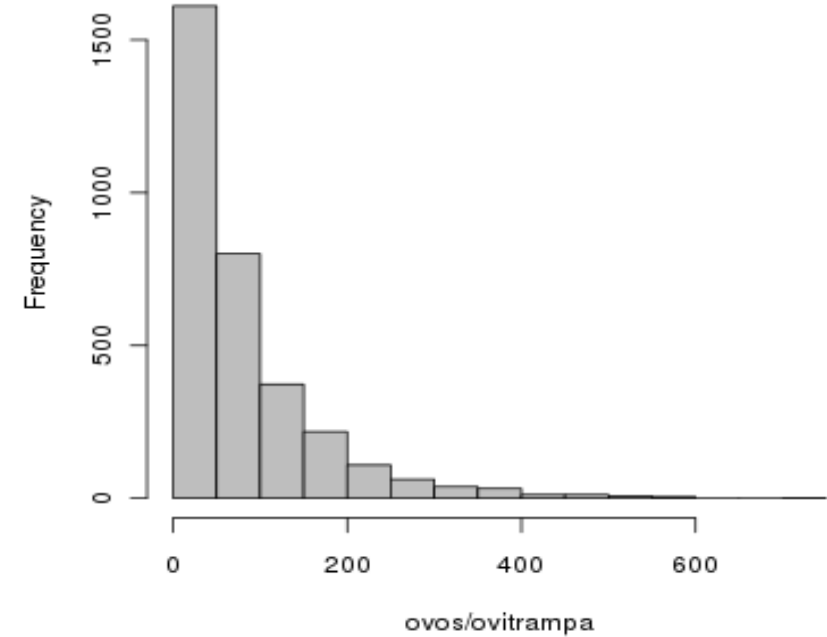
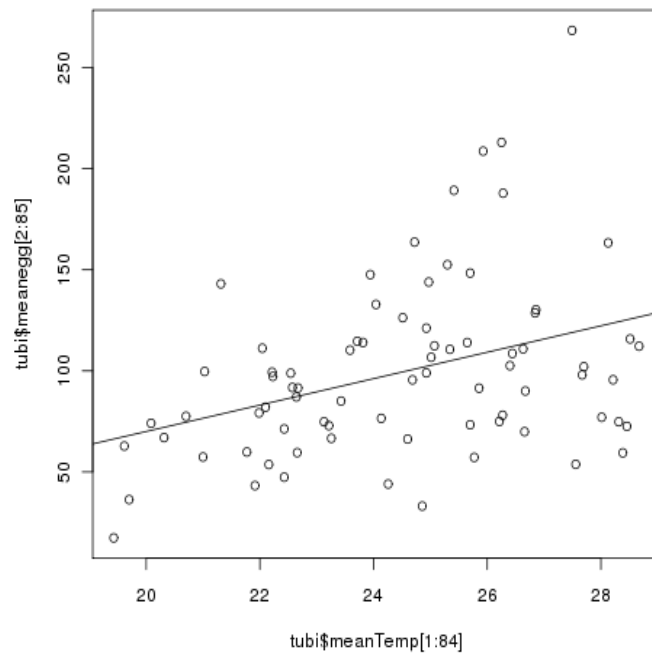


Modelagem por modelos lineares

Hipóteses:

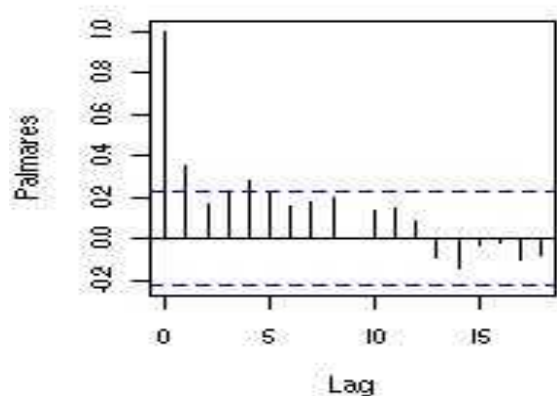
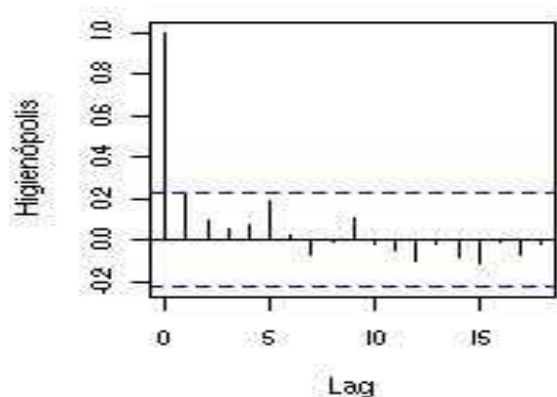
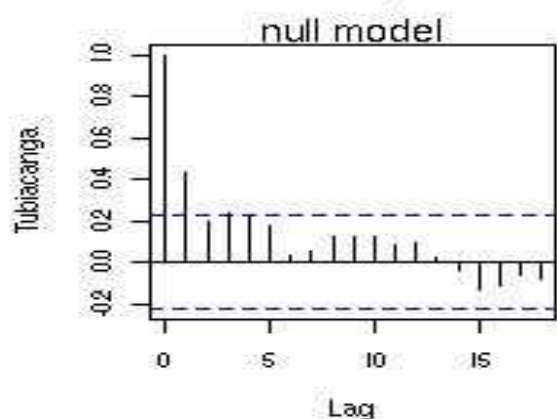
- Quanto maior a temperatura, maior a infestação
- Quanto mais chuva, maior a infestação

Ovos (t)



Temperatura (t-1)

Estrutura de auto-correlação



Modelos GLM:

$$Y_t \sim \text{NegBin}$$

$$E[Y_t] = a_0 \quad \text{nulo}$$

$$E[Y_t] = a_0 + a_1 Y_{t-1} \quad \text{AR1}$$

$$E[Y_t] = a_0 + a_1 Y_{t-1} + a_2 \text{Temp}_{t-m} \quad + \text{temperatura}$$

$$E[Y_t] = a_0 + a_1 Y_{t-1} + a_2 \text{Temp}_{t-m} + a_3 \text{Chuva}_{t-n} \quad + \text{chuva}$$

Estimação no R

Comparação dos modelos:

- AIC
- Correlação de Pearson
- Auto-correlação
- Resíduos

Modelos GAM:

Termo *smooth* para temperatura



AR(1)+TEMP(1)+CHUVA(4)

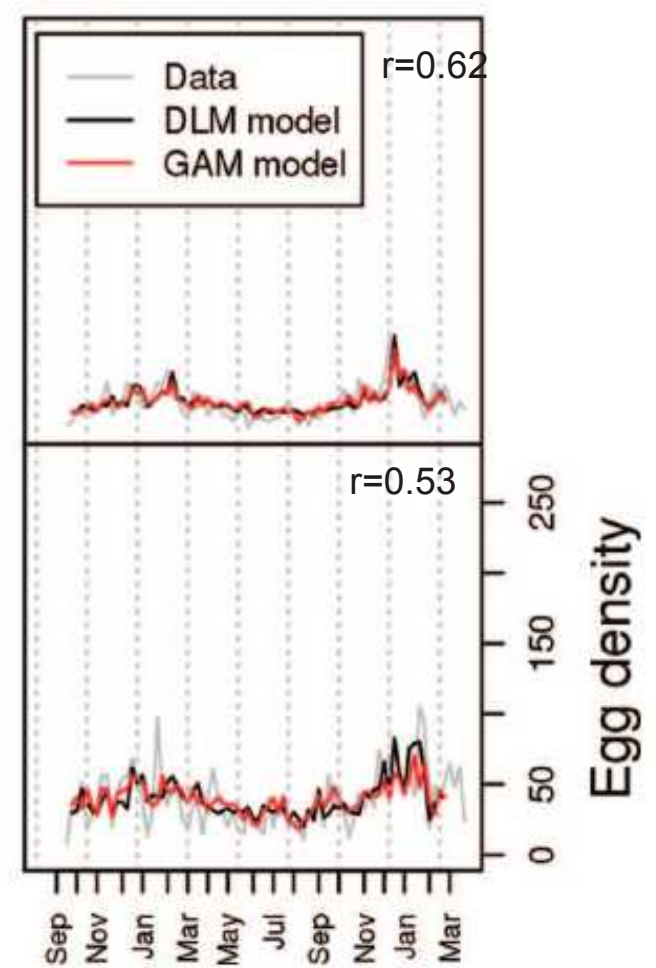
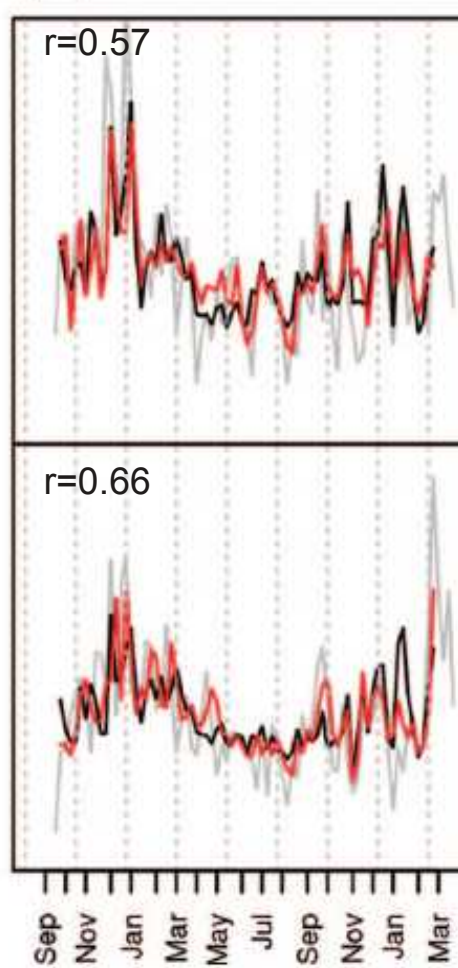
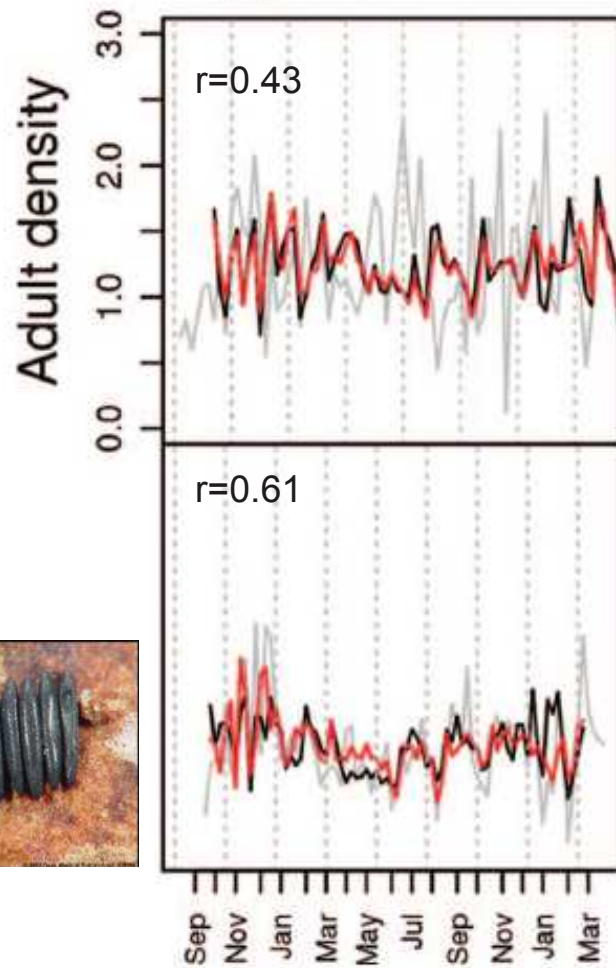
AR(1)+TEMP(1)

AR(1)+TEMP(1)

(A) Urban area

(B) Suburban area

(C) Suburban slum



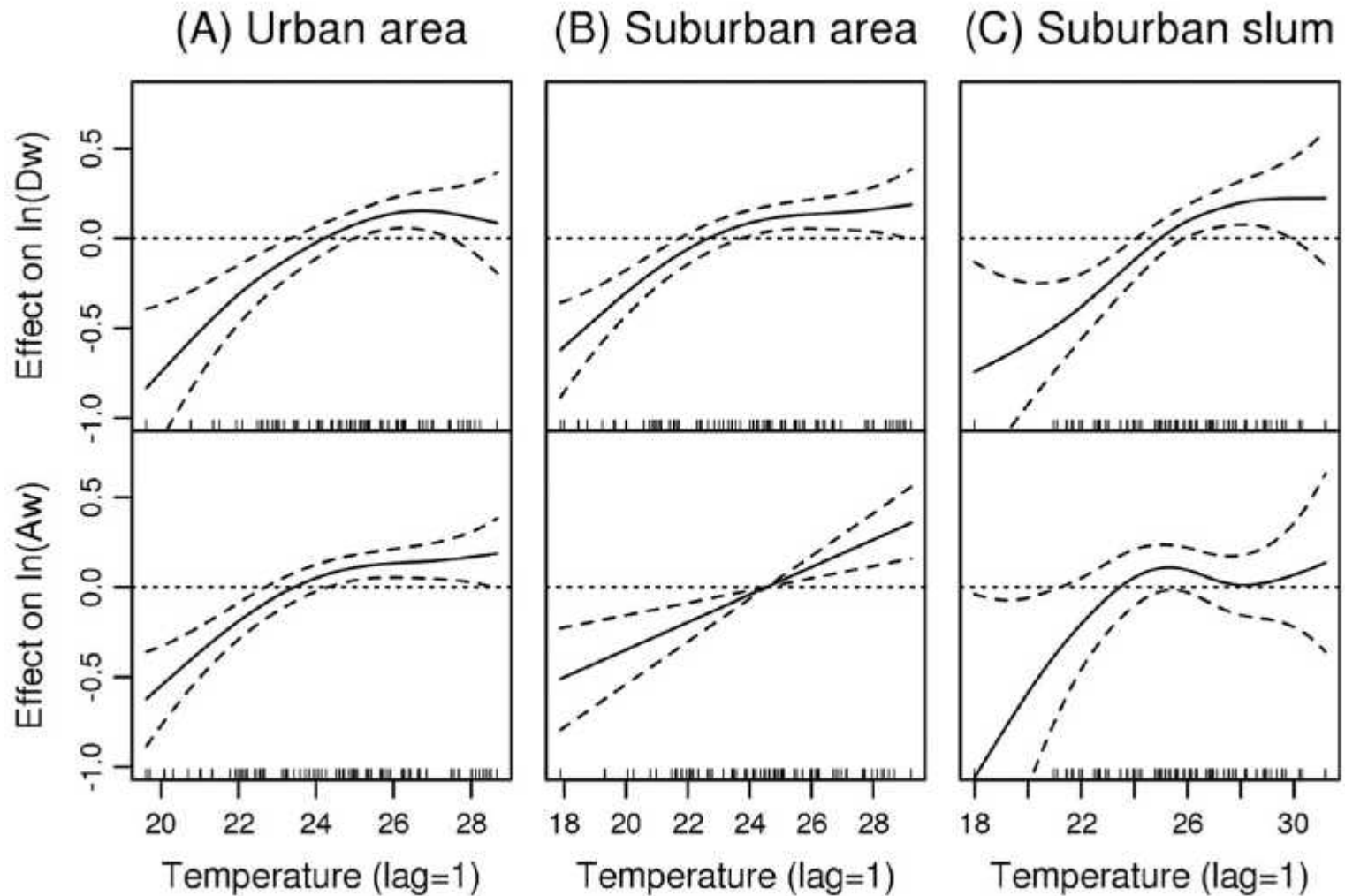
AR(1)+TEMP(1)

AR(1)+TEMP(1)+CHUVA(1)

AR(1)+TEMP(1)+CHUVA(4)



Efeito não linear da temperatura



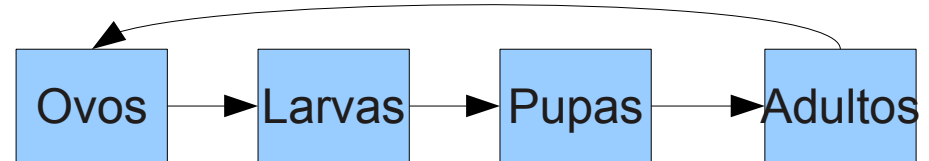
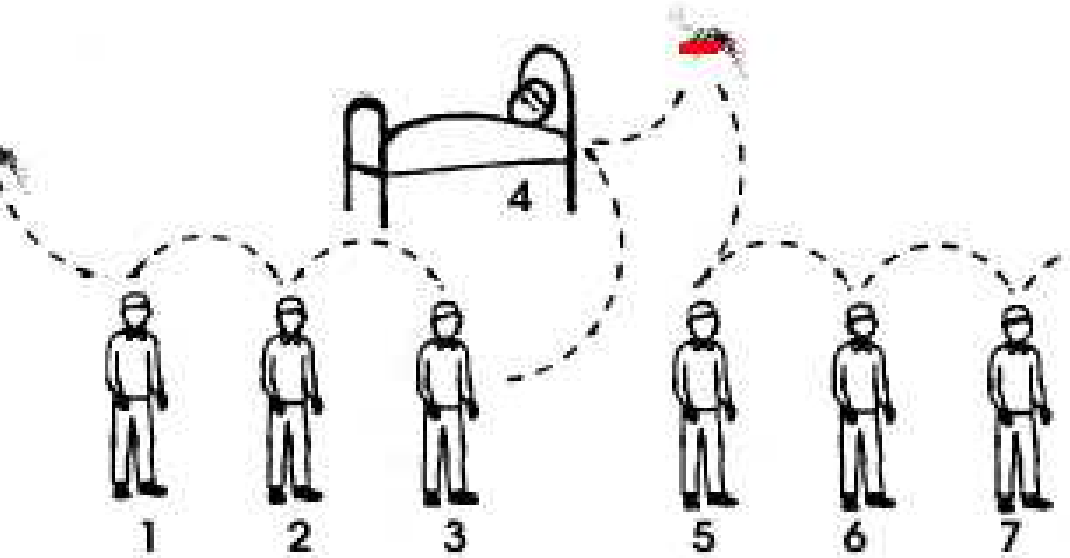
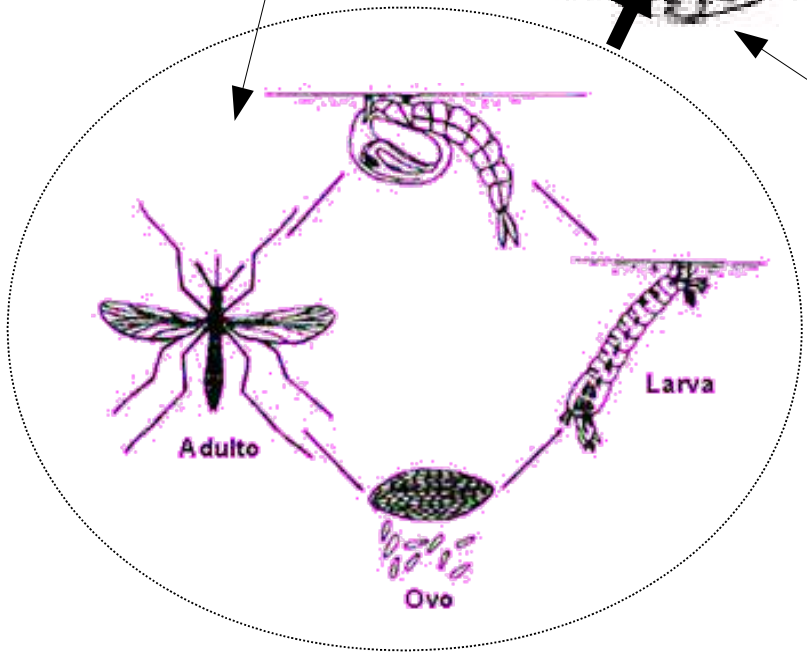
- Forte efeito positivo e não linear da temperatura na semana anterior
- Fraco efeito da chuva

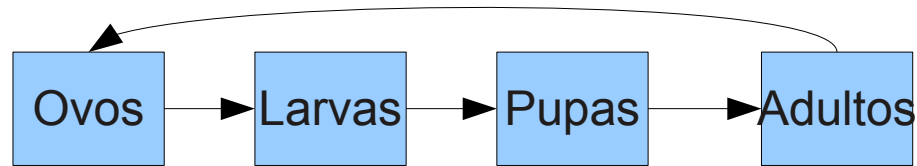
Vamos modelar de uma outra maneira



temperatura

chuva



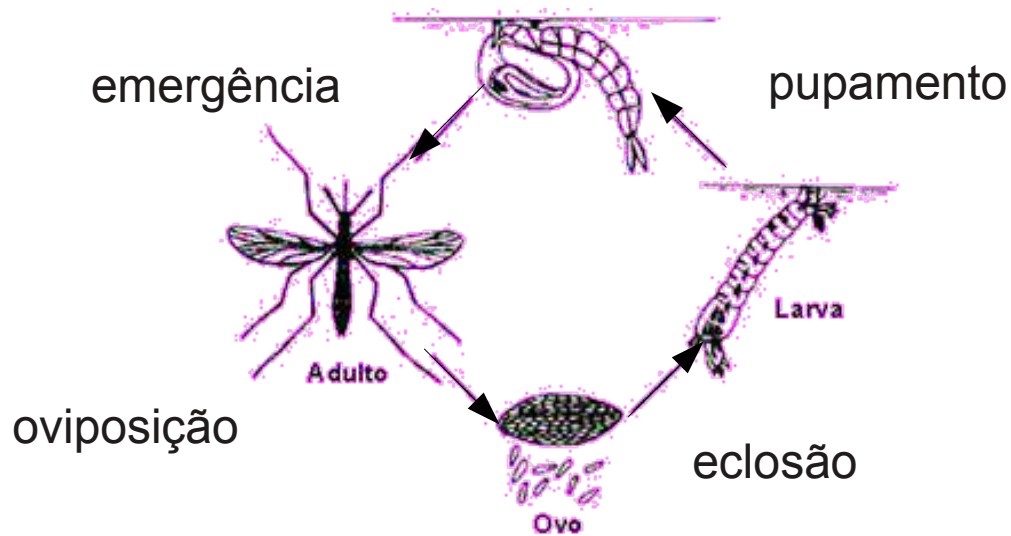


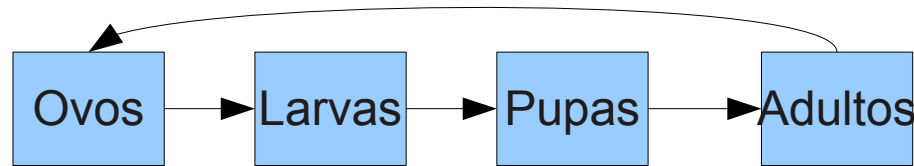
$$\frac{dOvos}{dt} = (tx\ reprodução) Adultos - (tx\ mortalidade) Ovos - (tx\ eclosao) Ovos$$

$$\frac{dLarvas}{dt} = tx\ eclosao(Ovos) - (tx\ mortalidade) Larvas - (tx\ pupamento) Larvas$$

$$\frac{dPupas}{dt} = tx\ pupamento(Pupas) - (tx\ mortalidade) Pupas - (tx\ emergência) Pupas$$

$$\frac{dAdultos}{dt} = tx\ emergência(Pupas) - (tx\ mortalidade) Adultos$$





$$\frac{dOvos}{dt} = (tx\ reprodução) Adultos - (tx\ mortalidade) Ovos - (tx\ eclosao) Ovos$$

$$\frac{dLarvas}{dt} = tx\ eclosao(Ovos) - (tx\ mortalidade) Larvas - (tx\ pupamento) Larvas$$

$$\frac{dPupas}{dt} = tx\ pupamento(Pupas) - (tx\ mortalidade) Pupas - (tx\ emergência) Pupas$$

$$\frac{dAdultos}{dt} = tx\ emergência(Pupas) - (tx\ mortalidade) Adultos$$

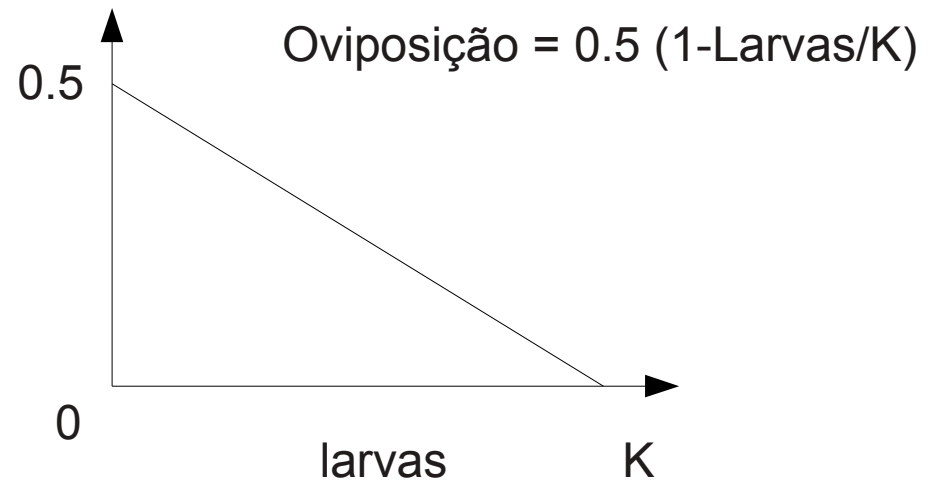
Taxas de mortalidade:

Ovos = 1/210 (por dia)

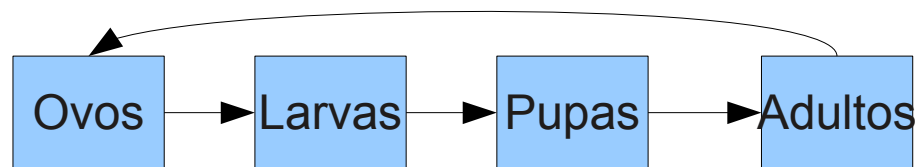
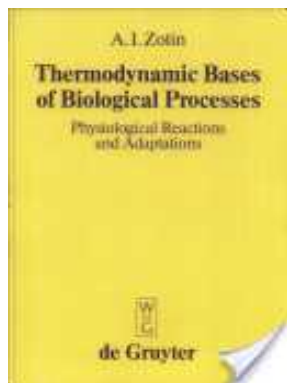
Larvas = 1/20 (por dia)

Pupas = 1/100 (por dia)

Adultos = 1/30 (por dia)



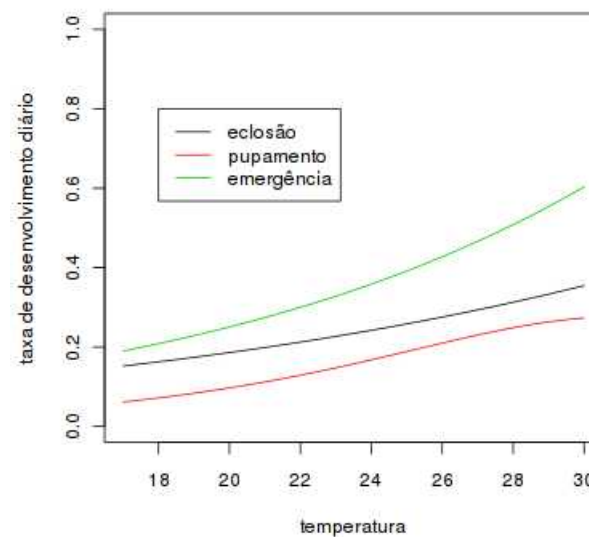
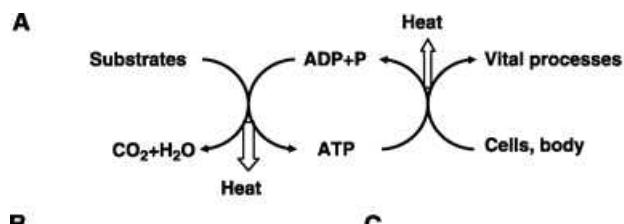
K = capacidade de suporte (número de criadouros)



As taxas de desenvolvimento são dependentes da temperatura,
De acordo com a fórmula:

$$R_D(T) = R_D(298K) \frac{\left(\frac{T}{298K}\right) \exp\left(\left(\frac{\Delta H_A}{R}\right)\left(\frac{1}{298K} - \frac{1}{T}\right)\right)}{1 + \exp\left(\left(\frac{\Delta H_H}{R}\right)\left(\frac{1}{T_{1/2}} - \frac{1}{T}\right)\right)}$$

Schoofield et. al.(1981)



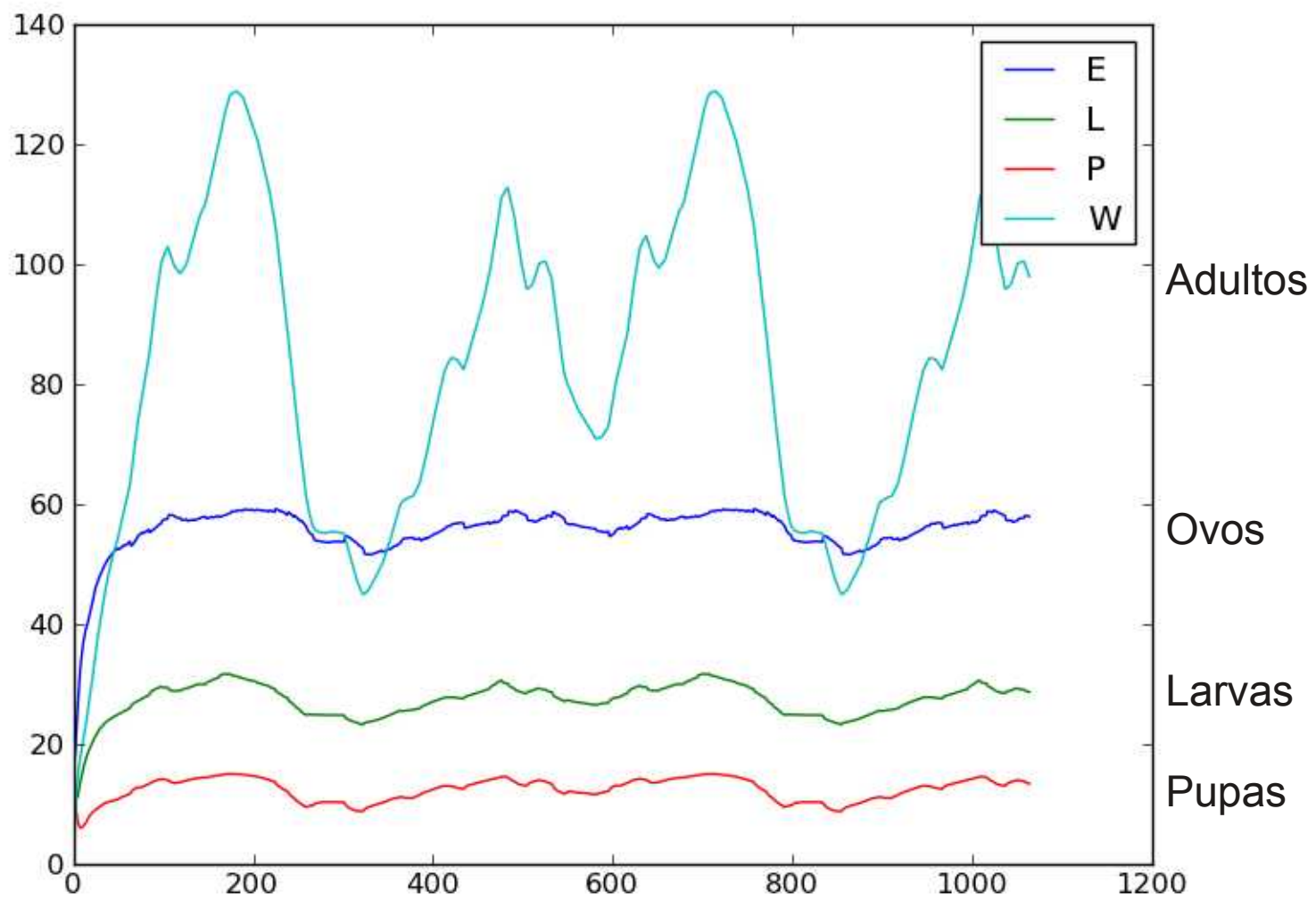
$$\frac{dOvos}{dt} = 0.5(1 - Larvas/K) Adultos - (1/210) Ovos - Rd(temp) Ovos$$

$$\frac{dLarvas}{dt} = Rd(Temp)(Ovos) - (1/10) Larvas - Rd(Temp) Larvas$$

$$\frac{dPupas}{dt} = Rd(Temp)(Pupas) - (1/100) Pupas - Rd(Temp) Pupas$$

$$\frac{dAdultos}{dt} = Rd(Temp)(Pupas) - (1/30) Adultos$$

- K=100
- Condições iniciais: O(0)=0, L(0)=0, P(0)=0, A(0)=1
- Dados de temperatura do Rio de Janeiro
- Resolver o sistema de equações diferenciais usando um integrador numérico
- R, biblioteca odesolve



Ajustando o modelo aos dados

$$\frac{dOvos}{dt} = 0.5(1 - Larvas/K) Adultos - (1/210) Ovos - Rd(temp) Ovos$$

$$\frac{dLarvas}{dt} = Rd(Temp)(Ovos) - (1/10) Larvas - Rd(Temp) Larvas$$

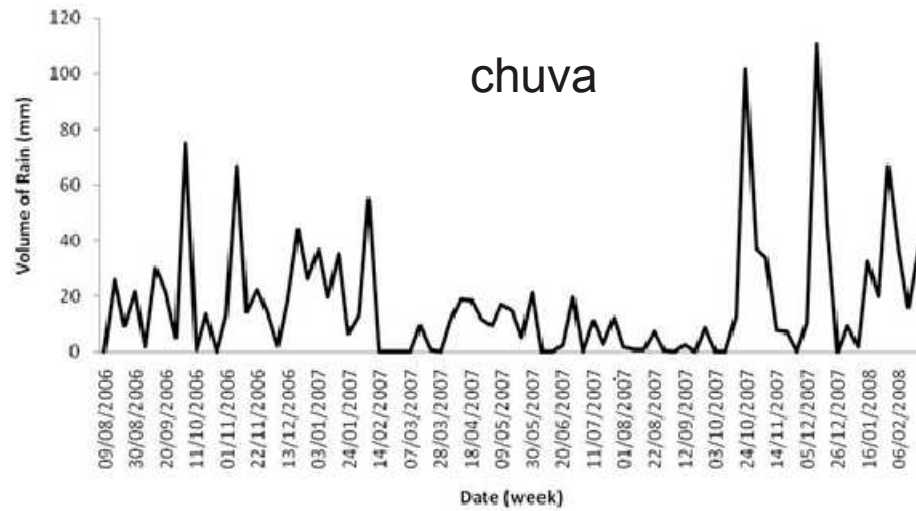
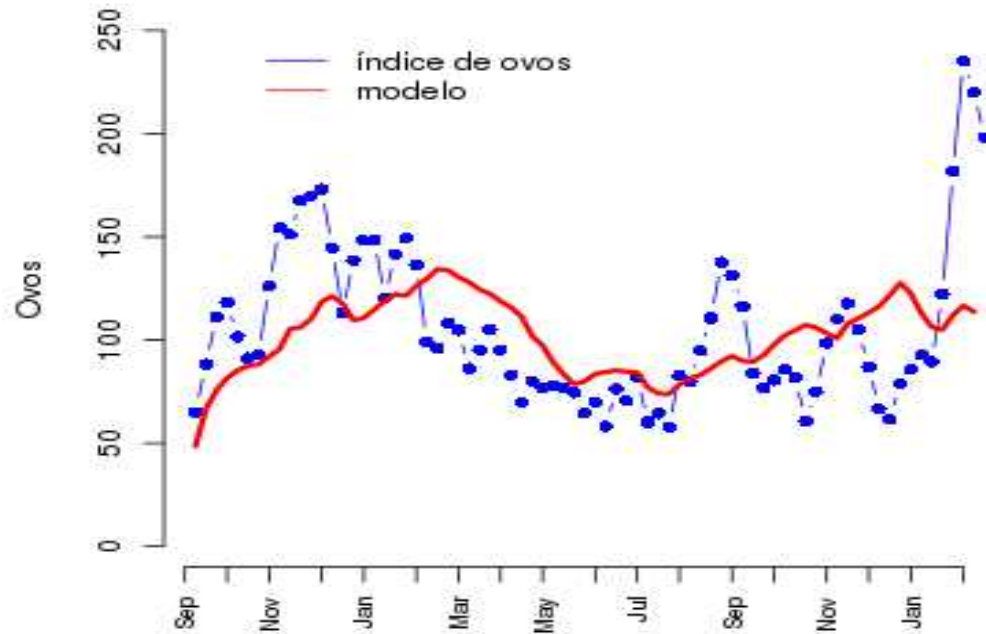
$$\frac{dPupas}{dt} = Rd(Temp)(Pupas) - (1/100) Pupas - Rd(Temp) Pupas$$

$$\frac{dAdultos}{dt} = Rd(Temp)(Pupas) - (1/30) Adultos$$

$$Ovos/semana = Integral(0.5(1 - Larvas/K) Adultos), \Delta t = 7 \text{ dias}$$

- K=100 (Ajustar K aos dados)
- Método de mínimos quadrados
- Python

K = 86



$R^2 = 0.75$, $r = 0.6$



K alto

K baixo

K alto

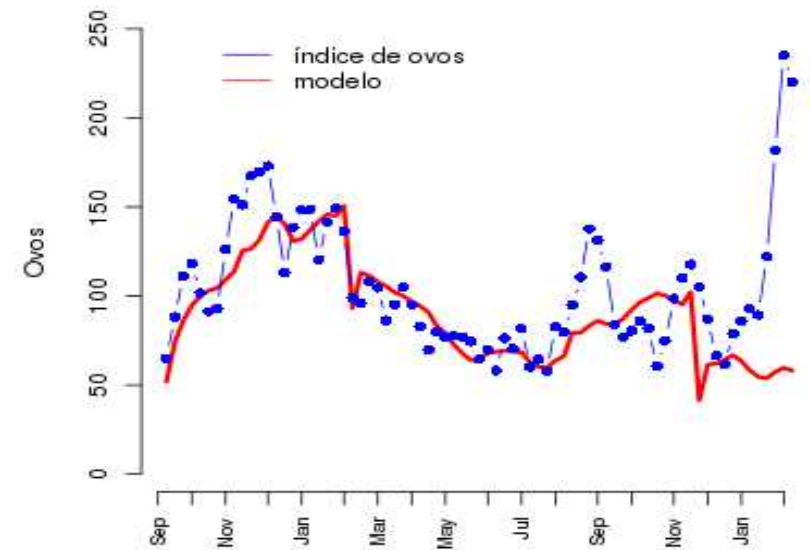
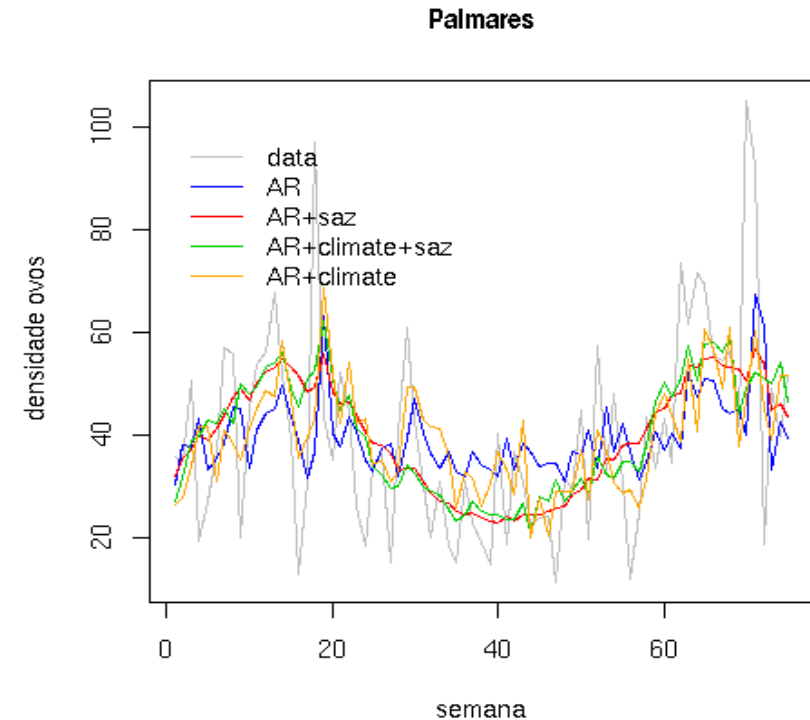
Resumindo

Abordagem estatística (fenomenológica)

- Modelo linear generalizado
- Inferência bem desenvolvida
- Bom ajuste com GAM (estrutura flexível)
- Pouco poder explicativo

Abordagem da física (mecanicista)

- Inferência rudimentar
- Estrutura mais rígida, embasada em teoria biológica
- Bom ajuste com K variando
- Bom poder explicativo



E a dengue?

- Há um limiar em 22-24 graus, abaixo do qual a temperatura é protetora.
- A chuva não tem efeito linear forte no nível de infestação.
- A chuva parece estar associada de forma mais qualitativa, criando um ambiente com maior ou menor capacidade de produção de adultos.



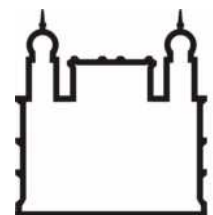
Agradecimentos

Entomologia, Fiocruz:

- Nildimar Honório, Ricardo Lourenço, Denise Valle, Rafael de Freitas,

Modelagem, Fiocruz e UFOP:

- Claudio Struchiner, Paula Luz, Arthur Weiss, Flavio Coelho, Raquel Lana, Tiago Carneiro
- Rede Pronex Modelagem em Dengue CNPq



Ministério da Saúde

FIOCRUZ

Fundação Oswaldo Cruz

Contato: codeco@fiocruz.br

