

MODELAGEM DA DINÂMICA DA EPIDEMIA DE DENGUE  
NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO INCLUINDO EFEITOS  
DA TEMPERATURA, DA UMIDADE ESPECÍFICA E DA  
PRECIPITAÇÃO

JULIO CESAR BARRETO DA SILVA

DISSERTAÇÃO APRESENTADA  
AO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA  
DO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA  
DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
PARA  
OBTENÇÃO DO TÍTULO  
DE  
MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA)

Programa de Pós-Graduação em Meteorologia  
(PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ)  
Orientador: Prof. Dr. Hugo Abi Karam

Rio de Janeiro, 28 de fevereiro de 2012

# MODELAGEM DA DINÂMICA DA EPIDEMIA DE DENGUE NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO INCLUINDO EFEITOS DA TEMPERATURA, DA UMIDADE ESPECÍFICA E DA PRECIPITAÇÃO

Esta dissertação contém as correções e alterações sugeridas pela Comissão Julgadora durante a defesa realizada por JULIO CESAR BARRETO DA SILVA em 28 Fev. 2012. O original encontra-se disponível no Departamento de Meteorologia do IGEO-CCMN da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ.

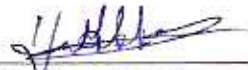
Comissão Julgadora:

- Prof. Edson Pereira Marques Filho, Dr. - IGEO-UFRJ
- Prof. Fernando Portela Câmara, Dr. - IMPPG-UFRJ
- Prof. Hugo Abi Karam, Dr. - IGEO-UFRJ (Orientador)

MODELAGEM DA DINÂMICA DA EPIDEMIA DE DENGUE NO MUNICÍPIO DO  
RIO DE JANEIRO INCLUINDO EFEITOS DA TEMPERATURA, DA UMIDADE  
ESPECÍFICA E DA PRECIPITAÇÃO

Julio Cesar Barreto da Silva

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).



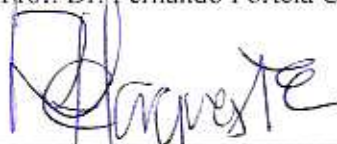
---

Prof. Dr. Hugo Abi Karam (Orientador)



---

Prof. Dr. Fernando Portela Câmara



---

Prof. Dr. Edson Pereira Marques Filho

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL  
FEVEREIRO DE 2012

# Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, por estar sempre presente em minha vida, iluminando minha caminhada, cuidando de meu espírito e me dando paz.

À minha mãe, minha eterna rainha, quem me acolhe, quem me forneceu os ensinamentos da vida, dando-me apoio conselhos, educação e me acolhendo em seu colo, meu porto seguro.

À minhas irmãs Leila e Vera, e a meu sobrinho Luis Felipe, família, o elo, eixo de tudo, fonte de inspiração para minha garra, amo vocês!

Ao meu primo Rodrigo, às minhas primas Aline, Martha, Sandra e Tatiane, e à minha afilhada Lara, por tudo o que vocês representam para mim, dedico parte deste sucesso a vocês.

Ao meu chefe e amigo Artur, um agradecimento especial, pois sem sua força jamais conseguiria, obrigado pelo estímulo e pela consideração depositada em mim, serei sempre grato.

Aos meus amigos de mestrado Antônio, Cristian Sheila e Francisco Mesquita, pelas constantes ajudas, pelo apoio, pela união, foram dois anos de muita luta, mas acredito que seremos todos vencedores.

Aos meus amigos de graduação André Victor, Joyce Gonçalves e Luciene Aquino, pessoas as quais passei a ter grande carinho e admiração, trazendo-os para o seio de minha família, vocês não são somente meus amigos, mas sim meus irmãos, amo vocês!

Aos meus amigos de trabalho, em especial à Danielle Leon, Deborah, Ludmila, Monteiro, Roberta e Wallace, muito obrigado por tudo, vocês são muito importantes pra mim, com o tempo, de simples colegas de trabalho, passei a respeitá-los e admirá-los.

Aos meus amigos, em especial à Giselle Melo, Luana Martins, Thelma Dantas e William Mennano, que sempre estiveram comigo, amigos do peito.

Ao Instituto de Biologia e ao Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, por me fornecerem as ferramentas necessárias para minha formação científica.

Ao DATASUS e à Secretaria Municipal de Saúde do Rio de Janeiro, pelo auxílio no fornecimento dos dados de Casos Notificados por Dengue.

À NOAA-NCDC e à Fundação GeoRIO pela liberação do acesso aos dados climatológicos.

Ao Comando da Aeronáutica por estar sempre investindo em meu conhecimento técnico e por acreditar em minha carreira.

Ao meus Professores, que me deram os ensinamentos necessários para hoje ser quem eu sou, em especial às Professoras de Graduação Benedita Aglai e Déia Maria e aos Professores de Pós-Graduação Claudine e Edson, que me impulsionaram e me forneceram estrutura para o aprofundamento de meus conhecimentos científico-acadêmicos.

Ao meu Professor e Orientador Hugo Abi Karam, uma homenagem especial, pois depositou em mim confiança e acreditou que esse trabalho poderia ser concluído. Sou grato a você por esse momento que estou conquistando agora. Os conhecimentos a mim passados foram preciosos e os levarei pelo resto de minha vida. Tenho a certeza de que hoje, ao olhar para o passado próximo, percebo que algo mudou e que o crescimento científico caminha a passos largos. Obrigado por tudo o que você vem me transmitindo, contribuindo, assim, para este crescimento.

À minha afilhada Viviane Barreto Gomes (in memoriam), dedico a você parte da minha conquista, sua lembrança e seu amor irão perdurar pelo resto de minha existência em meu coração e em minha mente. Agora você é um anjo de luz, aonde você estiver, sei que carrega consigo toda essa alegria e energia que aqui nesta vida denotou ter. Sempre te amarei!

A todos vocês sou grato e deposito aqui minha consideração, carinho, respeito e admiração.

"A coisa mais indispensável a um homem é reconhecer o uso que deve fazer do seu próprio conhecimento."

Platão

Sonhe

Seja o que você quer ser,  
porque você possui  
apenas uma vida  
e nela só se tem uma chance  
de fazer aquilo que quer.

Tenha felicidade bastante  
para fazê-la doce.  
Dificuldades para fazê-la forte.  
Tristeza para fazê-la humana.  
E esperança suficiente  
para fazê-la feliz.

As pessoas mais felizes  
não têm as melhores coisas.  
Elas sabem fazer o melhor  
das oportunidades que aparecem  
em seus caminhos.

A felicidade aparece  
para aqueles que choram.  
Para aqueles que se machucam.  
Para aqueles que buscam e tentam sempre.  
E para aqueles que reconhecem  
a importância das pessoas  
que passam por suas vidas.

Clarice Lispector



# Resumo

A partir do século passado, a dengue, uma doença típica de regiões de clima tropical e subtropical, tem sido cada vez mais encontrada na América do Sul. A introdução dos quatro sorotipos virais na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) tem sido um fator alarmante às Secretarias de Saúde e de Vigilância Epidemiológica para o entendimento e controle da doença. Este trabalho visa melhorar o conhecimento sobre os ciclos epidemiológicos através do desenvolvimento de um modelo de equações diferenciais parciais para a dinâmica populacional do mosquito *Aedes aegypti* (PDE), do vírus e da população humana, com um pré-processamento, controle de qualidade e assimilação por relaxação newtoniana de variáveis atmosféricas de temperatura, umidade específica e precipitação, como também de casos notificados de hospitalização por dengue. A fim de compreender a relação entre o clima na RMRJ e aquela dinâmica, foram feitas análises dos dados observacionais, bem como das simulações geradas pelo modelo, incluindo-se variação dos estágios entomológicos do *Aedes aegypti*, da entropia, de graus-dia, do número de observações eventos de precipitação e de água acumulada no reservatório linear hidrológico dos criadouros do mosquito, desenvolvido especificamente para este trabalho, a partir de uma série histórica de Jan. 2000 a Dez. 2011.

**Palavras-chave:** Assimilação de Dados Meteorológicos, Dengue, Modelo Numérico Epidemiológico, Parâmetros Entomológicos, Reservatório Linear de Criadouros de *Aedes aegypti*, Retroalimentação de Reinfecção e Variáveis Atmosféricas.





# Abstract

From the last century the dengue fever has increasingly been found in South America and it is a disease typical of regions of tropical and subtropical climate. The introduction of the four serotypes in the Metropolitan Region of the Rio de Janeiro (RMRJ) has been a alarmingly factor to the Departments of Health and Epidemiological Surveillance for understanding and controlling the disease. This work aims to improve knowledge about the epidemiological cycles by the development of one model of partial differential equations for the population dynamics of mosquito *Aedes aegypti* (PDE) of the virus and of the human population with a pre-processing, quality control and assimilation by nudging for the atmospheric variables of temperature, specific humidity and precipitation, as well as for the reported cases of hospitalization for dengue. In order to understand the relationship between the climate in RMRJ and that dynamic analysis was performed on the observational data and simulations generated by the model including the variation of entomological stages of the *Aedes aegypti*, entropy, degrees-day, observated number of precipitation events and water accumulated in the reservoir linear hydrological mosquito breeding developed specifically for this work from a historical series by Jan. 2000 to Dez. 2011.

**Keywords:** Atmospheric Variables, Dengue, Entomological Parameters, Epidemiology Numerical Model, Feedback of Reinfection, Linear Reservoir of Breeding of *Aedes aegypti* and Meteorological Data Assimilation



# Sumário

|   |              |
|---|--------------|
| <b>Lista de Abreviaturas</b>  | <b>xi</b>    |
| <b>Lista de Símbolos</b>  | <b>xiii</b>  |
| <b>Lista de Figuras</b>   | <b>xvii</b>  |
| <b>Lista de Tabelas</b>   | <b>xxiii</b> |
| <b>1 Introdução</b>   | <b>1</b>     |
| 1.1 Breve Histórico da Dengue no Brasil . . . . .                                     | 5            |
| 1.2 Clima na RMRJ . . . . .   | 6            |
| 1.3 Breve Histórico dos Modelos Matemáticos para Dengue . . . . .                     | 16           |
| 1.4 Considerações Preliminares . . . . .  | 20           |
| 1.5 Objetivos . . . . .   | 22           |
| 1.6 Contribuições ao problema . . . . .   | 22           |
| 1.7 Uma perspectiva pessoal: de paciente à pesquisador . . . . .                      | 22           |
| <b>2 Materiais e método</b>   | <b>25</b>    |
| 2.1 Fontes de dados meteorológicos à superfície e de notificações de agravo . . . . . | 25           |
| 2.1.1 Preparação dos dados . . . . .  | 27           |
| 2.1.2 Sincronização dos dados observados e análise dupla de massa . . . . .           | 28           |
| 2.2 Balanço de energia . . . . .  | 28           |
| 2.3 Balanço de água . . . . .   | 29           |
| 2.3.1 Modelo de reservatório linear para os criadouros . . . . .                      | 31           |
| 2.3.2 Evapotranspiração potencial pelo método de combinação de Penman . . . . .       | 36           |
| 2.3.3 Evapotranspiração pelo método de combinação de Penman-Monteith . . . . .        | 38           |
| 2.4 Modelo de dinâmica de população . . . . .   | 39           |
| 2.4.1 Dinâmica de população do vírus . . . . .  | 40           |
| 2.4.2 Modelos de Malthus e Verhulst . . . . .   | 40           |
| 2.4.3 Dinâmica da população do vetor <i>Aedes aegypti</i> . . . . .                   | 41           |
| 2.4.4 Parâmetros entomológicos . . . . .  | 43           |
| 2.4.5 Dinâmica da população humana . . . . .  | 44           |
| 2.5 Ciclo de assimilação de dados . . . . .   | 52           |
| 2.6 Análise de Variância - ANOVA . . . . .  | 54           |
| 2.7 Verificação das incertezas da simulação . . . . .                                 | 56           |
| 2.7.1 Raiz do erro quadrático médio . . . . .   | 57           |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.7.2    | Eficiência de Nash-Sutcliffe . . . . .                                      | 58        |
| 2.8      | Coeficiente de Correlação de Pearson . . . . .                              | 58        |
| 2.9      | Entropia e Graus-dia . . . . .  | 59        |
| <b>3</b> | <b>Resultados</b>   | <b>61</b> |
| 3.1      | Análise de Observações Atmosféricas . . . . .                               | 61        |
| 3.1.1    | Dados Observacionais de Temperatura do Ar . . . . .                         | 61        |
| 3.1.2    | Dados Observacionais de Umidade Relativa do Ar . . . . .                    | 64        |
| 3.1.3    | Dados Observacionais de Precipitação . . . . .                              | 66        |
| 3.2      | Análise de Casos Notificados de Agravos por Dengue . . . . .                | 68        |
| 3.2.1    | Casos Notificados por Dengue e Índice de Oscilação Sul (IOS) . . . . .      | 73        |
| 3.3      | Simulações . . . . .  | 74        |
| 3.3.1    | Simulação com assimilação de 100% e 50% da precipitação observada . . . . . | 74        |
| 3.4      | Eficiência de Nash-Sutcliffe . . . . .                                      | 82        |
| <b>4</b> | <b>Conclusões</b>   | <b>87</b> |
| 4.1      | Considerações Finais . . . . .  | 88        |
| 4.2      | Sugestões de Pesquisas Futuras . . . . .                                    | 88        |
| <b>A</b> | <b>Apêndice</b>   | <b>91</b> |
| A.1      | Distribuição de Áreas de Planejamento na RMRJ . . . . .                     | 91        |
|          | <b>Referências Bibliográficas</b>   | <b>93</b> |
|          | <b>Índice Remissivo</b>   | <b>98</b> |

# Lista de Abreviaturas

|                 |   |
|-----------------|---|
| DNA             | Ácido Desoxirribonucleico   |
| ANVISA          | Agência Nacional de Vigilância Sanitária                                    |
| ABNT            | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                    |
| BG              | Baía de Guanabara   |
| CLS             | Camada Limite Superficial   |
| UC              | Cânions Urbanos ( <i>Urban Canyons</i> )                                    |
| NCDC            | Centro Nacional de Dados Climáticos ( <i>National Climate Data Center</i> ) |
| CDC             | <i>Center for Disease Control and Prevention</i> )                          |
| COMAER          | Comando da Aeronáutica  |
| DECEA           | Departamento de Controle do Espaço Aéreo                                    |
| CD              | Desenvolvimento Cumulativo Diário   |
| TKE             | Energia Cinética Turbulenta ( <i>Turbulent Kinetic Energy</i> )             |
| SBAF            | Estação Meteorológica de Superfície dos Afonsos                             |
| SBGL            | Estação Meteorológica de Superfície do Galeão                               |
| SBJR            | Estação Meteorológica de Superfície de Jacarepaguá                          |
| SBRJ            | Estação Meteorológica de Superfície do Rio de Janeiro                       |
| SBSC            | Estação Meteorológica de Superfície de Santa Cruz                           |
| FD              | Febre do Dengue   |
| FHD             | Febre Hemorrágica do Dengue   |
| FORTTRAN        | <i>IBM Mathematical FORMula TRANslation System</i>                          |
| FUNASA          | Fundação Nacional de Saúde  |
| Fundação GeoRIO | Fundação Instituto de Geotécnica do Município do RJ                         |
| UHI             | Ilhas de Calor Urbanas ( <i>Urban Hot Island</i> )                          |
| IDH-M           | Índice de Desenvolvimento Humano Municipal                                  |
| METAR           | Informe Meteorológico Regular de Aeródromo                                  |
| IBGE            | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                             |
| SIR             | Modelo Populacional Suscetível-Infetado-Recuperado                          |
| SIRS            | Modelo Populacional Suscetível-Infetado-Recuperado-Suscetível               |
| SEIR            | Modelo Populacional Suscetível-Exposto-Infetado-Recuperado                  |
| SEIRS           | Modelo Pop. Suscetível-Exposto-Infetado-Recuperado-Suscetível               |
| MS              | Ministério da Saúde   |
| NOAA            | <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>                      |
| OMM             | Organização Meteorológica Mundial   |
| PH              | Potencial Hidrogeniônico  |

|          |  |
|----------|--|
| RMRJ     | Região Metropolitana do Rio de Janeiro   |
| SCD      | Síndrome do Choque da Dengue   |
| SINAN    | Sistema de Informações Nacional de Agravos Notificados                           |
| SVS      | Serviço de Vigilância Epidemiológica   |
| EOS-NASA | Sistema de Observação da Terra ( <i>Earth Observing System</i> )                 |
| SUS      | Sistema Único de Saúde   |
| HIV      | Vírus Imunodeficiente Humano ( <i>Human Immunodeficiency Virus</i> )             |
| RSV      | Vírus Sincicial Respiratório Humano ( <i>Human Respiratory Syncicial Virus</i> ) |
| ZCAS     | Zona de Convergência do Atlântico Sul  |





# Lista de Símbolos

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| $E$                         | <i>Aedes aegypti</i> na fase ovo  |
| $L$                         | <i>Aedes aegypti</i> na fase larva  |
| $P$                         | <i>Aedes aegypti</i> na fase pupa   |
| $C$                         | Capacidade total de criadouros (reservatórios)  |
| $(1 - \frac{E(t)}{(1-f)C})$ | Disponib. de criadouros para receber os ovos de cada mosquito fêmea                   |
| $f$                         | Fração de criadouros removidos  |
| $\lambda_h(t)$              | Incidência de dengue entre humanos (força de infecção) ( $dia^{-1}$ )                 |
| $\lambda_w(t)$              | Incidência de dengue entre mosquitos (força de infecção) ( $dia^{-1}$ )               |
| $\lambda_h(t)s(t)N$         | Incidência total (número de novos casos de infecção entre humanos) ( $dia^{-1}$ )     |
| $s$                         | Indivíduos suscetíveis  |
| $e$                         | Indivíduos expostos   |
| $r$                         | Indivíduos recuperados  |
| $i$                         | Indivíduos infectantes  |
| $(t)$                       | Instante de tempo $t$   |
| $\phi^{th}(T)$              | Limiar de infestação de mosquitos em função da temperatura                            |
| $\Theta_m(T)$               | Limiar de parâmetro entomológico dependente da temperatura                            |
| $W_1$                       | Mosquitos suscetíveis   |
| $W_2$                       | Mosquitos infectados, porém não-infectantes   |
| $W_3$                       | Mosquitos infectantes   |
| $W$                         | Mosquitos fêmeas  |
| $Q_0$                       | Número de descendentes basal $Q_0$  |
| $R_0$                       | Número de reprodutividade basal $R_0$   |
| $s(t)$                      | Número de indivíduos suscetíveis, em cada instante de tempo ( $dia^{-1}$ )            |
| $e(t)$                      | Número de indivíduos expostos, em cada instante de tempo ( $dia^{-1}$ )               |
| $r(t)$                      | Número de indivíduos recuperados, em cada instante de tempo ( $dia^{-1}$ )            |
| $i(t)$                      | Número de indivíduos infectantes, em cada instante de tempo ( $dia^{-1}$ )            |
| $E(t)$                      | Número de ovos em cada instante de tempo ( $dia^{-1}$ )                               |
| $L(t)$                      | Número de larvas em cada instante de tempo ( $dia^{-1}$ )                             |
| $P(t)$                      | Número de pupas em cada instante de tempo ( $dia^{-1}$ )                              |
| $W_1(t)$                    | Número de mosquitos suscetíveis, em cada instante de tempo ( $dia^{-1}$ )             |
| $W_2(t)$                    | Número de mosquitos infect. não-infectantes, em cada instante de tempo ( $dia^{-1}$ ) |
| $W_3(t)$                    | Número de mosquitos infectantes, em cada instante de tempo ( $dia^{-1}$ )             |
| $W(t)$                      | Número total de mosquitos adultos fêmeas ( $dia^{-1}$ )                               |
| $\gamma^{-1}$               | Período de incubação extrínseca do vírus no mosquito                                  |
| $\alpha^{-1}$               | Período de incubação intrínseca do vírus na população humana                          |
| $\eta^{-1}$                 | Período de infecção ou recuperação da população humana                                |

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| $PRP$                                | Precipitação  |
| $\phi W(t)(1 - \frac{E(t)}{(1-f)C})$ | Taxa <i>efetiva</i> de produção total de ovos ( $dia^{-1}$ )                        |
| $\varepsilon$                        | Redução na busca efetiva por repasto sanguíneo pelo envelhec. de mosquitos          |
| $\sum$                               | Somatório   |
| $DENV - 1$                           | Sorotipo do vírus da dengue tipo 1 ( $dia^{-1}$ )                                   |
| $DENV - 2$                           | Sorotipo do vírus da dengue tipo 2 ( $dia^{-1}$ )                                   |
| $DENV - 3$                           | Sorotipo do vírus da dengue tipo 3 ( $dia^{-1}$ )                                   |
| $DENV - 4$                           | Sorotipo do vírus da dengue tipo 4 ( $dia^{-1}$ )                                   |
| $\phi$                               | Taxa intrínseca de ovoposição ( $dia^{-1}$ )  |
| $\varphi$                            | Taxa de eclosão de ovos para larvas ( $dia^{-1}$ )                                  |
| $\delta$                             | Taxa de transformação de larvas em pupas ( $dia^{-1}$ )                             |
| $\sigma$                             | Taxa de transformação de pupas para a fase adulta (voadores) ( $dia^{-1}$ )         |
| $\beta_w$                            | Taxa de transf. de voad. não-infect. para infectados não-infectantes ( $dia^{-1}$ ) |
| $\gamma$                             | Taxa de transf. de voadores não infectantes para infectantes ( $dia^{-1}$ )         |
| $\beta'_h$                           | Taxa de transformação de indivíduos suscetíveis em expostos ( $dia^{-1}$ )          |
| $\alpha$                             | Taxa de transformação de indivíduos expostos em infectantes ( $dia^{-1}$ )          |
| $\eta$                               | Taxa de transformação de indivíduos infectantes em recuperados ( $dia^{-1}$ )       |
| $\mu_o$                              | Taxa de mortalidade de ovos ( $dia^{-1}$ )  |
| $\alpha$                             | Taxa de transformação de indivíduos expostos em infectantes ( $dia^{-1}$ )          |
| $\eta$                               | Taxa de transformação de indivíduos infectantes em recuperados ( $dia^{-1}$ )       |
| $\mu_o$                              | Taxa de mortalidade de ovos ( $dia^{-1}$ )  |
| $\mu_l$                              | Taxa de mortalidade de larvas ( $dia^{-1}$ )  |
| $\mu_p$                              | Taxa de mortalidade de pupas ( $dia^{-1}$ )   |
| $\mu_w$                              | Taxa de mortalidade de fêmeas adultas ( $dia^{-1}$ )                                |
| $\mu$                                | Taxa de mortalidade de indivíduos humanos ( $dia^{-1}$ )                            |
| $T$                                  | Temperatura   |
| $UR$                                 | Umidade relativa  |
| $b_i$                                | 1/Unidade de dias x [ $^{\circ}C$ ]   |



# Lista de Figuras

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Ciclo de desenvolvimento e fator de sobrevivência do vetor da dengue. A metamorfose é dependente do desenvolvimento cumulativo diário (CD) e de outros fatores do estágio-específico de vida. Fonte: adaptado de Christophers (1960) [1]. . . . .   | 3  |
| 1.2 | Fêmea de <i>Aedes aegypti</i> ao final do repasto com intestino repleto de sangue. Fonte: Gathany (2006) [2]. . . . .   | 4  |
| 1.3 | Larvas de <i>Aedes aegypti</i> em processo de desenvolvimento junto ao espelho d'água. Fonte: Center for Disease Control and Prevention-CDC (1964) [3]. . . . .   | 5  |
| 1.4 | Distribuição do número de Casos Notificados de Agravos por Dengue no decorrer dos anos, no Município do Rio de Janeiro - RJ, no período de Jan. 2000 a Dez. 2011. Dados brutos obtidos do SINAN-net. Valores apresentados em destaque referentes à quantidade de indivíduos infectados( $hab^{-1}$ ). . . . .   | 7  |
| 1.5 | a e b. Distribuição Mensal decrescente do número de Casos Notificados de Agravos por Dengue ( $hab^{-1}$ ), por Bairros do Município do Rio de Janeiro - RJ, e respectivo percentual em relação ao número total de casos, para o período de Jan. 2000 a Dez. 2011. Dados brutos obtidos do SINAN-net. * Ordem decrescente da quantidade de casos por Bairros. . . . .   | 10 |
| 1.6 | Distribuição Mensal decrescente do número de Casos Notificados de Agravos por Dengue ( $hab^{-1}$ ), por Regiões Administrativas do Município do Rio de Janeiro - RJ, e respectivo percentual em relação ao número total de casos, para o período de Jan. 2000 a Dez. 2011. Dados brutos obtidos do SINAN-net. * Ordem decrescente da quantidade de casos por Regiões Administrativas. . . . .  | 11 |
| 1.7 | Imagem de fundo referente à Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Os números indicam a localização aproximada das estações meteorológicas dos aeroportos: Tom Jobim (1), Santos Dumont (2), Campos dos Afonsos (3), Jacarepaguá (4) e Santa Cruz (5). Áreas em verde na imagem indicam vegetação arbustiva e/ou gramíneas sobre encostas de morros, escarpas e locais de mais difícil acesso, como mangues remanescentes na APA de Guapimirim ou ainda grande presença de algas na superfície dos corpos de água. Áreas em azul, indicam o Oceano Atlântico e lagoas litorâneas, estuários e baías do RJ. Áreas urbanas dos diferentes municípios da RMRJ formam a grande conurbação em tons de cinza, sobre as áreas de urbanização formal e informal. Fonte da imagem: EOS-NASA (2008) [4]. . . . . | 12 |

- 1.8 Superfície tridimensional da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, quase correspondente à região mostrada na Fig. 1.7. Os três maciços rochosos da RMRJ aparecem destacados como suas elevações máximas em torno de 1000 m, na direção a oeste da Baía de Guanabara. À sudoeste da imagem localiza-se a Baía de Sepetiba - RJ e ao Norte, apenas uma porção das encostas da Serra do Mar que flanqueiam o Planalto Brasileiro. Fonte do Modelo Digital de Elevação com resolução nominal de 90 m: SRTM-NASA (2008) [5]. . . . . 13
- 1.9 Seção temporal da temperatura média do ar à superfície, em função do mês do ano (ordenadas) e das horas do dia (abscissas), calculada entre 1999-2011 com dados concentrados de mensagens METAR relativas ao *Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim*, no bairro Galeão da Ilha do Governador do Município do Rio de Janeiro. Fonte: Karam, 2011 (comunicação pessoal). . . . . 13
- 1.10 Evolução temporal da Ilha de Calor Urbana entendida como a diferença da temperatura potencial média do ar de potencial, em ( $^{\circ}\text{C}$ ), das estações em área muito urbanizada em relação ao seu valor na estações periférico-vegetada, disponíveis ao longo do Município do Rio de Janeiro. Fonte: Marques Filho *et al.* (2009) [6]. . . . . 15
- 1.11 Distribuição espacial da temperatura da superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, obtida a partir da aplicação da metodologia proposta por Coll (2003) a uma imagem de satélite NOAA, de Jun. 2003. Fonte: Marques Filho *et al.* (2009) [6]. 16
- 1.12 Estrutura geral do modelo SIR usado para caracterizar as classes de indivíduos com relação à transmissão de infecção por dengue. As caixas representam os grupos de indivíduos na condição epidêmica específica e as flechas representam fluxos de indivíduos movendo-se de uma condição para outra, conforme a atividade viral no organismo. Fonte: Vynnycky e White (2010) [7]. . . . . 17
- 1.13 Estrutura geral do modelo SIRS usado para caracterizar as classes de indivíduos com relação à transmissão de infecção por dengue. As caixas representam os grupos de indivíduos na condição epidêmica específica e as flechas representam fluxos de indivíduos movendo-se de uma condição para outra, conforme a atividade viral no organismo. Fonte: Vynnycky e White (2010) [7]. . . . . 18
- 1.14 Estrutura geral do modelo SEIR usado para caracterizar as classes de indivíduos com relação à transmissão de infecção por dengue. As caixas representam os grupos de indivíduos na condição epidêmica específica e as flechas representam fluxos de indivíduos movendo-se de uma condição para outra, conforme a atividade viral no organismo. Fonte: Vynnycky e White (2010) [7]. . . . . 18
- 1.15 Estrutura geral do modelo SEIRS usado para caracterizar as classes de indivíduos com relação à transmissão de infecção por dengue. As caixas representam os grupos de indivíduos na condição epidêmica específica e as flechas representam fluxos de indivíduos movendo-se de uma condição para outra, conforme a atividade viral no organismo. A flecha de retorno (*output-input*) indica retroalimentação, capaz de gerar *feedbacks* positivos ou negativos. Fonte: Vynnycky e White (2010) [7]. . . . . 18

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.16 | Estrutura geral do Modelo de Transmissão Dinâmica da Dengue usado neste Trabalho. As letras próximas às setas representam a razão na qual os indivíduos se movem de uma categoria para outra com relação à atividade viral no organismo humano. Fonte: White et al. (2007) [8]. . . . .   | 19 |
| 2.1  | Balanco de energia (linha superior) e de radiação (linha inferior) sobre superfícies terrestres idealizadas, sob condições de alta pressão, anticiclônicas e céu claro, para o dia, Figs. (a) e (c); e para a noite, Figs. (b) e (d), respectivamente. A energia solar recebida na forma de <i>densidade do saldo líquido do fluxo radiativo</i> (ou <i>irradiância líquida</i> ) ( $Q^*$ ), em unidades de $W.m^{-2}$ , é igual a soma das irradiâncias incidentes e emergentes nas faces do volume de controle tridimensional, uma vez considerada a absorção da energia radiante e seu armazenamento na forma de calor. Ilustração baseada em Oke (1987)[9]. . . . . | 30 |
| 2.2  | Termos do balanço de água no solo. Ilustração baseada em Brutsaert (2005)[10] . . .   | 32 |
| 2.3  | Esquema ilustrativo do reservatório linear de água. Ilustração baseada em Beven (2001) [11]. . . . .  | 34 |
| 2.4  | Parametrização da taxa de ovoposição (valor relativo), em $dia^{-1}$ , em função da temperatura do ar, $T$ , em ( $^{\circ}C$ ), como proposta por Yang <i>et al.</i> (2009) [12]. Os pontos são observações; a linha contínua corresponde à parametrização por uma função polinomial de terceira-ordem; e a linha tracejada à função polinomial de sexta-ordem. Note-se a assimetria em direção à altas temperaturas, com <i>optimum</i> aparente a $35^{\circ}C$ . 44   | 44 |
| 2.5  | Parametrização da taxa de pupação (valor relativo) (ovos em larvas), em $dia^{-1}$ , em função da temperatura do ar, $T$ , em $^{\circ}C$ , como proposta por Yang <i>et al.</i> (2009) [12]. Os pontos são observações; a linha contínua corresponde à parametrização por uma função polinomial de terceira-ordem; e a linha tracejada à função polinomial de sexta-ordem. Note-se a assimetria em direção à altas temperaturas, com <i>optimum</i> aparente a $35^{\circ}C$ . . . . .   | 45 |
| 2.6  | Parametrização da taxa de mortalidade de mosquitos (valor relativo), em $dia^{-1}$ , em função da temperatura do ar, $T$ , em $^{\circ}C$ , como proposta por Yang <i>et al.</i> (2009) [12]. Os pontos são observações; a linha contínua corresponde à parametrização por uma função polinomial de terceira-ordem; e a linha tracejada à função polinomial de sexta-ordem. Note-se os efeitos da hipotermia e hipertermia, respectivamente, abaixo de $16^{\circ}C$ e acima de $32^{\circ}C$ . . . . .   | 46 |
| 2.7  | Elementos do modelo não-linear para a dinâmica populacional da dengue. Ilustração baseada em Lyapunov (1892) [13]. . . . .  | 52 |
| 3.1  | Visão bidimensional dos dados observacionais de <b>Temperatura Média do Ar</b> junto à superfície, em anos por dias do ano, respectivamente, eixos x e y; em graus Celsius, no período de jan. 2000 a dez. 2010, coletados da NOAA - NCDC, a partir de dados brutos de METAR das Estações Meteorológicas de Superfície estudadas, pertencentes ao COMAER, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010, no Município do Rio de Janeiro: (a) Afonsos (SBAF); (b) Galeão (SBGL); (c) Jacarepaguá (SBJR); (d) Santos Dumont (SBRJ) e (e) Santa Cruz (SBSC). . . . .   | 62 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 3.2  | Visão bidimensional dos dados observacionais de <b>Umidade Relativa Média do Ar</b> junto à superfície, em anos por dias do ano, respectivamente, eixos x e y; em porcentagem, no período de jan. 2000 a dez. 2010, coletados da NOAA - NCDC, a partir de dados brutos de METAR das Estações Meteorológicas de Superfície estudadas, pertencentes ao COMAER, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010, no Município do Rio de Janeiro: (a) Afonsos (SBAF); (b) Galeão (SBGL); (c) Jacarepaguá (SBJR); (d) Santos Dumont (SBRJ) e (e) Santa Cruz (SBSC). . . . .   | 65 |
| 3.3  | Gráfico de dispersão das séries históricas de precipitação ACUMULADA, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010, para análise da inclinação do ajuste linear entre a média de precipitação dos Postos Telepluviométricos e a precipitação média de determinado Posto, respectivamente, eixos x e y. Exemplo de distribuição por grau de inclinação: (a) Posto Campo Grande ( $\theta \simeq 45^\circ$ ); (b) Posto Cidade de Deus ( $\theta > 45^\circ$ ); (c) Posto Madureira ( $\theta < 45^\circ$ ); (d) Posto Saúde ( $\theta \lll 45^\circ$ ). Elaborado a partir de dados de precipitação da GeoRIO. . . . . | 68 |
| 3.4  | Distribuição Mensal de Casos Notificados de Agravos por Dengue no Município do Rio de Janeiro, RJ, para o período de Jan. 2000 a Dez. 2011. Dados brutos obtidos do SINAN-net. . . . .   | 70 |
| 3.5  | Distribuição histórica logarítmica do número de Casos Notificados de Agravos por Dengue no Município do RJ, no período de Jan. 2000 a Dez. 2011. (a) distribuição por meses e (b) distribuição por anos. Dados brutos obtidos do SINAN-net. . . . .  | 70 |
| 3.6  | Quadro comparativo da distribuição anual dos casos notificados de agravos por Dengue no Município do RJ, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010, por Regiões Administrativas: (a) Centro; (b) Barra da Tijuca; (c) Ilha do Governador; (d) Jacarepaguá; (e) Realengo, (f) Santa Cruz. O eixo y foi modificado para uma escala em Log10 para mostrar maiores detalhes. Dados brutos obtidos do SINAN-net. . . . .  | 71 |
| 3.7  | Quadro comparativo da distribuição mensal dos casos notificados de agravos por Dengue no Município do RJ, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010, por Regiões Administrativas: (a) Centro; (b) Barra da Tijuca; (c) Ilha do Governador; (d) Jacarepaguá; (e) Realengo, (f) Santa Cruz. O eixo y foi modificado para uma escala em Log10 para mostrar maiores detalhes. Dados brutos obtidos do SINAN-net. . . . .   | 72 |
| 3.8  | Distribuição das séries históricas de IOS e de casos de notificados por dengue no Município do RJ, no período de Jan. 2000 a Dez. 2011. Dados brutos de IOS obtidos no <i>Site</i> da NOAA-NCDC e dos casos de notificação obtidos do SINAN-net. . . . .   | 74 |
| 3.9  | Gráfico de dispersão entre as séries históricas de IOS e distribuição normal de casos notificados por dengue na RMRJ, no período de Jan. 2000 a Dez. 2011. Anomalias de pressão entre Tahiti e Darwin. Dados brutos de IOS obtidos da NOAA-NCDC e dos casos de notificação obtidos do SINAN-net. . . . .   | 75 |
| 3.10 | Simulação da evolução temporal da população relativa do vírus da dengue ( $st1 =$ sorotipo SERV-1, $st2 =$ sorotipo SERV-2, $st3 =$ sorotipo SERV-3 e $st4 =$ sorotipo SERV-4): (a) com assimilação de 100% de $R$ e (b) com assimilação de 50% de $R$ . . . . .   | 76 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 3.11 | Simulação da evolução temporal da população relativa de mosquitos <i>Aedes aegypti</i> , em suas diferentes fases ( $o$ = ovo, $l$ = larva, $p$ = pupa, $w1$ = mosquitos susceptíveis, $w2$ = mosquitos infectados não-infectantes, $w3$ = mosquitos infectantes e $w_{tot}$ = total de mosquitos fêmeas): (a) com assimilação de 100% de $R$ e (b) com assimilação de 50% de $R$ . . . . .   | 77 |
| 3.12 | Simulação da evolução temporal da dinâmica da população relativa humana, nos diferentes compartimentos de infecção ( $s$ = susceptíveis, $e$ = expostos, $i$ = infectados, $ir$ = reinfectados, $r$ = imunes, $m$ = mortos e $tot$ = população humana total): (a) com assimilação de 100% de $R$ e (b) com assimilação de 50% de $R$ . . . . .  | 79 |
| 3.13 | Evolução temporal da entropia estimada das observações de temperatura do ar, com assimilação de 100% de $R$ . Em (a) é apresentada a variação da entropia a cada 15 minutos (resolução da simulação) e (b) idem apresentada a cada 15 dias (baixa resolução). Observa-se um perda de informação associada à baixa amostragem dos valores da variação da entropia. Em baixa resolução os máximos de entropia se perdem, e isto é desfavorável, se a entropia é usada para caracterizar a organização energética do ambiente favorável ao surto epidêmico. . . . .  | 80 |
| 3.14 | Evolução temporal dos graus-dia (observados). Em (a) com assimilação de 100% de $R$ e (b) com assimilação de 50% de $R$ . . . . .   | 81 |
| 3.15 | Número observado de eventos de precipitação com intensidade maior que $0,2mmh^{-1}$ . . . . .   | 84 |
| 3.16 | Evolução temporal do reservatório superficial de água dos criadouros: (a) com assimilação de 100% de $R$ e (b) com assimilação de 50% de $R$ . . . . .  | 85 |
| 3.17 | Evolução temporal entre 2000 e 2010 do $\log_{10}$ do número relativo de indivíduos reinfectados durante surtos epidêmicos de dengue (simulado) e $\log_{10}$ do número de notificações de agravos por dengue (observado), na Ilha do Governador, RMRJ. Destaca-se aqui a evolução conjunta para mostrar períodos de comportamento similar, períodos de crescimento conjunto e períodos de decrescimento conjunto. Considerou-se uma fração efetivamente susceptível de 350000 pessoas para a população da RMRJ estimada em 11 milhões. Em (a) com assimilação de 100% de $R$ e (b) com assimilação de 50% de $R$ . . . . . | 86 |





# Lista de Tabelas

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1.1 | Comparação esquemática entre os modelos de dinâmica populacional para a dengue conhecidos e o presente trabalho. . . . .   | 21 |
| 2.1 | Estações Meteorológicas de Superfície pertencentes ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) do Brasil, localizadas no Município do Rio de Janeiro na RMRJ, RJ, Brasil. . . . .  | 27 |
| 2.2 | Postos Telepluviométricos pertencentes à Fundação GeoRIO/ALERTA-RIO da Prefeitura do Município do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, na vizinhança dos cinco aeroportos da RMRJ (2011). . . . .   | 27 |
| 3.1 | Quadro comparativo das temperaturas (T) médias , em °C e da quantidade de dias de verão associados à temperaturas elevadas ( $T_{verão}$ ), observadas nas Estações Meteorológicas de Superfície utilizadas no trabalho. . . . .                                 | 63 |
| 3.2 | Quadro comparativo das Umidades Relativas (UR) médias , em %, e da quantidade de dias de verão associados às taxas de UR apresentadas para aquele período ( $UR_{verão}$ ), observadas nas Estações Meteorológicas de Superfície utilizadas no trabalho. . . . . | 64 |
| 3.3 | Ajuste linear dos valores das séries de precipitação não-acumulada dos 32 Postos Telepluviométricos, pertencentes ao Sistema ALERTA-RIO da Fundação GEORIO/- Prefeitura do Rio de Janeiro, na RMRJ, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010. . . . .                 | 67 |
| 3.4 | Teste Estatístico de Variância (ANOVA) entre valores médios das séries e média geral de precipitação não-acumulada dos 32 Postos Telepluviométricos, pertencentes à Fundação Geo-Rio, na RMRJ, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010. . . . .                      | 69 |



# Capítulo 1

## Introdução

A dengue é uma doença viral aguda e de rápida disseminação. Uma enfermidade causada pelo vírus da dengue, um arbovírus da família Flaviviridae, gênero Flavivírus, que inclui quatro tipos imunológicos: DENV-1, DENV-2, DENV-3 e DENV-4. A infecção por um destes tipos imunológicos dá proteção permanente para o mesmo sorotipo e imunidade parcial e temporária contra os outros três (Braga e Valle, 2007) [14]. Dentre as doenças chamadas reincidentes a dengue configura, no primeiro decênio do século XXI, a mais importante arbovirose que afeta o homem e se constitui em um sério problema de saúde pública no mundo. De acordo com o Serviço de Vigilância em Saúde-SVS (SVS, 2005) [15] do Brasil, a situação epidêmica da dengue é mais grave nos países com condições de clima tropical e subtropical, em regiões altamente urbanizadas, onde são muito favoráveis à proliferação do mosquito *Aedes aegypti*, que é o principal vetor da dengue. Por outro lado, as condições precárias de saneamento básico encontradas nas grandes metrópoles do Brasil, em 2011, parecem favorecer a infecção por dengue, tendo em vista que a falta de acesso de uma parte da população à água tratada, faz com que esta acumule água de forma irregular, favorecendo o desenvolvimento de criadouros de mosquitos.

As vacinas polivalentes para os sorotipos da dengue ainda se encontram em fase de testes e a prevenção no Brasil em 2011 se dá por meio de alertas de risco dadas pela vigilância epidemiológica e também via controle mecânico e químico da população do vetor. O controle mecânico é feito pela tentativa de eliminação dos criadouros, isto é, tentando-se eliminar recipientes de água com condições favoráveis ao desenvolvimento das larvas do mosquito, como potes, vasos de plantas, pneus, que podem acumular água de chuva, de irrigação ou de uso dentro das habitações, e que se encontram em locais relativamente protegidos da iluminação direta e da evaporação. Já o controle químico consiste na aplicação de produtos, larvicidas em reservatórios potenciais e inseticidas, aplicados ao ar livre nos locais onde o vetor é encontrado à tarde. O conhecimento das causas que influenciam na variação do número da população de mosquitos pode auxiliar na escolha da forma de controle mais apropriada e assim reduzir tal população. Os resultados destas medidas ainda são indefinidos, visto que as epidemias se mantêm recorrentes, apesar da aplicação desses controles mecânico e químico.

Quanto à Vigilância Epidemiológica, segundo Braga e Valle (2007) [14], é definida como um conjunto de ações que proporciona o conhecimento, a detecção ou prevenção de qualquer mudança nos fatores determinantes e condicionantes de saúde individual e coletiva, com a finalidade de recomendar e adotar as medidas de prevenção e controle das doenças e agravos. Além disso, fornecem orientação técnica permanente aos profissionais de saúde, a partir de dados expedidos pelas Secretarias de Saúde, bem como, de outras bases de dados, como os sistemas nacionais de informação, os laboratórios, as investigações epidemiológicas, a imprensa e a própria população.

No Brasil, os casos de hospitalização por dengue nos Órgãos Públicos de Saúde são notificados para fins de controle, estatística, estudos, bem como para vigilância epidemiológica. A notificação oportuna dos casos é medida essencial para que a vigilância seja capaz de acompanhar o padrão de transmissão da doença numa determinada área a partir da elaboração da curva endêmica. Todos os casos suspeitos (sendo ou não confirmados) de viremia por Dengue devem ser, obrigatoriamente,

notificados ao SVS do Município. Para isto, há um sistema informatizado no Sistema Único de Saúde (SUS), chamado Sistema de Informações Nacional de Agravos de Notificação (SINAN), o qual tem como objetivo coletar, transmitir e disseminar dados gerados rotineiramente pelo Sistema de Vigilância Epidemiológica das três esferas do Governo, por intermédio de uma rede informatizada, para apoiar o processo de investigação e dar subsídios à análise das informações de vigilância epidemiológica das doenças de notificação compulsória, conforme SVS (2006) [16]. A rápida coleta de informações nas Unidades de Saúde e a qualidade destes dados são essenciais para o desencadeamento oportuno de ações de controle e prevenção em nível local. Dessa forma, é fundamental a boa comunicação entre as equipes destas Unidades de Saúde e as de vigilância epidemiológica e entomológica.

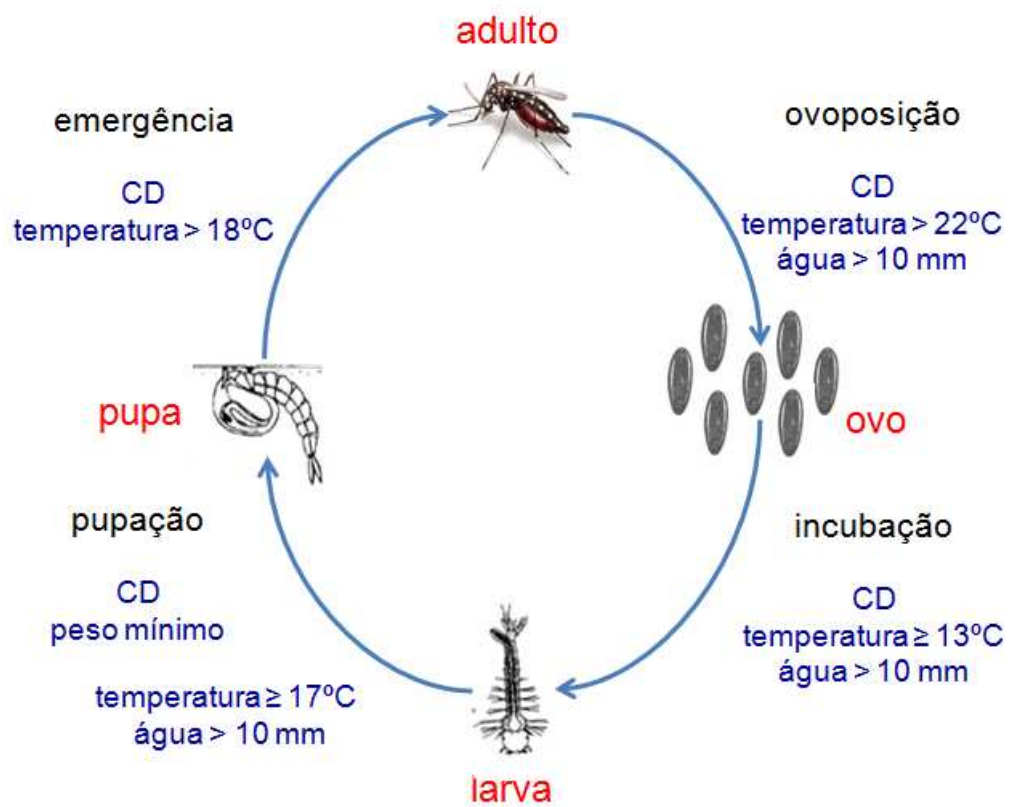
De acordo com o SVS (2005) [15], em referência à dengue, o levantamento epidemiológico propõe a compilação de um banco de dados de registros de notificações de agravos e de hospitalização dos serviços de saúde pública e privada, assim como de outras instituições com informações complementares de planejamento, de controle e ambientais. A partir do levantamento epidemiológico é possível realizar um conjunto de análises estatísticas através da série de dados, bem como estudos epidemiológicos, assim como o estabelecimento de modelos probabilísticos e matemáticos computacionais para simulação, diagnóstico da situação epidêmica e previsão quantitativa, além da construção de modelos conceituais (qualitativos). A construção de modelos com base teórica estabelecida permitirá, nos próximos anos, a definição de rotinas operacionais de simulação (automatizadas), a realização de previsões em diferentes escalas de tempo e de abrangência espacial, além da circunscrição das incertezas das previsões e análises realizadas.

A dengue tem, como hospedeiro vertebrado, o homem e outros primatas, mas somente o primeiro apresenta manifestações clínicas da infecção. O período de viremia no homem é de aproximadamente sete dias, sendo, nos demais primatas, baixa e de curta duração (Ferreira e Yang, 2003) [17]. A dengue clássica pode ocorrer como Febre da Dengue (FD), sua forma benigna e mais frequente da doença, ou ainda na forma de Febre Hemorrágica do Dengue (FHD), muito mais severa e que pode levar ao óbito, em uma taxa de aproximadamente 5% dos pacientes reinfetados. Há ainda a Síndrome do Choque da Dengue (SCD), que é uma combinação dos dois casos, no qual o indivíduo se encontra com um quadro clínico muito crítico, incluindo além de febre e hemorragia, complicações respiratórias que levam ao choque e, conseqüentemente, a óbito. No caso de FD, o paciente sofre com febre somente manifestada após um período de incubação de 5 a 8 dias. Quando a pessoa se infecta por uma segunda vez, a partir da infecção por sorotipo do vírus da dengue diverso do sorotipo da primeira infecção, surge o quadro grave de FHD, com febres e hemorragias (Brasil, 2007) [14].

O mosquito *Aedes aegypti* apresenta no seu ciclo de vida duas fases distintas: aquática, que compreende os estágios de ovo, larva e pupa; e alada (fase adulta) (Christophers, 1960) [1]. Em cada uma das fases e estágios ocorrem mortalidades específicas. Há também tempos de transição distintos de um estágio para o outro, Fig. 1.1. Os parâmetros entomológicos (isto é, os parâmetros que caracterizam as etapas de vida dos insetos) dependem das condições do inseto, assim como de fatores ambientais, particularmente a co-dependência com a temperatura do ar é conhecida (Otero et al., 2006) [18].

Os parâmetros entomológicos também são dependentes das condições favoráveis de reservatórios de água, como a *ovoposição* e sua *incubação*. Após a eclusão das larvas, que segue um período de reabastecimento do reservatório por chuva, o volume de água e o alimento presente nos criadouros devem ser suficientes para sobrevivência do conjunto de larvas. Em geral, 40 a 60 larvas do *Aedes aegypti* necessitam de um volume de água nos criadouros com altura maior que 10 mm para sua sobrevivência e o posterior desenvolvimento do ciclo aquoso na forma de pupa. Outros fatores também podem ser importantes como a iluminação, relacionada ao relógio circadiano; e a própria infecção, para o grau de atividades do *Aedes aegypti*. Resultados experimentais de Lima-Câmara *et al.* (2011) [19] indicam um aumento da motricidade de fêmeas infectadas do *Ae. aegypti* em relação àquelas não infectadas.

Quando o mosquito transmite a doença ao ser humano, através da inoculação do vírus pela picada, ocorre um período de incubação no organismo humano, chamado de viremia. Após a conta-



**Figura 1.1:** Ciclo de desenvolvimento e fator de sobrevivência do vetor da dengue. A metamorfose é dependente do desenvolvimento cumulativo diário (CD) e de outros fatores do estágio-específico de vida. Fonte: adaptado de Christophers (1960) [1].

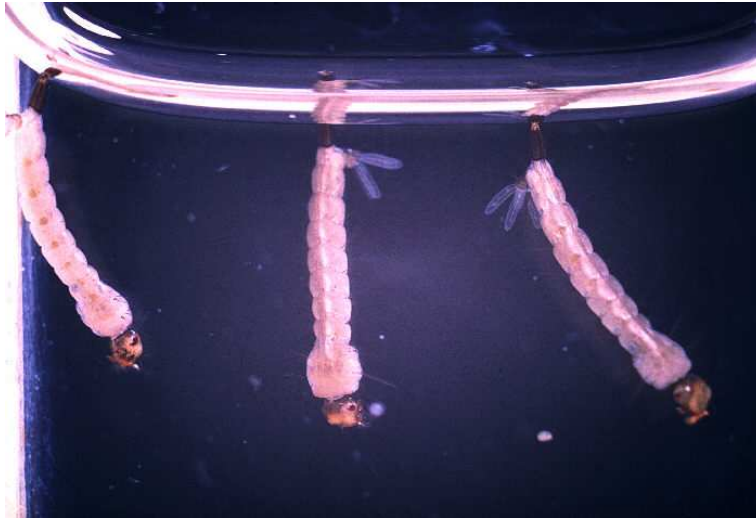


**Figura 1.2:** Fêmea de *Aedes aegypti* ao final do repasto com intestino repleto de sangue.  
Fonte: Gathany (2006) [2].

minação, o vírus fica presente no sangue humano no período entre o dia anterior de aparecimento da febre e o sexto dia da doença. Neste período, a fêmea do *Aedes Aegypti* não infectada, ao picar o indivíduo infectante, também se contamina, iniciando o processo de incubação extrínseca do mosquito (Ferreira e Yang (2003) [17]. O vírus da dengue não é nocivo ao mosquito e, uma vez infectado, a doença não se manifesta neste, que se torna um vetor permanente da infecção. Apenas os mosquitos fêmeas de *Ae. aegypti* que possuem o vírus da dengue em suas glândulas salivares são capazes de transmitir a doença para o homem, Fig. 1.2. Segundo Christophers (1960) [1], a especificidade das fêmeas como agente vetor (ou carreador do vírus) é explicada pela alimentação hematófaga dos mosquitos fêmeas necessária para a maturação dos ovos. Já a alimentação regular de machos e fêmeas é baseada em líquidos açucarados e seiva de plantas.

A presença do vírus nas glândulas salivares do vetor ocorre após o período de incubação extrínseca, o qual vai desde a ingestão do sangue infectado até o momento em que será capaz de transmitir o vírus, bastante replicado em suas glândulas salivares e sistema nervoso. Este período varia de 8 a 14 dias, a partir do momento em que o mosquito-fêmea pica uma pessoa infectada, suga seu sangue e ingere o vírus que vai para sua faringe, o vírus é então absorvido e passa para todo o organismo do inseto, até que as partículas virais se concentrem nas glândulas salivares do inseto e cérebro, e se replicam, tornando possível a inoculação do vírus em outra pessoa. Em temperaturas altas, este período de incubação pode ser abreviado por até três dias. Em alguns casos, o vírus se multiplica no ovário e outros tecidos do sistema reprodutor do mosquito. Deste modo, parte dos filhotes de uma fêmea infectada já nasce com o vírus, que pode ser transmitido de forma hereditária através de várias gerações de mosquito. Neste caso, a dengue pode estar circulando entre os mosquitos de forma silenciosa, mesmo que não ocorra o registro de casos entre humanos.

Necessariamente, cada fêmea copula uma única vez e armazena o esperma do macho em estruturas chamadas espermatecas. A partir disso, pode realizar diversas posturas, com cerca de 200 ovos cada uma. Ao contrário de muitas espécies de mosquitos, uma fêmea do *Aedes aegypti* espalha seus ovos em diversos criadouros, de uma mesma casa ou não, e não são depositados diretamente na água, mas na parede do foco, alguns milímetros acima da superfície, que será posteriormente coberta por água, durante um evento de chuva. Ao entrarem em contato com a água, os ovos levam de 10 a 30 minutos para eclodir, dependendo das condições de temperatura. Os ovos podem resistir bastante tempo sem contato com a água. Num período de três meses, quase todos os ovos sobrevivem sem contato com a água e, a partir deste ponto, a taxa de eclosão cai, sobretudo em climas secos. Até um ano pode se passar antes que os ovos possam eclodir com o retorno dos meses chuvosos. Em um período que varia entre cinco e sete dias, a larva passa por etapas de metamorfose que compreendem quatro estágios larvais, até dar origem a um novo mosquito. Para que a larva



**Figura 1.3:** Larvas de *Aedes aegypti* em processo de desenvolvimento junto ao espelho d'água.  
Fonte: Center for Disease Control and Prevention-CDC (1964) [3].

cresça é preciso haver matéria orgânica na água, utilizada como alimento (Aguiar, 2006) [20]. A Fig. 1.3 apresenta a larva em seu quarto estágio larval. O ciclo de vida do *Aedes aegypti* dura cerca de 30 a 45 dias, tendo os machos um ciclo mais breve que as fêmeas, e quanto menor a sobrevivência do mosquito, menor a chance de um mosquito-fêmea transmitir o vírus da dengue. Para que o ciclo aquático do *Aedes aegypti* se realize e o mosquito ecloda da pupa, o criadouro não pode se esvaziar além de um nível de altura de água mínimo ( $> 10$  mm), durante o decorrer de todo o período aquático. Os processos que levam à redução do nível do reservatório do criadouro são a evaporação, os vazamentos ou infiltrações.

De outra forma, os efeitos da precipitação também podem ser negativos, no caso de epidemias por cólera. Em um estudo de modelagem sobre cólera, Codeço *et al.* (2008) [21] mostram um efeito negativo da precipitação na população de seus mosquitos vetores, uma vez que o aumento da precipitação pode diluir a concentração dos patógenos nos reservatórios, devido à redução da salinidade e do pH, além da redução dos vírus *vibriofagos* lisogênicos na água. A colera é causada pela ingestão de alimentos ou água contaminada pelo vibrião colérico, uma bactéria em forma de vírgula ou bastonete, chamada *Vibrio cholerae*. De acordo com Lima (2010) [22] os bacteriófagos (ou fagos), são vírus que infectam bactérias com dois efeitos: lise celular, por fagos virulentos (ou líticos) destruidores do hospedeiro, ou a permanência na célula, com integração do DNA do fago ao DNA do hospedeiro, por isto chamados temperados (ou lisogênicos), como por exemplo o HIV. Uma revisão sobre genômica profágica é dada por Canchaya *et al.* (2003) [23].

## 1.1 Breve Histórico da Dengue no Brasil

Segundo SVS (2006) [16], o primeiro surto da doença em que houve isolamento viral, ocorreu no final de 1981, em Boa Vista-Roraima, obtendo-se amostras positivas para o sorotipo DENV-1 e quatro para o DENV-4.

No período entre 1986 e 1987, iniciaram-se extensas epidemias pelo sorotipo DENV-1 nas regiões Sudeste e Nordeste, sendo a maior parte das notificações de casos provenientes dos Estados do Rio de Janeiro, Alagoas e Ceará. Foram ainda afetados, neste período, Minas Gerais, Bahia, Pernambuco e São Paulo.

A partir de uma epidemia em 1994 no Ceará, foi detectada a co-circulação de DENV-1 e de DENV-2, sendo notificados casos de FHD nos seguintes Estados do Nordeste: Ceará, Pernambuco, Rio Grande do Norte, Maranhão, Piauí e Bahia.

Em abril de 1990, foi detectada a circulação do sorotipo DENV-2 na cidade de Niterói e em junho



do mesmo ano, tal sorotipo foi isolado. Os isolamentos virais revelaram a co-circulação de DENV-1 e DENV-2 no Rio de Janeiro, sendo que em 1991, este último, foi o único sorotipo isolado. As manifestações clínicas, então observadas, foram mais graves, sendo notificados à Secretaria Estadual de Saúde 462 casos de FHD com 8 óbitos.

Em 2000, foram registrados casos de FHD e da Síndrome do Choque do Dengue (SCD) no Estado do Amazonas e, em dezembro do mesmo ano, o sorotipo do vírus DENV-3 foi isolado no município de Nova Iguaçu, no Estado do Rio de Janeiro. Após um aumento do número de casos, durante o ano de 2001, ocorreu no primeiro semestre de 2002, uma grande epidemia no RJ, sendo notificados 255.493 casos, sendo 1895 casos de FHD/SCD e 91 destes casos fatais, isto é, aproximadamente 4,8% da população.

Segundo Barreto e Teixeira (2008) [24], em 2008 houve um surto de epidemia no Rio de Janeiro, considerado o de maior gravidade entre as ocorrências até dezembro de 2011, que se caracterizou pelo deslocamento dos indivíduos infectados com a FHD para a faixa etária menor que 15 anos, coincidindo com a intensa circulação do DENV-2, na co-presença dos sorotipos DENV-1, DENV-2 e DENV-3. Neste evento foram notificados 240 mil casos da FD (incidência de 1.527/100 mil habitantes), mais de 11 mil hospitalizações, 1.364 casos de FHD, 169 óbitos e outros 150 óbitos possivelmente associados à dengue os quais podem ter sido ignorados nas notificações do SUS.

Em 2009, a maioria dos casos localizou-se na Bahia. O ano de 2009, em comparação ao de 2008, teve uma redução de 50% nos casos de dengue no país e campanhas foram feitas, em 2010, para reduzir ainda mais a incidência da doença.

Na segunda metade do ano de 2009, o DENV-1 substituiu o DENV-2 como sorotipo predominante no país, levando a uma grande circulação do vírus ao longo do ano de 2010.

Em 2010, foram registrados mais de um milhão de casos prováveis da doença em decorrência da recirculação do DENV-1, com 63% dos casos nas regiões Centro-Oeste e Sudeste. O deslocamento da faixa etária de casos graves em 2010, foi observado no grupo de maiores de 60 anos de idade. A análise dos óbitos por dengue evidenciou uma redução da mediana de idade para 30 anos, com mais de 25% desses óbitos ocorrendo em menores de 15 anos entre 2007 e 2009. Entretanto, em 2010, a mediana de idade dos óbitos apresentou nova alteração passando a ser de 42 anos.

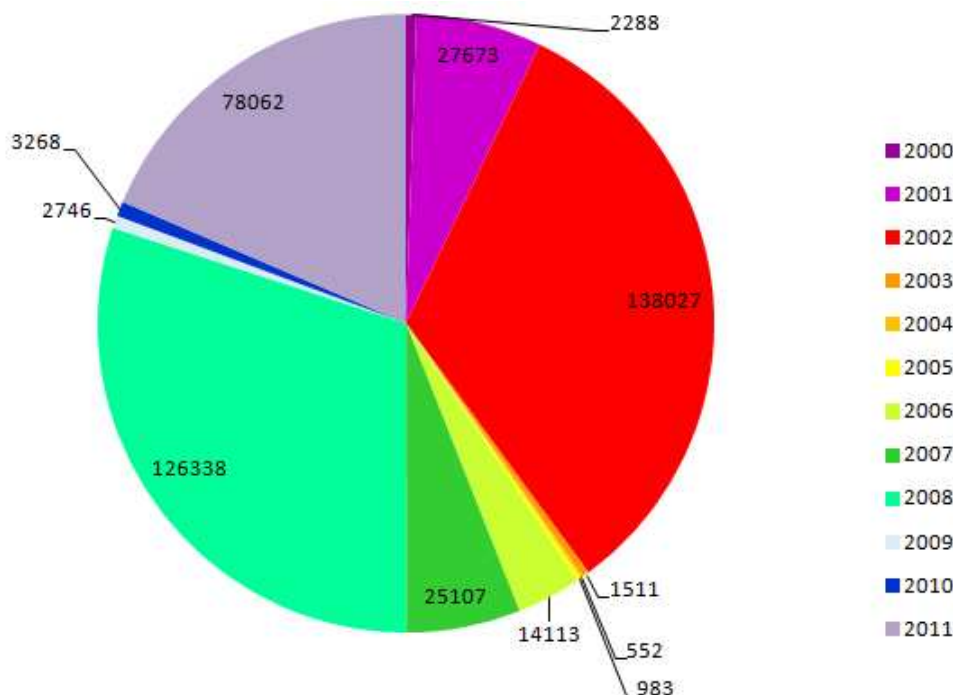
No ano de 2011, segundo a SVS, o número de mortes foi 44% menor no primeiro semestre do ano, quando comparado ao mesmo período em 2010. Os casos graves também apresentaram redução de 45%. No começo do ano de 2011, o Brasil já registrava mais de 155 mil casos de dengue, sendo que a maior parte dos casos se concentrou na região Norte (31,6%) e Sudeste (27%). A maior parte dos casos (53%) foi notificada em cinco Estados: Amazonas, Acre, Paraná, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Segundo o Ministério da Saúde, o Estado do Rio de Janeiro está em alerta contra a dengue. Até o dia 10 dezembro, foram notificados quase 75 mil casos, sendo 173 entre 4 e 10 daquele mês. O número de mortes chega a 51 neste corrente ano. Além disso, onze casos de dengue tipo 4 foram registrados no Rio de Janeiro e os dados preocupam as autoridades em saúde.

Segundo dados do Ministério da Saúde, o Brasil apresenta 48 cidades com risco de viver surto de dengue em 2012, com índices acima de 3,9% de infestação pelo mosquito *Aedes aegypti*. Dentre os municípios em risco, estão as capitais: Rio Branco (AC), Porto Velho (RO) e Cuiabá (MT). As capitais em situação de alerta são Salvador (BA), Recife (PE), Belém (PA), São Luis (MA) e Aracajú (SE). Esse cenário, associado à recente reintrodução do DENV-4, torna necessária uma análise detalhada das mudanças na epidemiologia da doença no país, como estratégia para o aprimoramento das atividades de vigilância e de assistência aos pacientes.

## 1.2 Clima na RMRJ

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), instituída pela Lei Complementar Federal, Nº 20, de 1º de julho de 1974, é composta por 19 Municípios. O reconhecimento da RMRJ se deu somente após a fusão dos Estados do Rio de Janeiro e da Guanabara. Atualmente os municípios da RMRJ são: Belford Roxo, Duque de Caxias, Guapimirim, Itaboraí, Itaguaí, Japeri, Magé, Maricá, Mesquita, Nilópolis, Niterói, Nova Iguaçu, Paracambi, Queimados, Rio de Janeiro, São Gonçalo, São

João de Meriti, Seropédica e Tanguá. Sua área territorial de  $5.645 \text{ km}^2$ . Ocupa o segundo posto entre as metrópoles brasileiras, já atingindo em 2012 mais 12 milhões de habitantes (Projeção do IBGE, 2012) [25]. Apesar da enorme taxa populacional, apresenta baixa taxa de crescimento demográfico, em torno de 1,2, segundo MS (2006) [26] e Índice de Desenvolvimento Humano-Municipal (IDH-M) de 0,816, ou seja, elevado segundo Programa das Nações Unidas (PNUD) [27]. Entre os principais problemas da RMRJ, no início do segundo decênio do século XXI, está o saneamento básico, ainda parcial.



**Figura 1.4:** Distribuição do número de Casos Notificados de Agravos por Dengue no decorrer dos anos, no Município do Rio de Janeiro - R.J, no período de Jan. 2000 a Dez. 2011. Dados brutos obtidos do SINAN-net. Valores apresentados em destaque referentes à quantidade de indivíduos infectados ( $\text{hab}^{-1}$ ).

O Sistema de Informação de Agravos de Notificação - SINAN mantém um histórico anual da taxa de incidência de Dengue no Município do Rio de Janeiro, em número de casos ( $\text{habitantes}^{-1}$ ) (IBGE, 2012) [25], Fig. 1.4. O ano de 2002, considerado o mais epidêmico daquele município, teve registro de aproximadamente 138 mil casos, com a circulação concomitante dos sorotipos Denv-1 e Denv-2. O ano de 2008 teve registros semelhantes, com aproximadamente 126 mil casos e, apesar de menos epidêmico, apresentou maior grau de reinfeção e conseqüente mortalidade, em função da presença de mais um sorotipo circulante no município para este ano, comparado a 2002, o sorotipo Denv-3. Já 2011 apresentou o terceiro maior índice epidêmico, com número de casos em torno de 78 mil. Tal fato, possivelmente se deve à introdução do sorotipo Denv-4, que historicamente foi registrado apenas no ano de 2012.

Do ponto de vista geográfico, a RMRJ encontra-se limitada ao sul pelo Oceano Atlântico e ao Norte pelas escarpas da Serra do Mar. Ao centro encontra-se a conhecida Baía de Guanabara (BG), a sexta maior do Brasil, que recebe água de muitas dezenas de rios e riachos e atualmente, também de canais industriais e urbanos artificiais que fazem o papel de exutórios de esgoto, águas de uso urbano e águas de processamento industrial. Atualmente, o último trecho remanescente e representativo do ecossistema manguezais do Recôncavo da BG restringe-se à da Área de Proteção Ambiental (APA) de Guapimirim (Decreto N° 90.225 de 25 de setembro de 1984) à nordeste da BG ( $22^{\circ}38'S$  a  $22^{\circ}08'S$ ;  $42^{\circ}58'W$  a  $43^{\circ}05'W$ ) (Moraes *et al.*, 2009) [28].

A cidade do Rio de Janeiro ( $22^{\circ}45'05''\text{S}$  a  $23^{\circ}04'10''\text{S}$ ;  $43^{\circ}06'30''\text{W}$  a  $43^{\circ}47'40''\text{W}$ ), é delimitada à norte pelo maciço rochoso de Gericinó-Mendanha, à sul pelo Oceano Atlântico, à leste pela Baía de Guanabara e à oeste pela baía de Sepetiba, Fig. 1.7.

Durante o verão, o clima no Rio de Janeiro é quente, úmido e chuvoso, com uma grande amplitude térmica e ocorrência da chamada Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). No inverno, as precipitações diminuem muito, com predomínio de altas pressões atmosféricas. A temperatura do ar apresenta ciclos sazonal e diurno muito bem definidos na RMRJ. Em particular, a distribuição da temperatura do ar na Estação Meteorológica do aeroporto Tom Jobim no município do Rio de Janeiro apresenta temperatura do ar média máxima de  $31^{\circ}\text{C}$  em março aproximadamente às 14:00 horas (LST), e uma média mínima de  $18^{\circ}\text{C}$  entre julho e agosto aproximadamente às 06:00 horas (LST), Fig. 1.9.

| * Bairros do Município RJ | qtde de notificações | % do total de casos |
|---------------------------|----------------------|---------------------|
| 1 SANTA CRUZ              | 18383                | 5,41                |
| 2 CAMPO GRANDE            | 16361                | 4,82                |
| 3 <b>IGNORADO</b>         | 12597                | 3,71                |
| 4 TAQUARA                 | 11242                | 3,31                |
| 5 CURICICA                | 9993                 | 2,94                |
| 6 TIJUCA                  | 8821                 | 2,60                |
| 7 BANGU                   | 8646                 | 2,55                |
| 8 PACIÊNCIA               | 8002                 | 2,36                |
| 9 REALENGO                | 6935                 | 2,04                |
| 10 BONSUCESSO             | 6139                 | 1,81                |
| 11 JACAREPAGUA            | 6136                 | 1,81                |
| 12 ANIL                   | 6125                 | 1,80                |
| 13 CIDADE DE DEUS         | 5471                 | 1,61                |
| 14 COPACABANA             | 5467                 | 1,61                |
| 15 GUARATIBA              | 4985                 | 1,47                |
| 16 SEPETIBA               | 4802                 | 1,41                |
| 17 PRAÇA SECA             | 4728                 | 1,39                |
| 18 ROCINHA                | 4217                 | 1,24                |
| 19 RAMOS                  | 4217                 | 1,24                |
| 20 MARÉ                   | 4192                 | 1,23                |
| 21 RECREIO                | 4192                 | 1,23                |
| 22 VILA ISABEL            | 4180                 | 1,23                |
| 23 IRAJÁ                  | 3999                 | 1,18                |
| 24 FREGUESIA              | 3932                 | 1,16                |
| 25 JARDIM AMÉRICA         | 3752                 | 1,10                |
| 26 CENTRO                 | 3631                 | 1,07                |
| 27 BARRA DA TIJUCA        | 3631                 | 1,07                |
| 28 CAJU                   | 3625                 | 1,07                |
| 29 PENHA                  | 3497                 | 1,03                |
| 30 SÃO CRISTOVÃO          | 3449                 | 1,02                |
| 31 BOTAFOGO               | 3426                 | 1,01                |
| 32 GARDÊNIA AZUL          | 3282                 | 0,97                |
| 33 SENADOR CAMARÁ         | 3199                 | 0,94                |
| 34 SANTA TERESA           | 3006                 | 0,88                |
| 35 GUADALUPE              | 3006                 | 0,88                |
| 36 ANCHIETA               | 2974                 | 0,88                |
| 37 MÉIER                  | 2670                 | 0,79                |
| 38 MADUREIRA              | 2663                 | 0,78                |
| 39 INHAÚMA                | 2585                 | 0,76                |
| 40 TANQUE                 | 2554                 | 0,75                |

| * Bairros do Município RJ | qtde de notificações | % do total de casos |
|---------------------------|----------------------|---------------------|
| 41 PAVUNA                 | 2507                 | 0,74                |
| 42 ENGENHO DE DENTRO      | 2477                 | 0,73                |
| 43 SANTÍSSIMO             | 2432                 | 0,72                |
| 44 PADRE MIGUEL           | 2383                 | 0,70                |
| 45 GRAJAU                 | 2344                 | 0,69                |
| 46 COSTA BARROS           | 2299                 | 0,68                |
| 47 MANGUINHOS             | 2283                 | 0,67                |
| 48 PEDRA DE GUARATIBA     | 2226                 | 0,66                |
| 49 RIO COMPRIDO           | 2188                 | 0,64                |
| 50 COSMOS                 | 2177                 | 0,64                |
| 51 PECHINCHA              | 2142                 | 0,63                |
| 52 OLARIA                 | 2122                 | 0,62                |
| 53 SANTO CRISTO           | 2115                 | 0,62                |
| 54 ENGENHO NOVO           | 2028                 | 0,60                |
| 55 VIGÁRIO GERAL          | 1920                 | 0,57                |
| 56 VARGEM PEQUENA         | 1913                 | 0,56                |
| 57 CORDOVIL               | 1857                 | 0,55                |
| 58 INHOAÍBA               | 1843                 | 0,54                |
| 59 PIEDADE                | 1841                 | 0,54                |
| 60 ANDARAI                | 1805                 | 0,53                |
| 61 VILA VALQUEIRE         | 1727                 | 0,51                |
| 62 BRÁS DE PINA           | 1623                 | 0,48                |
| 63 PILARES                | 1602                 | 0,47                |
| 64 ENGENHO DA RAINHA      | 1599                 | 0,47                |
| 65 LINS VASCONCELOS       | 1595                 | 0,47                |
| 66 BENFICA                | 1588                 | 0,47                |
| 67 VARGEM GRANDE          | 1584                 | 0,47                |
| 68 GALEÃO                 | 1577                 | 0,46                |
| 69 CASCADURA              | 1554                 | 0,46                |
| 70 LARANJEIRAS            | 1538                 | 0,45                |
| 71 CATETE                 | 1499                 | 0,44                |
| 72 ITANHANGA              | 1458                 | 0,43                |
| 73 ESTÁCIO                | 1433                 | 0,42                |
| 74 MARECHAL HERMES        | 1387                 | 0,41                |
| 75 BENTO RIBEIRO          | 1373                 | 0,40                |
| 76 VIDIGAL                | 1330                 | 0,39                |
| 77 TAUA                   | 1313                 | 0,39                |
| 78 VILA DA PENHA          | 1303                 | 0,38                |
| 79 PORTUGUESA             | 1282                 | 0,38                |
| 80 ROCHA MIRANDA          | 1260                 | 0,37                |

(a)

Quanto à distribuição de dengue por Bairros, Fig. 1.5, observa-se que o Bairro de Santa Cruz possui, aproximadamente, 5,4% do total de casos no município do RJ (aproximadamente 18,4 mil de 339 mil casos), seguido de Campo Grande, dos casos considerados ignorados, da Taquara e de Curicica (pertencentes à Região Administrativa de Jacarepaguá). A distribuição do número de casos por Bairros quando comparada à realizada por Regiões Administrativas, Fig. 1.6, é muito pequena, o que tornaria inconsistente sua posterior.

Quanto à distribuição de dengue por regiões administrativas, observa-se que a Região Administrativa de Jacarepaguá, Fig. 1.6, possui, aproximadamente, 15% do total de casos no município

| * Bairros do Município RJ | qtde de notificações | % do total de casos | * Bairros do Município RJ | qtde de notificações | % do total de casos  |         |        |
|---------------------------|----------------------|---------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|---------|--------|
| 81                        | FLAMENGO             | 1243                | 0,37                      | 121                  | COCOTÁ               | 655     | 0,19   |
| 82                        | JARDIM CARIOCA       | 1238                | 0,36                      | 122                  | JACAREZINHO          | 642     | 0,19   |
| 83                        | IPANEMA              | 1215                | 0,36                      | 123                  | DEODORO              | 642     | 0,19   |
| 84                        | MANGUEIRA            | 1176                | 0,35                      | 124                  | GÁVEA                | 633     | 0,19   |
| 85                        | LEBLON               | 1129                | 0,33                      | 125                  | ENCANTADO            | 615     | 0,18   |
| 86                        | BANCÁRIOS            | 1111                | 0,33                      | 126                  | CAVALCANTI           | 568     | 0,17   |
| 87                        | CACHAMBI             | 1080                | 0,32                      | 127                  | BARROS FILHO         | 543     | 0,16   |
| 88                        | QUINTINO BOCAIUVA    | 1076                | 0,32                      | 128                  | CAMORIM              | 528     | 0,16   |
| 89                        | ACARI                | 1034                | 0,30                      | 129                  | PRAÇA DA BANDEIRA    | 520     | 0,15   |
| 90                        | COELHO NETO          | 1015                | 0,30                      | 130                  | BARRA DE GUARATIBA   | 518     | 0,15   |
| 91                        | CATUMBI              | 994                 | 0,29                      | 131                  | RIACHUELO            | 482     | 0,14   |
| 92                        | OSWALDO CRUZ         | 993                 | 0,29                      | 132                  | GAMBOA               | 477     | 0,14   |
| 93                        | GLORIA               | 976                 | 0,29                      | 133                  | ÁGUA SANTA           | 471     | 0,14   |
| 94                        | SAÚDE                | 970                 | 0,29                      | 134                  | CIDADE NOVA          | 462     | 0,14   |
| 95                        | ABOLIÇÃO             | 939                 | 0,28                      | 135                  | TODOS OS SANTOS      | 428     | 0,13   |
| 96                        | COLÉGIO              | 939                 | 0,28                      | 136                  | LEME                 | 385     | 0,11   |
| 97                        | JACARÉ               | 938                 | 0,28                      | 137                  | HUMAITÁ              | 383     | 0,11   |
| 98                        | JARDIM GUANABARA     | 935                 | 0,28                      | 138                  | ZUMBI                | 377     | 0,11   |
| 99                        | MAGALHÃES BASTOS     | 911                 | 0,27                      | 139                  | LAGOA                | 356     | 0,10   |
| 100                       | CACUIA               | 897                 | 0,26                      | 140                  | TURIAÇU              | 331     | 0,10   |
| 101                       | PITANGUEIRAS         | 848                 | 0,25                      | 141                  | MONERÓ               | 296     | 0,09   |
| 102                       | ALTO DA BOA VISTA    | 846                 | 0,25                      | 142                  | ROCHA                | 293     | 0,09   |
| 103                       | VICENTE DE CARVALHO  | 829                 | 0,24                      | 143                  | MARIA DA GRACA       | 291     | 0,09   |
| 104                       | COMPLEXO DO ALEMÃO   | 811                 | 0,24                      | 144                  | VILA KOSMOS          | 289     | 0,09   |
| 105                       | TOMAS COELHO         | 811                 | 0,24                      | 145                  | SAMPAIO              | 261     | 0,08   |
| 106                       | MARACANÃ             | 808                 | 0,24                      | 146                  | COSME VELHO          | 246     | 0,07   |
| 107                       | VISTA ALEGRE         | 796                 | 0,23                      | 147                  | URCA                 | 238     | 0,07   |
| 108                       | PENHA CIRCULAR       | 773                 | 0,23                      | 148                  | SÃO CONRADO          | 232     | 0,07   |
| 109                       | JARDIM SULACAP       | 772                 | 0,23                      | 149                  | PARQUE ANCHIETA      | 228     | 0,07   |
| 110                       | RICARDO ALBUQUERQUE  | 767                 | 0,23                      | 150                  | RIBEIRA              | 188     | 0,06   |
| 111                       | DEL CASTILHO         | 758                 | 0,22                      | 151                  | SÃO FRANCISCO XAVIER | 149     | 0,04   |
| 112                       | HONÓRIO GURGEL       | 750                 | 0,22                      | 152                  | VILA MILITAR         | 144     | 0,04   |
| 113                       | PAQUETÁ              | 706                 | 0,21                      | 153                  | ENGENHEIRO LEAL      | 99      | 0,03   |
| 114                       | SENADOR VASCONCELOS  | 706                 | 0,21                      | 154                  | CIDADE UNIVERSITÁRIA | 58      | 0,02   |
| 115                       | FREGUESIA (ILHA)     | 704                 | 0,21                      | 155                  | PRAIA DA BANDEIRA    | 53      | 0,02   |
| 116                       | JARDIM BOTÂNICO      | 695                 | 0,20                      | 156                  | JOÁ                  | 35      | 0,01   |
| 117                       | PARADA DE LUCAS      | 693                 | 0,20                      | 157                  | CAMPO DOS AFONSOS    | 23      | 0,01   |
| 118                       | CAMPINHO             | 685                 | 0,20                      | 158                  | GRUMARI              | 21      | 0,01   |
| 119                       | VAZ LOBO             | 671                 | 0,20                      | 159                  | VASCO DA GAMA        | 0       | 0,00   |
| 120                       | HIGIENÓPOLIS         | 668                 | 0,20                      | 160                  | PARQUE COLUMBIA      | 0       | 0,00   |
|                           |                      |                     |                           |                      | <b>TOTAL</b>         | 339 723 | 100,00 |

(b)

**Figura 1.5:** a e b. Distribuição Mensal decrescente do número de Casos Notificados de Agravos por Dengue ( $hab^{-1}$ ), por Bairros do Município do Rio de Janeiro - R.J., e respectivo percentual em relação ao número total de casos, para o período de Jan. 2000 a Dez. 2011. Dados brutos obtidos do SINAN-net. \* Ordem decrescente da quantidade de casos por Bairros.



| *<br>1 | regiões administrativas | qtde notif     | % do total    |
|--------|-------------------------|----------------|---------------|
| 2      | XVI JACAREPAGUÁ         | 50139          | 14,76         |
| 3      | XIX SANTA CRUZ          | 30716          | 9,04          |
| 4      | XVIII CAMPO GRANDE      | 23431          | 6,90          |
| 5      | XIII MÉIER              | 17530          | 5,16          |
| 6      | X RAMOS                 | 14675          | 4,32          |
| 7      | XVII BANGU              | 14081          | 4,14          |
| 8      | XI PENHA                | 13899          | 4,09          |
| 9      | XXIV BARRA DA TIJUCA    | 13221          | 3,89          |
| 10     | XV MADUREIRA            | 13056          | 3,84          |
| 11     | CASOS IGNORADOS         | 12597          | 3,71          |
| 12     | XX ILHA DO GOVERNADOR   | 11242          | 3,31          |
| 13     | VIII TIJUCA             | 9993           | 2,94          |
| 14     | IV BOTAFOGO             | 9294           | 2,74          |
| 15     | XXXIII REALENGO         | 9265           | 2,73          |
| 16     | IX VILA ISABEL          | 8821           | 2,60          |
| 17     | XIV IRAJÁ               | 8002           | 2,36          |
| 18     | XXVI GUARATIBA          | 7472           | 2,20          |
| 19     | XXV PAVUNA              | 7297           | 2,15          |
| 20     | I PORTUARIA             | 6935           | 2,04          |
| 21     | XII INHAUMA             | 6651           | 1,96          |
| 22     | XXII ANCHIETA           | 6590           | 1,94          |
| 23     | VII SÃO CRISTOVÃO       | 6139           | 1,81          |
| 24     | V COPACABANA            | 5549           | 1,63          |
| 25     | XXXIV CIDADE DE DEUS    | 5471           | 1,61          |
| 26     | VI LAGOA                | 5467           | 1,61          |
| 27     | III RIO COMPRIDO        | 4985           | 1,47          |
| 28     | XXVII ROCINHA           | 4217           | 1,24          |
| 29     | XXX MARÉ                | 4192           | 1,23          |
| 30     | II CENTRO               | 3631           | 1,07          |
| 31     | XXIII SANTA TERESA      | 3006           | 0,88          |
| 32     | XXIX COMPLEXO DO ALEMÃO | 811            | 0,24          |
| 33     | XXI PAQUETÁ             | 706            | 0,21          |
|        | XXVIII JACAREZINHO      | 642            | 0,19          |
|        | <b>TOTAL</b>            | <b>339 723</b> | <b>100,00</b> |

**Figura 1.6:** Distribuição Mensal decrescente do número de Casos Notificados de Agravos por Dengue ( $hab^{-1}$ ), por Regiões Administrativas do Município do Rio de Janeiro - RJ, e respectivo percentual em relação ao número total de casos, para o período de Jan. 2000 a Dez. 2011. Dados brutos obtidos do SINAN-net. \* Ordem decrescente da quantidade de casos por Regiões Administrativas.

do RJ (aproximadamente 50 mil de 339 mil casos), sendo que os Bairros da Taquara e de Curicica representam juntas com 6,25 % daquele percentual; bem como, os Bairros de Jacarepaguá, Anil e Cidade de Deus representam juntas 5,23%. Ao se comparar a distribuição de notificações de Dengue por Bairros e por Regiões, é possível caracterizar os pontos focais de Dengue nas Regiões, através do levantamento dos bairros mais críticos.

Jacarepaguá possui uma das maiores médias de temperatura do município. Uma vez que a



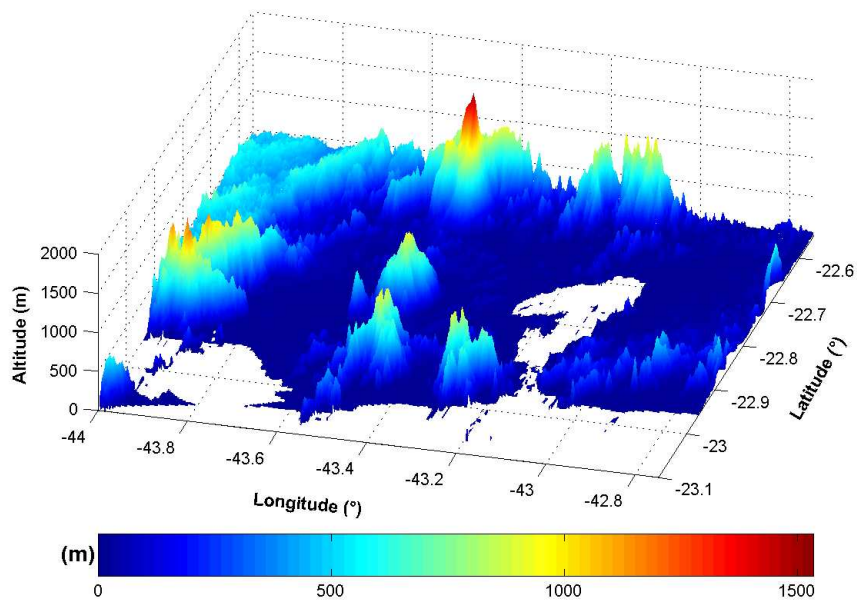
**Figura 1.7:** Imagem de fundo referente à Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Os números indicam a localização aproximada das estações meteorológicas dos aeroportos: Tom Jobim (1), Santos Dumont (2), Campos dos Afonsos (3), Jacarepaguá (4) e Santa Cruz (5). Áreas em verde na imagem indicam vegetação arbustiva e/ou gramíneas sobre encostas de morros, escarpas e locais de mais difícil acesso, como mangues remanescentes na APA de Guapimirim ou ainda grande presença de algas na superfície dos corpos de água. Áreas em azul, indicam o Oceano Atlântico e lagoas litorâneas, estuários e baías do RJ. Áreas urbanas dos diferentes municípios da RMRJ formam a grande conurbação em tons de cinza, sobre as áreas de urbanização formal e informal.

Fonte da imagem: EOS-NASA (2008) [4].

dengue é modelada pela temperatura, tal característica retrata a dependência entomológica e conseqüente aumento no número de casos. Santa Cruz e Campo Grande, respectivamente segunda e terceira região com maior número de casos, não possuem temperaturas elevadas, no entanto, fatores associados, como a frequência de chuvas, pode vir a contribuir para o aumento dos casos, uma vez que pode manter os reservatórios dos criadouros com água em condições mínimas ideais para manutenção e sobrevivência do ciclo do mosquito.

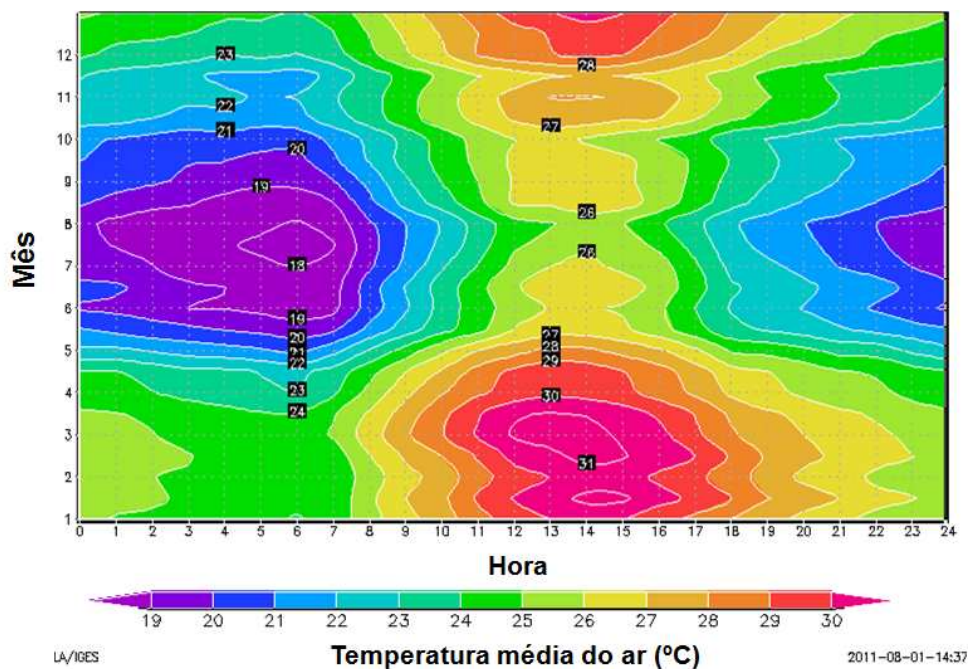
Um exame das médias sazonais da precipitação calculada à partir de dados dos 32 postos pluviométricos da GeoRIO/AlertaRio do Município do Rio de Janeiro-RJ apresenta áreas de máximos de precipitação acumulada localizados sobre os terrenos mais elevados da RMRJ, correspondentes aos três maciços rochosos (Tijuca, Pedra Branca e Gericinó/Mendanha). Os valores acumulados atingem médias anuais entre 1200 mm e 2000 mm, enquanto nos terrenos sedimentares pouco elevados da Baixada Fluminense a Oeste da Baía de Guanabara a média anual não passa de 1000 mm (Marques *et al.*, 1988; Dereczynski *et al.*, 2009) [29][30]. Observa-se que a RMRJ que oferece o maior índice pluviométrico coincide com a área do Maciço da Tijuca, onde se situa o Parque Nacional da Tijuca. O relevo (a diversidade topográfica), a densa cobertura vegetal e a proximidade com o mar (interação continente/oceano) são fatores capazes de contribuir para a intensificação das chuvas nessas regiões. Quando ocorre a conjugação desses fatores, anteriormente mencionados, há uma intensificação dos fenômenos e podem ocorrer chuvas intensas (Marques *et al.*, 1994) [31].

De acordo com Brigdman (2006) [32], projeções durante a primeira metade do século XXI sugerem um crescimento médio da população urbana em torno de 2% ao ano; logo, em 2050, estima-se que 65% da população global viverá nas cidades. Muita atenção tem sido dada para o desenvolvimento de megacidades, com populações de 10 milhões ou mais, estando São Paulo (Brasil) entre uma destas grandes megalópoles. As cidades possuem uma importante influência no clima local e regional, causando alterações consideráveis na temperatura, no vento e na precipitação.



**Figura 1.8:** Superfície tridimensional da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, quase correspondente à região mostrada na Fig. 1.7. Os três maciços rochosos da RMRJ aparecem destacados como suas elevações máximas em torno de 1000 m, na direção a oeste da Baía de Guanabara. À sudoeste da imagem localiza-se a Baía de Sepetiba - RJ e ao Norte, apenas uma porção das encostas da Serra do Mar que flanqueiam o Planalto Brasileiro.

Fonte do Modelo Digital de Elevação com resolução nominal de 90 m: SRTM-NASA (2008) [5].



**Figura 1.9:** Seção temporal da temperatura média do ar à superfície, em função do mês do ano (ordenadas) e das horas do dia (abscissas), calculada entre 1999-2011 com dados concentrados de mensagens METAR relativas ao Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim, no bairro Galeão da Ilha do Governador do Município do Rio de Janeiro.

Fonte: Karam, 2011 (comunicação pessoal).



Impactos urbanos no clima global são menos claros; no entanto, eles contribuem para o aumento da frequência da cobertura de nuvens e dos efeitos antropogênicos, como o aumento da emissão de gases e dos aerossóis na atmosfera.

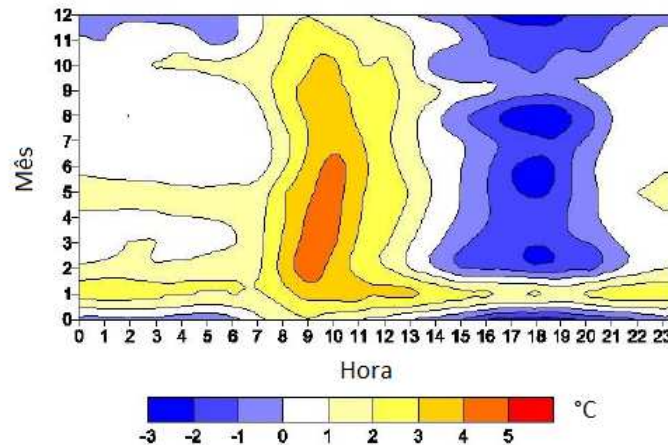
Entende-se que áreas urbanas são locais onde há intensa influência do homem no desenvolvimento natural da superfície. Dentre estes efeitos destacam-se a modificação da redistribuição de água na superfície e a modificação da topografia e de suas características aerodinâmicas, com mudanças previsíveis e inesperadas nos balanços de energia e água local, regional e global. O fenômeno mais visível destas modificações é a Ilha de Calor Urbana (UHI), associada à presença de maiores temperaturas na área urbana, em comparação com as áreas de borda.

A UHI contribui muito para o aumento das temperaturas no verão, nos centros urbanos, o que pode ser um sério agravante nos eventos de ondas-de-calor, ou para a manutenção do abastecimento de água potável da cidade que, em geral, provém de mananciais ao redor das metrópoles. Por outro lado, as UHI contribuem para o aumento de precipitação na cidade devido ao maior aquecimento superficial e à convergência da brisa urbana. Nas cidades em latitudes médias, a temperatura mínima se eleva em virtude da UHI noturna. Um elemento essencial para o entendimento das UHI são os Cânions Urbanos (UC), correspondente ao volume de ar entre a via superficial, as paredes que se elevam dos edifícios ao lado e a fração visível do céu no nível do topo dos edifícios (Oke (1987) [9]; Brigdman, 2006 [32]). Ao longo dos UC ocorrem canalizações do vento ao longo de seu eixo longitudinal e recirculações transversais dos poluentes emitidos pelos carros. A grande rugosidade aerodinâmica na Camada Limite Superficial (CLS) urbana é maior que a encontrada sobre superfícies relativamente planas, com elementos rugosos menores (por ex., sobre um deserto). Do ponto de vista da microescala, os balanços de radiação, de energia e de água das áreas urbanas são muito diferentes dos encontrados em superfícies naturais. Oke (1987) [9] explica que o homem tem provocado modificações inadvertidas nas condições superficiais do planeta.

Para modelar os efeitos urbanos sobre os processos atmosféricos da CLS, é necessário entender as escalas espaciais da geometria urbana, a composição e o arranjo estrutural dos materiais dos UC e de outros elementos de sua superfície, a distribuição das edificações, parques, lagos e bulevares onde se encontram vegetação, irrigação, etc.

A temperatura do ar nas áreas urbanas é uma função das características das superfícies urbanas (elementos estruturais e sua distribuição espacial, composição material, rugosidade aerodinâmica, albedo em onda-curta, emissividade da radiação infravermelha térmica em torno de  $10 \mu\text{m}$ ) e, também, do ângulo de incidência da radiação solar, do sombreamento dos cânions e da capacidade de emitir e transferir radiação infravermelha térmica de dentro para fora do UC. Deve-se levar em conta o acúmulo de energia na cidade, representada por reservatório de calor com determinada inércia térmica, com implicações sobre a partição da energia disponível (não acumulada por condução molecular nos elementos urbanos) entre os fluxos de calor sensível e latente. Além disso, nas cidades existem milhões de fontes de calor de origem antrópica, associadas à queima de combustíveis fósseis nos meios de transporte atuais, ao condicionamento de ar, à utilização humana geral e industrial. Em associação às fontes de calor sensível, ocorrem, em igual importância, diferentes fontes de vapor de origem antrópica. Durante o dia, conforme a cidade se aquece, a razão de Bowen ( $\beta = Q_H/Q_E$ ), associada à chamada partição de energia, aumenta até atingir valores acima da unidade, ou seja, a intensidade do fluxo de calor sensível, da superfície para a atmosfera, ultrapassa o fluxo de calor latente (associado à evapotranspiração na área urbana). Consequentemente, a produção de Energia Cinética Turbulenta (TKE) também pode aumentar devido à intensidade da convecção térmica e esta é uma função do Número de Rayleigh (positivo quando a superfície é mais quente que o ar) e de Richardson (negativo durante o período convectivo).

Em geral, a UHI é definida pela diferença entre a temperatura média da área mais urbanizada e a média da temperatura no entorno da cidade, vide por exemplo Oke (1987) [9]. No caso da RMRJ, considera-se que ao sul da área urbana encontra-se o Oceano Atlântico, logo a UHI é definida, pelo menos em parte, em relação a um reservatório de calor de grande capacidade térmica. De acordo com Taljaard (1972) [33], a temperatura média da superfície do mar, ao longo do litoral do RJ varia entre  $22^\circ\text{C}$ , em agosto, e  $24^\circ\text{C}$ , em fevereiro. O fato dessas temperaturas serem relativamente



**Figura 1.10:** Evolução temporal da Ilha de Calor Urbana entendida como a diferença da temperatura potencial média do ar de potencial, em ( $^{\circ}C$ ), das estações em área muito urbanizada em relação ao seu valor na estações periférico-vegetada, disponíveis ao longo do Município do Rio de Janeiro.

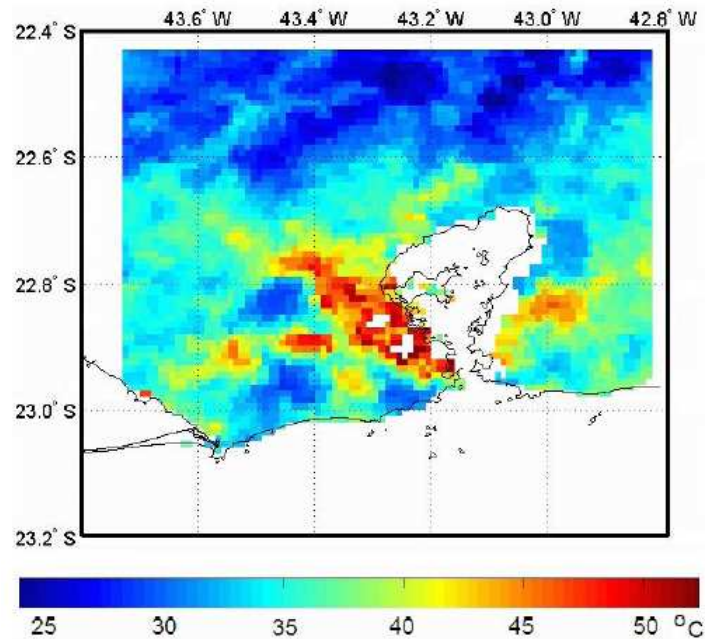
Fonte: Marques Filho *et al.* (2009) [6].

altas comparadas à temperatura média mínima da RMRJ à noite, implica que a intensidade da UHI média é esperada ser menor à noite, comparada ao seu valor diurno, o que é consistente com as observações da UHI diurna de Marques Filho *et al.* (2009) [6], Fig. 1.10. Estes, ao analisarem o comportamento do UHI da RMRJ, verificaram que a UHI pode ser estimada pela evolução das diferenças entre a temperatura potencial virtual média das estações nas áreas centrais da RMRJ e das mais vegetadas e sob maior influência marítima. O uso da temperatura potencial virtual tem vantagens em relação ao uso da temperatura absoluta do ar, dada que a primeira é uma variável conservativa em processos adiabáticos secos, portanto mais apropriada para análises termodinâmicas sobre terrenos complexos como o encontrado na RMRJ.

Alguns pesquisadores têm especulado sobre a importância da *advecção da brisa marítima*, o que tange ao transporte de ar relativamente frio e úmido sobre a metrópole, no período da tarde e início da noite. Cardoso *et al.* (2012) [34] mostram que a intensidade da brisa marítima na margem leste da Baía de Guanabara aumenta entre 10 horas e 16 horas (LT). Existem evidências observacionais indicando que a advecção pode ser suficientemente intensa e pode implicar no arrefecimento da temperatura urbana e, na consequente, diminuição da intensidade da UHI ao final da tarde. Em última instância, isto poderia explicar a formação da Ilha de Frescor Urbana, característica do microclima do Rio de Janeiro ao final da tarde, Fig. 1.10.

A Fig. 1.11 serve para destacar os pontos com alta distribuição de temperatura, o qual coincide com três dos cinco pontos estudados: Ilha do Governador, Centro e Jacarepaguá. Tal característica serve para especular que tais regiões são propícias ao desenvolvimento de focos de *Ae. aegypti*, tendo em vista que o mosquito é dependente de altas temperaturas.

Ao considerar-se as previsões de anomalias positivas da perturbação da temperatura do ar e da precipitação nas UHIs, é de se esperar também um aumento relativo na proliferação do mosquito *Aedes aegypti*, o principal vetor da dengue, uma vez que seu ciclo depende de temperaturas relativamente elevadas e da presença de água nos criadouros, dada a necessidade de eclosão dos ovos, desenvolvimento larvar e metarmofose das pupas (Christophers, 1960) [1]. Sendo assim, as áreas de risco (aos seres humanos) ou propícias (ao desenvolvimento do *Aedes aegypti*) devem ser mapeadas e disponibilizadas à Defesa Civil. Uma hipótese a ser testada é se estas áreas de criadouros *podem ou não* ser identificadas com *pontos quentes* na distribuição de flutuações de temperatura potencial média na RMRJ. Mas isto, também está no terreno fértil das especulações, uma vez que a sucessão de eventos quentes e chuvosos pode ser mais estimulante para a fertilidade do *Aedes aegypti*, do que simplesmente um período quente de chuvas intensas quase ininterruptas. Um período quente e sem chuvas vai levar à rápida evaporação dos reservatórios de água superficial, não sendo favorável ao



**Figura 1.11:** Distribuição espacial da temperatura da superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, obtida a partir da aplicação da metodologia proposta por Coll (2003) a uma imagem de satélite NOAA, de Jun. 2003.

Fonte: Marques Filho et al. (2009) [6].

desenvolvimento do mosquito, que depende de altas temperaturas e de manutenção do reservatório de água com quantidade mínima para sobrevivência e manutenção da espécie, portanto, a alternância de períodos chuvosos e períodos quentes pode levar à ocorrência de várias gerações do mosquito em um mesmo ano.

### 1.3 Breve Histórico dos Modelos Matemáticos para Dengue

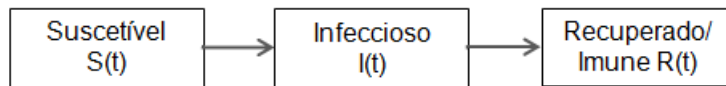
Os modelos matemáticos auxiliam na vigilância epidemiológica através do levantamento de dados e da análise de resultados para a compreensão da evolução das epidemias, bem como fornecem diretrizes para o seu controle.

Vynnycky e White (2010) [7] sugerem etapas a serem realizadas no desenvolvimento de um modelo biofísico e matemático para a dinâmica das populações durante surtos da dengue, dentre elas: a identificação da questão, a identificação dos fatos relevantes acerca da infecção em questão, a escolha dos tipos de métodos de modelagem, os parâmetros de entrada para o modelo específico, a estrutura do modelo, a validação do modelo e a previsão e otimização de parâmetros.

Ao se identificar os fatos relevantes sobre uma determinada infecção, é necessário destacar o período pré-infeccioso, a duração da infecção (tempo), a forma na qual os indivíduos são infectados, o número básico de reprodução e a distribuição dos indivíduos por grupos de idade ou grupos sociais afetados. Há, ainda, três considerações a serem feitas quando da escolha da estrutura de um modelo: a história natural da infecção, a eficiência e o período de tempo no qual as previsões são requeridas.

A infecção é definida por Vynnycky e White (2010) [7] como a invasão de um patógeno em um organismo, através de um outro pequeno organismo, o agente infectante. Os agentes infecciosos patogênicos, ou patógenos, atacam seus hospedeiros e causam a doença. No caso da dengue, os mosquitos, que são os primeiros hospedeiros do vírus da dengue, não sofrem os efeitos da infecção na forma de doença, somente os segundos hospedeiros, a população humana.

Para entender a dinâmica da doença é importante distinguir três grandes períodos envolvidos no processo de infecção: o período pré-infeccioso, também conhecido por período latente (período



**Figura 1.12:** Estrutura geral do modelo SIR usado para caracterizar as classes de indivíduos com relação à transmissão de infecção por dengue. As caixas representam os grupos de indivíduos na condição epidêmica específica e as flechas representam fluxos de indivíduos movendo-se de uma condição para outra, conforme a atividade viral no organismo.

Fonte: Vynnycky e White (2010) [7].

em que um hospedeiro é capaz de transmitir o agente para outro hospedeiro, o que o define como agente infectante); o período de incubação, definido como período entre o ataque ao organismo e o surgimento das características clínicas da doença no hospedeiro; e o período infeccioso, período entre o final da pré-infecção e o momento no qual o hospedeiro não é mais capaz de transmitir a infecção. No período que antecede o período latente, os indivíduos capazes de serem infectados são conhecidos como suscetíveis. Ao serem infectados tornam-se indivíduos expostos, que significa estarem expostos aos efeitos da doença. No período em que um hospedeiro pode picá-lo e contaminar outro indivíduo ele é chamado de infectante ou infeccioso, e após o período de contaminação deixa de ser infeccioso e passa a ser recuperado. No caso da dengue, na ocorrência simultânea de diferentes sorotipos, um indivíduo recuperado pode se reinfectar. Do ponto de vista da modelagem, a reinfecção pode ser representada na forma de retro-alimentação ou *feedback*, o que coloca o sistema de equações em uma condição de não-linearidade.

Vynnycky e White (2010) [7] classificam os modelos de dinâmica de população em surtos epidêmicos em quatro grandes classes:

**SIR** - Modelos que subdividem a população em três subgrupos: suscetível, infeccioso e recuperado.

**SIRS** - Modelos que subdividem a população em quatro subgrupos: suscetível, infeccioso (doente), recuperado e reinfectado. Neste caso, o modelo corresponde a um sistema dinâmico com retro-alimentação.

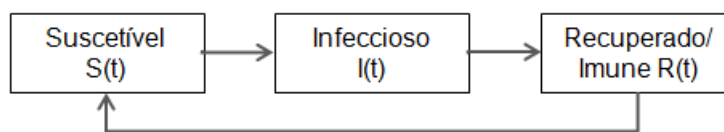
**SEIR** - Modelos que subdividem a população em quatro subgrupos: suscetível, infectado não-infeccioso (exposto), (doente) infeccioso e recuperado.

**SEIRS** - Modelos que subdividem a população em cinco subgrupos: suscetível, infectado não-infeccioso (exposto), infeccioso (doente), recuperado e reinfectado-reinfectioso. Neste caso, o modelo corresponde a um sistema dinâmico com retro-alimentação.

Os modelos com dinâmica SIR são usados para simular infecções imunizantes, como a *gripe*. Na estrutura dos modelos SIR, os indivíduos infectados que se recuperam tornam-se imunes à reinfeções; logo, não há retroalimentação.

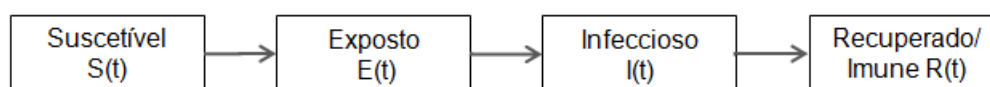
A estrutura de modelos tipo SIRS permite que indivíduos recuperados sofram reinfeções, caso novamente expostos, ou seja, há retroalimentação, indivíduos recuperados passam a serem suscetíveis à infecção pela mesma doença. Por isto esta classe de modelos é usada para simular a dinâmica de *doenças sexualmente transmissíveis*.

Modelos da classe SEIR, assim como os modelos de classe SIR, também são estruturados para representar a dinâmica de infecções imunizantes, entretanto, de um forma mais detalhada. Uma característica que diferencia os modelos de classe SEIR e SIR é a representação da escala de tempo de resposta do indivíduo à infecção, a qual nos modelos SIR é nula e no modelos SEIR tem um valor finito, correspondente a um período pré-infeccioso ou latente, definido entre o momento do contágio e o início dos aspectos clínicos da infecção. As estruturas dos modelos SEIRS e SIRS têm



**Figura 1.13:** Estrutura geral do modelo SIRS usado para caracterizar as classes de indivíduos com relação à transmissão de infecção por dengue. As caixas representam os grupos de indivíduos na condição epidêmica específica e as flechas representam fluxos de indivíduos movendo-se de uma condição para outra, conforme a atividade viral no organismo.

Fonte: Vynnycky e White (2010) [7].



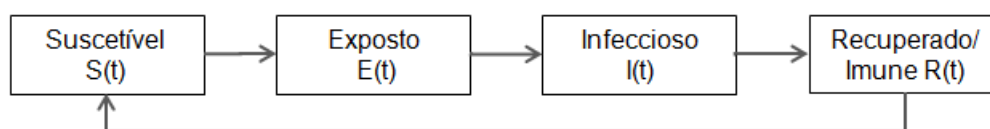
**Figura 1.14:** Estrutura geral do modelo SEIR usado para caracterizar as classes de indivíduos com relação à transmissão de infecção por dengue. As caixas representam os grupos de indivíduos na condição epidêmica específica e as flechas representam fluxos de indivíduos movendo-se de uma condição para outra, conforme a atividade viral no organismo.

Fonte: Vynnycky e White (2010) [7].

sido usadas para *coqueluche* e *gripe* sazonal, por explorar as mudanças na imunidade de indivíduos no processo infeccioso.

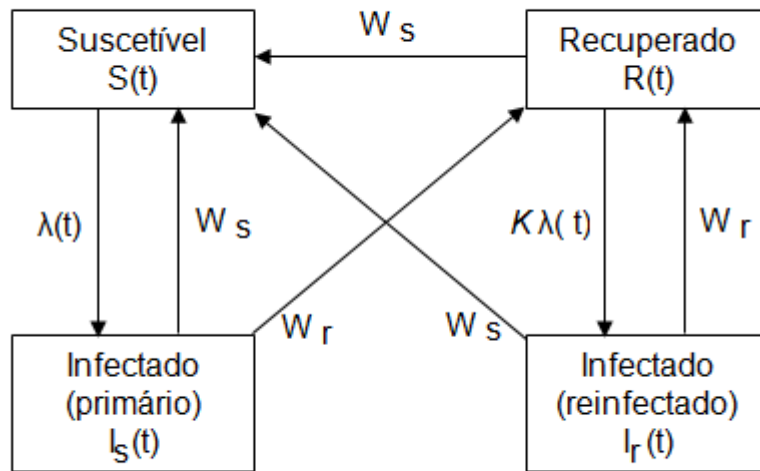
Nos modelos de classe SEIRS, o mecanismo de retro-alimentação também está presente, além do período de latência à infecção. Neste caso, a entrada será uma função não-linear da resposta à epidemia, expressa pelo número de recuperados. Logo, para a epidemia de dengue, um *feedback* positivo se estabelece, caso a circulação simultânea de sorotipos diferentes for observada. Como consequência, ocorre um aumento no número de reinfetados que apresentam FHD.

A Fig. 1.16 mostra um modelo SEIRS, proposto por White *et al.* (2007) [8], o qual representa um modelo que descreve a dinâmica de transmissão do *vírus sincicial respiratório humano* (RSV), uma estrutura de modelo simples com quatro possíveis respostas do hospedeiro à infecção e subsequente reinfecção: indivíduos suscetíveis,  $S(t)$ , indivíduos infectados mas infecciosos pela primeira vez,  $I_s(t)$ ,



**Figura 1.15:** Estrutura geral do modelo SEIRS usado para caracterizar as classes de indivíduos com relação à transmissão de infecção por dengue. As caixas representam os grupos de indivíduos na condição epidêmica específica e as flechas representam fluxos de indivíduos movendo-se de uma condição para outra, conforme a atividade viral no organismo. A flecha de retorno (output-input) indica retroalimentação, capaz de gerar *feedbacks* positivos ou negativos.

Fonte: Vynnycky e White (2010) [7].



**Figura 1.16:** Estrutura geral do Modelo de Transmissão Dinâmica da Dengue usado neste Trabalho. As letras próximas às setas representam a razão na qual os indivíduos se movem de uma categoria para outra com relação à atividade viral no organismo humano.

Fonte: White *et al.* (2007) [8].

indivíduos recuperados da infecção,  $R(t)$  e indivíduos reinfestados e que também são infecciosos,  $I_r(t)$ . A taxa na qual indivíduos recuperados são reinfestados,  $k\lambda$ , difere da taxa na qual indivíduos suscetíveis são infectados pela primeira vez,  $\lambda$ . A taxa na qual indivíduos infecciosos recuperam-se para se tornarem parcialmente imunes a mais uma reinfecção,  $w_r$ , é assumida ser independente caso os indivíduos tenham sofrido infecção pela primeira ou subsequentemente. Indivíduos infecciosos e recuperados podem se tornar totalmente suscetíveis a uma nova infecção, numa taxa  $w_s$ , a qual é idêntica para todos os indivíduos.

As setas que partem de um compartimento para o outro indicam os fluxos de população, isto é, condicionam as possibilidades de indivíduos de determinado compartimento se tornarem de outro compartimento, conforme a resposta à infecção ou reinfecção. Consequentemente, a equação diferencial para a taxa de mudança no número de indivíduos de um determinado compartimento é formada pelo somatório dos fluxos representados pelas setas. Cada seta acompanha um termo que multiplica o valor do compartimento e é acrescido de um sinal de mais (quando a seta entra no compartimento) ou menos (quando a seta sai do compartimento) e assim se forma a parcela na equação do compartimento.

As equações diferenciais, bem como os compartimentos de indivíduos para o modelo SEIRS de White *et al.* (2007) [8], são semelhantes aos adotados neste trabalho para a modelagem da dengue (proposição).

Abaixo o sistema de equações utilizadas para a dinâmica da população humana no modelo proposto para a epidemia de dengue.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dS(t)}{dt} = -\lambda(t)S(t) + w_s I_s(t) + w_r I_r(t) + w_s R(t) \\ \frac{dI_s(t)}{dt} = \lambda(t)S(t) - w_r I_s(t) - w_s I_s(t) \\ \frac{dI_r(t)}{dt} = k\lambda(t)R(t) - w_r I_r(t) - w_s I_r(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} = -k\lambda(t)R(t) + w_r I_s(t) + w_r I_r(t) - w_s R(t) \end{array} \right. \quad (1.1)$$

Onde  $\lambda$  representa a taxa de transformação de indivíduos suscetíveis ( $dS$ ) em infectados primários ( $dI_s$ );  $w_s$  é a taxa de transformação em indivíduos suscetíveis;  $w_r$  é a taxa de transformação de indivíduos infectados primários ( $dI_s$ ) ou reinfetados ( $dI_r$ ) em indivíduos recuperados ( $dR$ ) e  $k\lambda$  é a taxa de transformação em indivíduos recuperados ( $dR$ ) em reinfetados ( $dI_r$ ). Todos em função do tempo ( $t$ ).

Em geral, os modelos de dinâmica de população durante epidemias consideram populações estacionárias. Mas nem sempre esta hipótese é razoável. Por exemplo, no caso da Peste Negra (Bubônica), ocorrida na Europa em meados do século XIV, houve uma enorme redução populacional. A Peste Negra foi associada em parte à fome causada pela flutuação climática natural chamada *Pequena Idade do Gelo*, ao final do século XIII. Por outro lado, no caso da dengue, em um ano epidêmico, o número de notificações é da ordem de  $10^3$  a  $10^4$ , com o número de mortos variando de dezenas a centenas de pessoas. Dado que a população das metrópoles brasileiras apresenta um número entre  $5 \times 10^5$  e  $2 \times 10^7$ , a hipótese de estacionariedade mostra-se apropriada para a epidemia de dengue, pelo menos em primeira aproximação.

## Retrospectiva dos modelos para a dengue

Dentre os diversos trabalhos que fizeram uso de modelos matemáticos para estudar a variação dos parâmetros entomológicos do mosquito transmissor da dengue e da viremia na população humana, três se destacam, Ferreira e Yang (2003) [17], Otero *et al.* (2006) [18] e Codeço *et al.* (2008) [21], por analisarem a dinâmica populacional do mosquito e da população humana, usando como parâmetro temporal a variação da temperatura. Os modelos são muito semelhantes, apresentando equações matemáticas para o segundo hospedeiro (população humana) e para o vetor (mosquito transmissor). Tais equações levam em consideração a taxa de mortalidade nas diferentes fases de infecção, para o controle do ciclo epidemiológico no hospedeiro e no vetor. Os modelos consideram também a taxa de desenvolvimento a qual correlaciona a capacidade suporte de cada fase com a taxa de natalidade, ou seja, a capacidade suporte dos reservatórios. É importante ressaltar que, no desenvolvimento das equações, a taxa de mortalidade e a capacidade suporte do reservatórios são reinseridas em fases consecutivas, caracterizando a co-dependência de uma fase para outra. Os autores também utilizam em seus estudos o número básico de reprodução ( $R_0$ ) e o número de descendentes basal ( $Q_0$ ).  $R_0$  fornece o número de casos secundários após a introdução de um único indivíduo infectado para uma população suscetível, bem como serve para estudar os valores lineares dependentes de temperatura, tendo em vista que os valores basais de  $R_0$  e de  $Q_0$  dependem de parâmetros entomológicos clima-dependentes.

## 1.4 Considerações Preliminares

As ciências físicas, biológicas e matemáticas têm compartilhado metodologias para uma melhor compreensão do desenvolvimento de determinadas doenças monitoradas pela vigilância epidemio-

**Tabela 1.1:** Comparação esquemática entre os modelos de dinâmica populacional para a dengue conhecidos e o presente trabalho.

|  | Ferreira e Yang<br>(2003) [17]  | Otero <i>et al.</i><br>(2006) [18]  | Codeço <i>et al.</i><br>(2008) [21]   | Presente<br>Trabalho   |
|--|---|---|---|--|
| Tipo   | determinística  | estocástica   | estocástica   | determinística   |
| Número de Equações Diferenciais Parciais Acopladas | 10 Equações = 6 p/ população mosquito + 4 p/ população humana                                 | 10 Equações = 6 p/ população mosquito + 4 p/ população humana             | 10 Equações = 6 p/ população mosquito + 4 p/ população humana                       | 16 Equações = 6 p/ população mosquito + 6 p/ pop. humana + 4 p/ pop. vírus             |
| Compartimento Populacional                         | mosquito e humana   | mosquito e humana   | mosquito e humana   | vírus, mosquito e humana   |
| Assimilação dos dados                              | não<br>Teste Sensibil. para 2 valores constantes de T   | sim<br>primeiro harmônico da Temp.  | não<br>variáveis estocásticas ou constantes   | sim<br>Nudging 4D<br>P, T, Q, R, $R_n$<br>e Onda curta global                          |
| Especificidade do Modelo                           | parâmetros entomológicos próprios, função de $P_n^{(3)(6)}(T)$<br>Ferreira e Yang (2003) [17] | parâmetros enzimáticos com $\exp(f(t))$<br>Sharpe e DeMichele (1977) [35] | parâmetros entomológicos função de $P_n^{(3)(6)}(T)$<br>Ferreira e Yang (2003) [17] | parâmetros entomológicos função de $P_n^{(3)(6)}(T)$<br>Yang <i>et al.</i> (2009) [12] |

lógica. Em particular, a modelagem matemática serve para simular a epidemia, uma vez que os mecanismos biofísicos podem ser representados por um modelo com parametrizações fisicamente consistentes. A modelagem implica na melhoria da análise estatística das variáveis de entrada do modelo (condições iniciais) e sua etapa de diagnóstico, assim como permite previsões da evolução da própria epidemia sob diferentes condições de contorno e de controle (vacinas, reinfecções por sorotipos, controle de vetores, etc). A Epidemiologia Matemática surge, então, para auxiliar no estudo quantitativo de séries históricas de dados e, a partir da utilização de modelos matemáticos, fazer previsões e levantar as possíveis interrelações existentes entre determinadas doenças e a dinâmica populacional dos organismos envolvidos.

As epidemias são caracterizadas pela dinâmica populacional do agente infeccioso e do seu hospedeiro, além do organismo causador. Para tanto, a precisão do modelo depende da quantidade e da qualidade da condição inicial das variáveis prognósticas e dos valores dos parâmetros das equações utilizadas.

O grau de complexidade do modelo depende de uma solução de compromisso entre a capacidade técnica de análise de processamento computacional e o grau de simplificação necessária para que a análise das variáveis seja possível. Se o modelo for muito abrangente em suas representações, seu resultado será muito mais próximo da realidade e de feição caótica, o que é muito bom, porque o objetivo da simulação é objetivamente reproduzir a realidade à medida em que se completa cada bite de informação faltante nas observações diretas, mas por outro lado, o trabalho de interpretação física também aumenta. A solução de compromisso considera que o modelo depende de um conjunto de parâmetros dos quais é sensível. Este conjunto precisa ser limitado. Assim, o número de parâmetros deve ser grande o suficiente para permitir a emulação da dinâmica física observada e, ao mesmo tempo, deve permanecer limitado ao menor número possível de caracteres. Geralmente, isto é realizado obtendo-se um conjunto de parâmetros para os quais a solução se mostra mais sensível,



dentro da janela temporal dos resultados. Modelos com pequeno número de parâmetros apresentam vantagem quanto à otimização da versão operacional e também quanto à interpretação mais direta dos resultados.

## 1.5 Objetivos

O entendimento das relações entre as variáveis meteorológicas e a dengue é primordial para ampliar o conhecimento dos possíveis impactos que as mudanças ambientais possuem para o agravamento das epidemias de dengue. Considerando que o vetor possui hábitos tipicamente urbanos, como causas destas mudanças citam-se, principalmente, os efeitos da urbanização, e ainda, as modificações e flutuações climáticas. Em particular, modelos de correlação entre as variáveis atmosféricas e os parâmetros entomológicos do vetor devem ser considerados. Modelos podem agregar o conhecimento acumulado de forma articulada e assim, permitir a investigação de impactos de mudanças ambientais sobre as epidemias, seja para fins de diagnósticos da situação presente ou passada, em retrospectiva, como também para prognósticos das condições das epidemias futuras. Assim, para este trabalho, os seguintes objetivos são propostos abaixo:

- a) descrever as relações existentes entre a viremia da Dengue e as variáveis meteorológicas de superfície, no Município do Rio de Janeiro, através da análise da dinâmica populacional do *Aedes aegypti* em suas fases, dos quatro sorotipos virais e da população humana, considerando indivíduos reinfetados e mortos;
- b) realizar o levantamento climatológico das variáveis de temperatura, precipitação e umidade relativa, a fim de caracterizar as condições epidêmicas médias da virulência no referido local do estudo a cada passo de tempo do modelo.
- c) simular a dinâmica das populações de vírus, do vetor da dengue e humana nas epidemias, no período 2000-2010, com o uso de um modelo baseado em um sistema de equações diferenciais parciais acopladas, escrito particularmente para levar em conta a assimilação de dados 4D (temperatura, umidade específica e precipitação e radiação solar). A assimilação se dá ao longo de toda simulação, considerando um modelo de reservatório linear (LRM) dos criadouros de *Ae. aegypti*. Por hipótese, os eventos de precipitação no período, em conformidade com sua intensidade e frequência, e ainda de forma consistente para as condições do balanço de energia e água, reabastecerão o reservatório de água superficial modelado, que por sua vez, servirá para definir as condições dos criadouros associados ao desenvolvimento dos ovos, larvas e pupas, na fase aquática do *Aedes aegypti*.

## 1.6 Contribuições ao problema

Os modelos de epidemia de dengue da literatura, que são de conhecimento do autor no momento, não consideram de forma realística a assimilação de dados meteorológicos. Logo, propõe-se, neste trabalho, a construção de um modelo computacional da dinâmica das populações dos organismos envolvidos na epidemia de dengue, com capacidade de assimilação 4D das variáveis meteorológicas, assim como a implementação da retroalimentação para representar as reinfecções por dengue. A representação da reinfecção também é considerada original deste trabalho. Por outro lado, uma análise estatística da distribuição espacial da precipitação no Município do Rio de Janeiro, baseada em 32 Postos telepluviométricos da Fundação GeoRIO espalhados pela área, também é apresentada neste trabalho.

## 1.7 Uma perspectiva pessoal: de paciente à pesquisador

O autor tem uma história pessoal em relação à dengue. Em 2007, enquanto ocorria um surto da doença no Rio de Janeiro, caracterizada pelo maior número de casos associados ao sorotipo

DENV-2 e à circulação concomitante dos sorotipos DENV-1 e DENV-3, o autor foi acometido pela forma clássica da doença, por um período de incubação de oito dias, tendo como características clínicas marcantes da infecção, fortes dores no corpo, principalmente nas articulações ósseas, dor de cabeça e febre, além de ter ficado internado por dois dias, revelando a intensidade da viremia. Recuperado, foi reinfectado em 2009, resultando em um quadro clínico de dengue hemorrágica, caracterizada também por manchas avermelhadas no corpo e sangramento pelo nariz e orelhas. Tais acontecimentos foram marcantes para o autor, pois hoje, ao estudar a dengue, o mesmo pode levantar conclusões não somente através da análise de resultados, mas também a partir do que o mesmo vivenciou com respeito aos efeitos da viremia.

### **Estrutura do trabalho**

Este trabalho apresenta a seguinte estrutura de capítulos: o Capítulo 1 introduz o problema da modelagem da dengue; o Capítulo 2 descreve as equações diferenciais parciais acopladas usadas no modelo de dinâmica de populações infectadas pela dengue e também as etapas de preparação dos dados observacionais assimilados; o Capítulo 3 apresenta resultados das análises estatísticas (ANOVA, correlação linear, dupla massa) e os resultados de simulações; ao final, o capítulo 4 discute os resultados e estabelece conclusões.



## Capítulo 2

# Materiais e método

Neste capítulo apresentam-se os dados e a metodologia utilizada no trabalho. Os dados correspondem a uma coletânea de 10 anos (2000-2010) dos dados meteorológicos observados em superfície (horários), em aeroportos da RMRJ, além de dados do SUS referentes às notificações de agravos relativos à pacientes com dengue, para mesmo período, na RMRJ. Dados de radiação solar à superfície foram obtidos a partir da parametrização de Bird e Hulstrom (1981) [36], avaliada por Iqbal(1983) [37]. A frequência das notificações é quinzenal. O modelo numérico é constituído por um sistema de equações diferenciais usado para simular a dinâmica de população durante o desenvolvimento das epidemias de dengue, no mesmo período, correspondente às observações. Ao final deste capítulo, é determinada a eficiência do modelo frente à comparação feita entre as notificações de agravos por dengue (indivíduos reinfectados) simuladas no modelo e aquelas observadas e notificadas pelo SUS.

### 2.1 Fontes de dados meteorológicos à superfície e de notificações de agravo

Neste trabalho, dados provenientes de diferentes fontes foram concentrados, organizados e reformatados na etapa de preparação quanto à análise estatística, bem como quanto à assimilação newtoniana no modelo. As principais fontes de dados empregadas encontram-se listadas a seguir:

**Observações atmosféricas** - As *estações meteorológicas de observação à superfície* do Comando da Aeronáutica Brasileiro (COMAER), dos cinco aeroportos da RMRJ, emitem boletins horários e não horários, através da mensagem METAR/SPECI, das condições meteorológicas junto à superfície para auxílio aos aeronavegantes, seguindo a codificação internacional da *Organização Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, WMO-ONU)*. A mensagem METAR é emitida a cada hora cheia e, quando ocorrer uma alteração de tempo representativa, em intervalo de dez minutos, fora dos dez minutos que antecedem a hora cheia, é emitido código semelhante, chamado de SPECI. A localização dos cinco aeroportos da RMRJ (2011) encontra-se na Fig. 1.7 e seus dados na Tabela 2.1.

Os procedimentos usados na concentração, (geo)referenciamento e reformatação dos dados obtidos a partir de mensagens METAR, que são de natureza transitória na Internet, também são descritos neste capítulo. Primeiro, uma compilação diária já decodificada dos dados transitórios METAR é obtida do site concentrador *weather underground*<sup>1</sup>, aplicando-se um *script shell, wget\_metar*. Este *script* e outros programas escritos em linguagem fortran-90, desenvolvidos pelo orientador deste trabalho, estão disponíveis para uso em pesquisa no *Laboratório de Hidrometeorologia Experimental (LHYDEX)* localizado no IGEO da UFRJ. Segundo, os arquivos de dados, do período considerado, são concentrados em diretório local, concatenados (pelo comando *cat* do linux) para, a seguir, serem reformatados e acrescidos de tempo

---

<sup>1</sup>URL: <http://www.wunderground.com/cgi-bin/findweather/hdfForecast?query=Rio+de+Janeiro>

contínuo (ano decimal por exemplo, 2012,053200674) e das coordenadas geográficas de cada estação (longitude decimal, latitude decimal, altitude geopotencial), pela aplicação do programa desenvolvido *reading\_dataserie*, disponível no LHYDEX, para esta tarefa.

Os resultados são dados concentrados, referenciados tipo xyz.dat (cada linha possui um tempo de medição e as variáveis encontram-se nas colunas) e correspondem ao período de 01/Jan/2000 a 31/dez/2010. A seguir, as variáveis meteorológicas que originalmente não se encontram disponíveis no METAR distribuído pela Estação Meteorológica de Superfície do aeródromo correspondente, como a irradiância solar chegando à superfície, a direta, a difusa e a global, em  $Wm^{-2}$ , são calculadas por parametrizações conhecidas de referência (Iqbal, 1983) [37] e acrescentadas às colunas do arquivo xyz.dat. O mesmo procedimento é feito para outras variáveis termodinâmicas derivadas, que são conservativas em processos adiabáticos úmidos ou ainda pseudo-adiabáticos saturados: as temperaturas potencial seca ( $\theta_d$ ), úmida ( $\theta$ ) e potencial equivalente ( $\theta_e$ ), em graus absolutos ( $K$ ); a altura do nível de condensação por elevação ( $NCL$ ), em metros ( $m$ ); a umidade específica ( $q$ ) (adimensional); a razão de mistura ( $w$ ) (adimensional) e a pressão de vapor de água ( $e$ ), em ( $Pa$ ); assim como, seus valores de saturação ( $q_s$ ,  $w_s$ ,  $e_s$ ), e para tal, aplicam-se as equações propostas por (Bolton, 1980) [38].

**Precipitação à superfície** - Dados de precipitação à superfície, em unidades de mm por 15 minutos, com frequência de observação de 0,25 hora, utilizados neste trabalho são provenientes da rede de observação de mesoescala, dos postos telepluviométricos da Fundação GeoRIO, disponibilizados no sistema ALERTA-RIO sob responsabilidade da Prefeitura do Município do Rio de Janeiro-RJ, Brasil. Os dados originais estão disponíveis para download na Internet<sup>2</sup>, sendo compostos por 32 postos telepluviométricos (2011), distribuídos na RMRJ, mas principalmente dentro da área do Município do Rio de Janeiro. Dentre estes postos, a Tabela 2.2 apresenta os cinco que se encontram mais próximos (distância inferior a 5 km) dos cinco aeródromos da RMRJ, indicados na Tabela 2.1, utilizados neste trabalho.

**Dados meteorológicos diários** - Dados meteorológicos diários da temperatura média, máxima e mínima do ar, da umidade relativa do ar e da precipitação acumulada do período 2000-2010, oriundos do *World Weather Watch Program* da *Organização Meteorológica Mundial* (WMO) e também do *Centro Nacional de Dados Climáticos* (NCDC-INMET)<sup>3</sup>.

**Dados mensais do Índice de Oscilação Sul** - Dados mensais do Índice de Oscilação Sul (*Southern Oscillation Index*, SOI), obtidos por média móvel de três meses, calculados, compilados e distribuídos<sup>4</sup> pelo *Climatic Prediction Center* do *National Weather Service* (NWS) da *Nacional Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dos EUA. O SOI é obtido pela diferença da pressão ao nível da superfície do mar entre Tahiti e Darwin. O SOI foi comparado com dados mensais correspondentes de notificação de agravos por dengue do SUS, a partir da análise de gráfico de dispersão e cálculo do ajuste linear (usando aplicativo *qtplot*). Assim, é possível avaliar a ocorrência ou não de relação linear entre o SOI e as notificações dengue no período analisado (10 anos).

**Dados de notificação de agravo** - Quanto aos dados de saúde, foi feito um levantamento dos casos de notificação de dengue na população humana hospitalizada no SUS, no primeiro mês do sintoma, na RMRJ, relativos ao período de Janeiro de 2000 a Dezembro de 2010. De acordo com a ANVISA, a fonte das notificações são os hospitais e postos de saúde. As notificações são enviadas, concentradas e analisadas no SINAN. Os dados de notificação são distribuídos por download pelo SINAN, via URL<sup>5</sup>.

<sup>2</sup>URL: [www2.rio.rj.gov.br/GeoRIO/site/alerta/dados/acumuladas.asp](http://www2.rio.rj.gov.br/GeoRIO/site/alerta/dados/acumuladas.asp)

<sup>3</sup>URL: <ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/g sod>

<sup>4</sup>URL: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/soi>

<sup>5</sup>Web: [www.saude.gov.br/sinanweb](http://www.saude.gov.br/sinanweb)

**Tabela 2.1:** *Estações Meteorológicas de Superfície pertencentes ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) do Brasil, localizadas no Município do Rio de Janeiro na RMRJ, RJ, Brasil.*

| Nome          | Código da Estação | Longitude     | Latitude      | Altitude (m) |
|---------------|-------------------|---------------|---------------|--------------|
| Afonso        | SBAF              | 43° 22' 50" W | 22° 52' 33" S | 34           |
| Galeão        | SBGL              | 43° 14' 37" W | 22° 48' 32" S | 9            |
| Jacarepaguá   | SBJR              | 43° 24' 05" W | 22° 59' 11" S | 0            |
| Santos Dumont | SBRJ              | 43° 09' 50" W | 22° 54' 39" S | 8            |
| Santa Cruz    | SBSC              | 43° 42' 55" W | 22° 55' 41" S | 3            |

**Tabela 2.2:** *Postos Telepluviométricos pertencentes à Fundação GeoRIO/ALERTA-RIO da Prefeitura do Município do Rio de Janeiro, RJ, Brasil, na vizinhança dos cinco aeroportos da RMRJ (2011).*

| Posto Telepluviométrico | Longitude     | Latitude      | Aeródromo próximo |
|-------------------------|---------------|---------------|-------------------|
| Madureira               | 43° 20' 20" S | 22° 52' 20" W | Afonso            |
| Ilha do Governador      | 43° 12' 36" S | 22° 49' 03" W | Galeão            |
| Barra/Riocentro         | 43° 24' 42" S | 22° 58' 30" W | Jacarepaguá       |
| São Cristóvão           | 43° 13' 18" S | 22° 53' 48" W | Santos Dumont     |
| Santa Cruz              | 43° 41' 04" S | 22° 54' 44" W | Santa Cruz        |

### 2.1.1 Preparação dos dados

Existem muitas técnicas para estimativa de dados ausentes (deleção, ajustamento, estimativas por máxima verossimilhança, imputação) disponíveis na literatura (por ex., Allison, 2001 [39]), sendo, um entre os mais destacados, a estimativa por máxima verossimilhança (*maximum-likelihood estimation*) (MLE). O princípio básico por trás da MLE é escolher um valor tal que maximize a probabilidade de que o valor escolhido seja o que seria o observado, portanto pressupõe o conhecimento de um modelo estatístico paramétrico associado. Para implementar a MLE é preciso definir a expressão para a probabilidade em função dos próprios dados e dos parâmetros. No caso mais simples, considera-se o modelo linear com distribuição normal de probabilidade dos dados. Outra técnica muito importante é a de imputação, na qual se aplicam imputações aleatórias, simples, múltiplas ou baseadas em modos normais multivariados.

Neste trabalho, entretanto, nenhum tratamento foi aplicado aos dados ausentes, a não ser, a sua deleção dos cálculos médios e da assimilação na simulação. Isto foi feito porque os problemas encontrados nos dados não são apenas de falhas individuais, mas longos períodos de ausência de dados meteorológicos (2003 a 2008) em três aeródromos da RMRJ (SBSC, SBJR, SBAF). Os dados horários, no período da madrugada, da Estação Meteorológica de Superfície (EMS) do aeroporto Santos Dumont (SBRJ) não existem, da mesma forma ocorre, no período de mudança de turno de pessoal, na EMS do aeroporto do Galeão (SBGL); já às 23:00 horas (LST), não há dados

disponíveis (METAR) de nenhum aeroporto da RMRJ. A partir de 2008, os dados encontram-se disponíveis em todos os aeroportos, com exceção do período da madrugada, que é disponibilizado somente no aeroporto Galeão (SBRJ). Logo, por seu volume, os dados do Galeão constituem a base de informações meteorológicas de superfície empregadas na modelagem, com exceção da taxa de precipitação, obtida da rede telepluviométrica da GeoRIO.

Os arquivos tipo xyz.dat gerados, contendo dados horários meteorológicos de superfície válidos, foram preparados para carregamento como planilhas de dados de aplicativos gráficos como Microsoft Office Excel (*Windows*), qtiplot e gnuplot (*Linux*), como também para assimilação direta nas simulações.

Os dados pluviométricos da rede de observação da GeoRIO, também foram concentrados e reformatados em arquivos xyz.dat georeferenciados, para os quais, cada linha mantém um registro com informações da longitude decimal, latitude decimal, altitude geopotencial e valor observado, a cada 15 minutos, gerando-se um arquivo xyz.dat para cada posto telepluviométrico. A forma obtida pode ser carregada em aplicativos gráficos (por ex., gnuplot), como também servir de arquivo de entrada na assimilação de dados das simulações.

As séries de temperatura dos diferentes aeródromos foram comparadas. A hipótese de que apresentam mesma média (Hipótese 0) foi testada por análise de variância (ANOVA). Uma metodologia similar foi empregada para verificar se diferentes Postos Telepluviométricos apresentam valores médios de precipitação similares.

### 2.1.2 Sincronização dos dados observados e análise dupla de massa

A partir das assimilações de dados no modelo, obtém-se uma sincronização dos dados a cada passo de tempo do modelo. A escala de tempo de assimilação, neste trabalho, é de uma hora. Assim, qualquer dado disponível na janela de assimilação, de mais ou menos uma hora, é assimilado na variável correspondente do modelo. Os dados de T, p, q e a taxa de precipitação, sincronizados, são salvos durante a simulação, o que permite cálculos posteriores que dependem de séries completas e sincronizadas, como para a *matriz de covariância* e para a análise hidrológica de Dupla Massa (DM), que requer dados acumulados anuais de precipitação. Os dados são sincronizados internamente pelo algoritmo comparativo: *se o tempo de simulação é igual ao tempo de observação então se assimila a observação*.

Primeiro, a DM requer o levantamento das médias mensais (ou anuais) da precipitação de postos na região de interesse. Segundo, constrói-se um diagrama de dispersão entre as médias de um certo posto, no eixo Y, e as médias das médias de todos os postos, no eixo X. Terceiro, compara-se com a bissetriz do eixo cartesiano (tangente  $45^\circ$ ). A análise da DM consiste em verificar se os pontos da curva se afastam significativamente da bissetriz. Neste caso, ou o posto telepluviométrico não pertence à mesma população, ou o pluviômetro apresenta descalibração, ou ainda, que a sua exposição tenha sido alterada. Alterações da exposição ocorrem, por exemplo, quando árvores crescem ao redor do pluviômetro. A DM pode servir como ferramenta de controle automático da calibração e da exposição de pluviômetros distribuídos em rede densa. Muitos hidrologistas aplicam DM em suas investigações (Tucci, 2009) [40].

## 2.2 Balanço de energia

O balanço de energia superficial (SEB) é fundamental para a determinação da evolução temporal das variáveis atmosféricas de superfície. A dinâmica destas variáveis acaba por determinar o tempo presente, em microescala, e o clima do ponto de vista probabilístico.

As propriedades e configurações encontradas na superfície urbana acabam por definir diferentes partições dos fluxos do balanço de energia e, por consequência, estabelecem-se diferentes microclimas na área urbana. Por exemplo, microclimas do centro urbano e dos parques.

A presença de construções modifica inadvertidamente as condições microclimáticas (Oke, 1987) [9]. Conseqüentemente, o excesso ou déficit do fluxo de densidade de radiação solar e terrestre, ou

seja, o saldo líquido das irradiâncias de onda-curta e longa termal, é estabelecido pelas propriedades da superfície e sua interação com a radiação. Neste particular, o albedo (refletividade de onda-curta) e a emissividade, considerada o infravermelho térmico ( $10\mu m$ ), são parâmetros de maior controle. Por outro lado, nas áreas urbanas, cânions urbanos (UC) interagem de forma peculiar com os fluxos de radiação, além de estabelecer áreas de sombreamento e penumbra não existentes em superfícies planas horizontais. O tipo de material constituinte das superfícies expostas e do solo também modifica o SEB, principalmente, em relação à condução molecular de calor através da superfície e da acumulação de energia nos elementos de maior inércia térmica.

Para Brigdman e Oliver (2006) [32], o saldo líquido de irradiância,  $Q^*$ , também conhecido como balanço de radiação, representa o limite superior para a energia disponível, Fig. 2.1, definido por:

$$Q^* - Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_G + \Delta Q_A \quad [W.m^{-2}] \quad (2.1)$$

Sendo  $Q^*$  o saldo líquido de irradiância;  $Q_F$  a densidade de fluxo de calor de origem antrópica (energia liberada pelas atividades humanas);  $Q_H$  o fluxo turbulento de calor sensível;  $Q_E$  o fluxo de calor latente (energia ganha ou perdida com a mudança de fase);  $\Delta Q_G$  o fluxo de calor condutivo molecular da superfície (associado à acumulação/liberação de energia), ou fluxo de calor junto ao solo, e  $\Delta Q_A$  o saldo líquido de advecção de calor na horizontal (movimento lateral de energia dentro ou fora de um elemento de volume).

Os fluxos de calor do SEB variam no espaço e no tempo. Oke (1987) [9] descreve, didaticamente, o balanço de energia de forma mais sucinta, não levando em conta as fontes e sorvedouros de energia associados à ação antrópica e também à advecção; não considerando também heterogeneidades da superfície ao longo da horizontal. Desta forma, a Eq. 2.1, pode ser descrita, sob a forma simplificada através da Eq. 2.2:

$$Q^* = Q_H + Q_E + \Delta Q_G \quad [W.m^{-2}] \quad (2.2)$$

A irradiância líquida é expressa pela Eq. 2.3:

$$Q^* = K \downarrow - K \uparrow + L \downarrow - L \uparrow \quad [W.m^{-2}] \quad (2.3)$$

Sendo  $K \downarrow$  a irradiância de onda-curta incidente,  $K \uparrow$  a irradiância de onda-curta emergente,  $L \downarrow$  a irradiância de onda-longa incidente da atmosfera (infravermelho termal) e  $L \uparrow$  a irradiância de onda-longa emergente terrestre (infravermelho termal), todos em  $W.m^{-2}$ .

## 2.3 Balanço de água

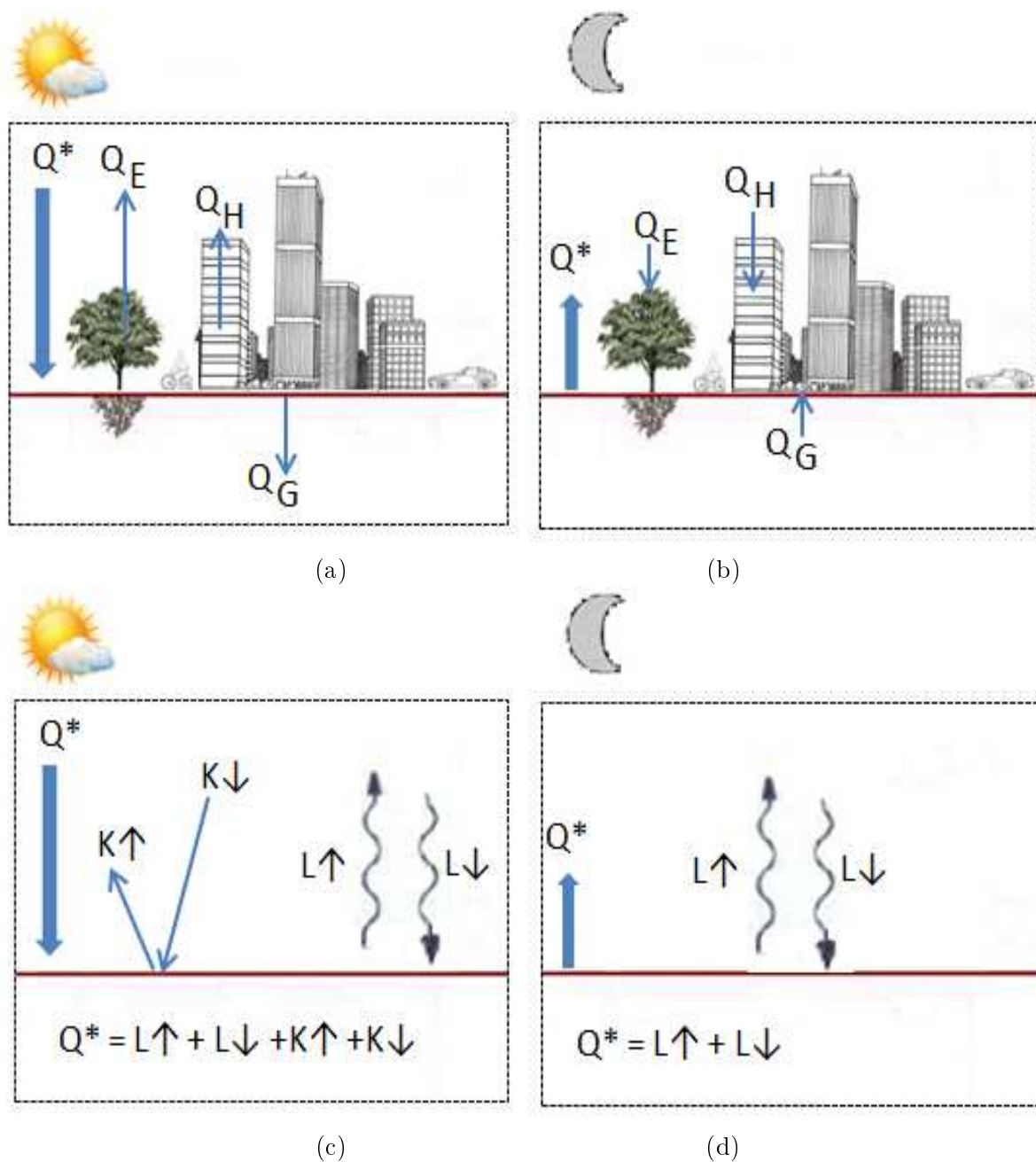
Para implementação da representação linear dos reservatórios de água dos criadouros urbanos para hidrologia, considera-se o balanço hídrico, também conhecido como balanço de água, o qual representa a somatória das quantidades de água que entram e saem de uma certa porção do solo em um determinado intervalo de tempo.

O balanço hídrico pode ser descrito, de forma simplificada, segundo (Brutsaert, 2005) [10], como visto na Eq. 2.4:

$$R - \left( \frac{Q_E}{L} + I + \Delta Q \right) = 0 \quad (2.4)$$

O ciclo hidrológico se realiza pela troca constante de água entre a superfície terrestre e a atmosfera. Em condições naturais, a umidade do solo varia no decorrer do tempo, sob o efeito da precipitação ( $R$ ) e das variações sazonais da temperatura ( $T$ ) e da evapotranspiração ( $Q_E/L$ ). Considerando-se, ainda, a taxa de infiltração no solo ( $I$ ) e a variação da vazão que entra e sai do sistema ( $\Delta Q$ ). Todas as unidades estão em  $m^3.m^{-2}.s^{-1}$  ou  $m.s^{-1}$ . Em geral, em Meteorologia, a unidade usual do balanço de água é apresentada em  $mm.h^{-1}$  ou  $mm.ano^{-1}$ , e é dependente da escala de tempo do ciclo hidrológico analisado.





**Figura 2.1:** Balanço de energia (linha superior) e de radiação (linha inferior) sobre superfícies terrestres idealizadas, sob condições de alta pressão, anticiclônicas e céu claro, para o dia, Figs. (a) e (c); e para a noite, Figs. (b) e (d), respectivamente. A energia solar recebida na forma de densidade do saldo líquido do fluxo radiativo (ou irradiância líquida) ( $Q^*$ ), em unidades de  $W.m^{-2}$ , é igual a soma das irradiâncias incidentes e emergentes nas faces do volume de controle tridimensional, uma vez considerada a absorção da energia radiante e seu armazenamento na forma de calor. Ilustração baseada em Oke (1987)[9].

Os balanços de energia e de água se relacionam pelos termos associados ao calor latente, a saber, o fluxo de calor latente em  $W.m^{-2}$  no SEB e o fluxo de vapor devido evapotranspiração,  $Q_E/L$ , em  $m.s^{-1}$ , no balanço hídrico.

Para um terreno inclinado, como os encontrados nas áreas de bacias hidrográficas, o balanço hídrico superficial sofre os efeitos gravitacionais associados à topografia inclinada, Fig. 2.2. O fluxo de água que percorre a superfície do terreno e a camada subsuperficial (primeiro horizonte do solo) pode ser decomposto nos componentes vertical e horizontal; o fluxo vertical está associado à taxa de infiltração,  $I$ , enquanto que o horizontal à precipitação efetiva ou saldo líquido do escoamento superficial,  $Q$ , ou *runoff*.

No modelo conceitual apresentado na Fig. 2.2,  $\theta_z$  é a inclinação do terreno, em *rad*; a zona saturada do solo encontra-se abaixo da profundidade  $z^*$  do solo, identificada com o lençol freático, o aquífero estende-se desde  $z_0$  (base rochosa impermeável) até  $z^*$ . A zona não-saturada estende-se de  $z^*$  até a superfície, contendo em sua parte superior a *zona das raízes* da vegetação. A movimentação do lençol freático está associada à descarga da zona não-saturada (ou recarga da zona saturada), sendo mensurada em unidades de fluxo de volume de água, isto é,  $m^3m^{-2}s^{-1}$  ou  $ms^{-1}$ .

A infiltração ( $I$ ) resulta da diferença entre a taxa de precipitação,  $R$ , em  $ms^{-1}$ , a taxa de evapotranspiração,  $E$ , e o saldo líquido do escoamento superficial,  $Q$ , ou *runoff*, descrito na Eq. 2.5:

$$\Delta Q = (Q_2 - Q_1) + (Q_{v2} - Q_{v1}) \quad (2.5)$$

Sendo  $Q_1$  a vazão (fluxo volumétrico de água cruzando uma superfície vertical) que entra no elemento de volume, e  $Q_2$  a vazão que sai do elemento de volume, ambos em unidades de  $ms^{-1}$ ;  $P$  é a percolação (infiltração devido à gravidade) ou fluxo vertical de água do solo para o aquífero, isto é, a descarga da zona não-saturada ou recarga da zona saturada. A descarga da zona não-saturada é proporcional à  $\Delta Q_v = Q_{v2} - Q_{v1}$  e ao acúmulo de base,  $\Delta Q_b = Q_{b2} - Q_{b1}$ , pertencente à zona saturada (aquífero), a qual controla a profundidade do lençol freático. Consequentemente, encontra-se:

$$\Delta Q_v = P - \frac{\partial z^*}{\partial t} \Delta t - \frac{Q_E}{L} \quad (2.6)$$

Sendo  $\Delta Q_v$  a vazão volumétrica na zona não-saturada do solo, que varia em função da variação da temperatura, ( $\Delta t$ ) e da profundidade do solo ( $z^*$ ); bem como, da percolação ( $P$ ) e da evapotranspiração ( $\frac{Q_E}{L}$ ).

### 2.3.1 Modelo de reservatório linear para os criadouros

Christophers (1960) [1] caracteriza o ciclo de desenvolvimento do mosquito *Aedes aegypti*, vetor da febre amarela e da dengue, assim como discute qualitativamente os fatores de sua sobrevivência, dentre eles, a temperatura e a precipitação.

Esses fatores são classificados como:

- *Fatores de desenvolvimento cumulativo diário (CD)* - fatores explicitamente associados à *metamorfose* do mosquito *Aedes aegypti*, dependente da temperatura e da precipitação.
- *Fatores de manutenção* - fatores atuantes nos diversos estágios específicos de vida do *Aedes aegypti*.

A metamorfose depende da presença de água. Em particular, destacam-se a ovoposição, a eclosão dos ovos; bem como, a sobrevivência das larvas, as quais, após passarem pelo processo de pupação, atingem o estágio de maturação, no qual ocorre a metamorfose para pupa. Em todos os três estágios de metamorfose, mencionados acima, é conhecido que a quantidade de água necessária nos reservatórios dos criadouros urbanos deve ser maior ou igual a 10 mm de altura. A água destes reservatórios pode ser acumulada de forma natural por precipitação, ou de forma antrópica, devido irrigação ou acúmulo em reservatórios para consumo humano.

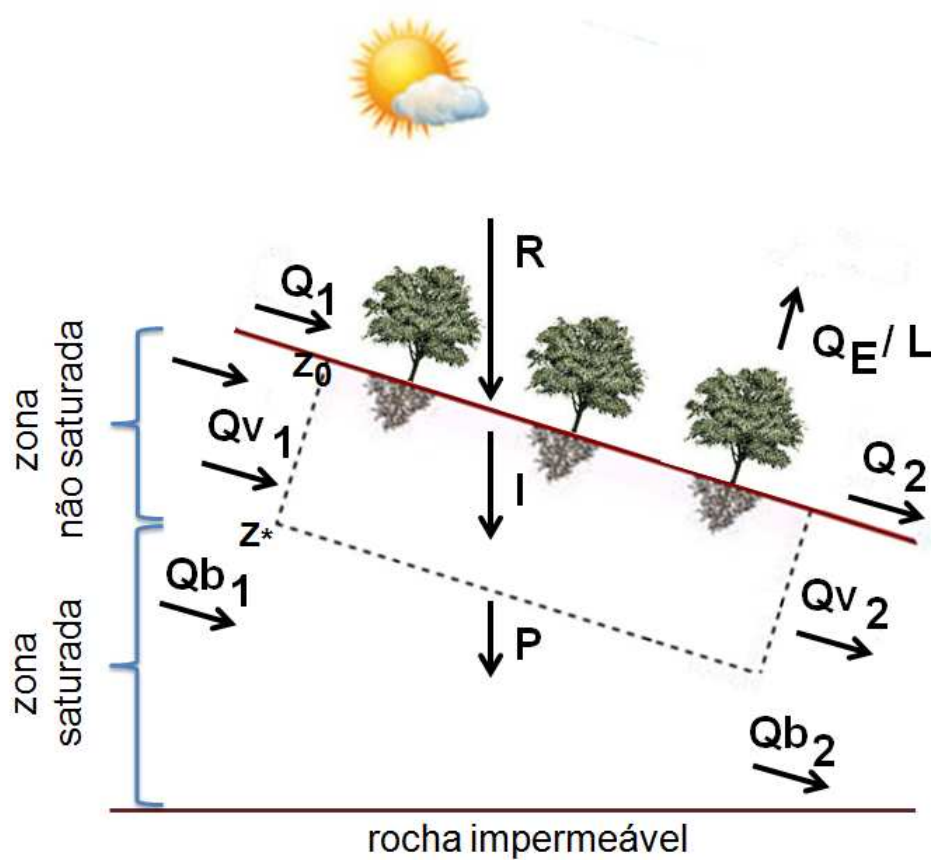


Figura 2.2: Termos do balanço de água no solo. Ilustração baseada em Brutsaert (2005)[10]

Para representar os criadouros urbanos, propõe-se neste trabalho o uso de um **modelo de reservatório linear** (LRM). A base teórica do modelo de reservatório linear com aplicações ao transporte de água superficial em hidrometeorologia foi definida por Nasch (1959) [41]. Vide Beven (2001) [11], para uma revisão (até 2011) das simulações baseadas no LRM, para roteamento em modelos distribuídos aplicando similaridade hidrológica sobre terrenos complexos.

O LRM tem sido empregado para simulações de processos hidrológicos nas zonas das raízes e na zona saturada do solo, sob diferentes condições de hidrometeorológicas e topográficas. Em geral, simplifica-se, tomando-se apenas dois reservatórios em série ou em paralelo, para representar o problema chuva-vazão (*rainfall-runoff*). Uma vez acoplados, em série ou em paralelo, e com diferentes tempo de resposta hidrológica, resulta-se na solução numérica do problema chuva-vazão. Etapas de calibração podem ser realizadas. A bibliografia sobre a eficiência dos modelos hidrológicos é considerada extensa (2012). Os métodos de validação de modelos hidrológicos devem incluir: (1) métodos para maximização da eficiência na janela de dados, (2) redução da incerteza do modelo com filtragem de Kalman 3D e 4D, (3) otimização por desvios quadraticos ótimos quando da aplicação do método de mínimos quadrados (ou análise variacional), (4) focalização por ajuste dos parâmetros (*parameter tuning*) por força bruta (*GLUE method*) (Beven, 2001) [11], (5) por regressão linear sobre quantis (*quantil linear regression*), (6) por regressão linear sobre os desvios absolutos, etc.

De forma similar às simulações de processos hidrológicos de superfície e sub-superfície, para os criadouros superficiais, considerou-se a variação do volume de água no tempo, dado o fluxo de água de entrada observado (precipitação atmosférica). Por hipótese, considera-se os locais propícios ao predomínio de desenvolvimento dos mosquitos na fase aquática àqueles sujeitos à precipitação. Deste ponto de vista, toda a RMRJ é propícia ao desenvolvimento aquático do *Aedes aegypti*, sobretudo em condições atmosféricas com uma sucessões de períodos chuvosos (quando os criadoutos se reabastecem), que se alternam com períodos quentes (criadouros perdem água por evaporação).

De acordo com Piovezan (2009) [42], os criadouros predominantes para o desenvolvimento do mosquito em sua fase aquática são apresentados em três tipos: (1) composto por pratos e vasos de plantas, (2) composto por latas, potes e frascos e (3) outros tipos de criadouros removíveis. Além disto, alguns pesquisadores (do SUS, Ministério da Saúde, FIOCRUZ, Defesa Civil, etc) indicam que reservatórios internos e externos às casas também podem servir como criadouros. Por exemplo, citam-se os reservatórios de degelo automático abaixo das geladeiras autolimpantes, caixas-de-água abertas, valas de resfriamento de ar e água em prédios construídos até 1970, piscinas abandonadas, grandes latas, pneus, vasos para flores e plantas em cemitérios, os chamados lixões, etc.

Para implementação do modelo de reservatório linear neste trabalho, define-se sua entrada (de água), a partir da assimilação de dados de chuva observada entre 2000 e 2010, e a perda de água por evaporação e vazamentos. A perda é parametrizada pelo método de evapotranspiração potencial de Penman, calculado a partir da assimilação de dados atmosféricos parametrizados de irradiância líquida e da definição simplificada do balanço de energia superficial. O LRM usado neste trabalho requer um pequeno número de parâmetros: (1) escala de tempo de resposta do reservatório e (2) a razão de perda média por vazamento, (3) área horizontal superficial exposta à chuva, (4) volume máximo do reservatório (Fig. 2.3).

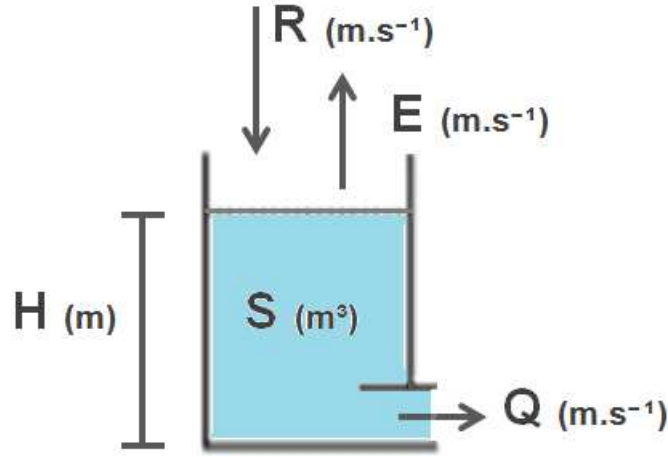
Sendo, a escala de tempo ( $t$ ), exposta em segundos,  $s^{-1}$ ,  $H$  a área horizontal superficial ou altura do reservatório,  $Q$  a razão de perda média por vazamento ou vazão e  $S$  o volume do reservatório, que é função da a precipitação  $R$  e da evapotranspiração  $E$ .

Para obter-se a equação diferencial do LRM, usada neste trabalho, a derivação proposta por Nasch (1959) [41] e Beven (2001) [11] foi utilizada, conforme apresentada a seguir.

Primeiro, define-se a equação diferencial que controla a evolução temporal do armazenamento do reservatório linear (RL) superficial, expressa pela seguinte equação,

$$\frac{1}{A} \frac{dS}{dt} = U - Q \quad (2.7)$$

Sendo  $U$  igual a precipitação efetiva, expressa por:



**Figura 2.3:** Esquema ilustrativo do reservatório linear de água. Ilustração baseada em Beven (2001) [11].

$$U = R - E \quad (2.8)$$

O termo do lado esquerdo desta equação,  $dS/dt$ , representa a derivada temporal local do armazenamento do RL, sendo  $S$  o volume presente no RL,  $t$  a escala de tempo necessária para o reservatório esvaziar  $1/e$  de seu valor inicial  $S_0 = S(t_0)$ ,  $R$  o fluxo volumétrico de entrada em  $m.s^{-1}$  correspondente à *precipitação efetiva* observada.

Considera-se  $R$  como a precipitação efetiva igual a diferença entre a taxa de precipitação à superfície e a taxa de evaporação potencial  $ETP$ .

Devido a forma linear da equação característica da Eq. 2.7 escreve-se

$$Q = \frac{S}{R} \quad (2.9)$$

Assim, após substituição de  $dS$  na Eq. 2.7, obtém-se:

$$T \frac{dQ}{dt} = R - Q \quad (2.10)$$

O modelo do reservatório linear, descrito por Beven (2001) [11], é baseado na equação do balanço de massa para o armazenamento linear,  $S$ , em unidades de  $L^3$ , que coleta e concentra a precipitação efetiva da superfície,  $R$ , também em unidades de  $L^3T^{-1}$ .

O LRM implementado é similar ao modelo físico de um balde cilíndrico, com um furo de diâmetro específico no fundo. O furo permite o escoamento da água acumulada de forma limitada dado que supõe-se um vazão  $Q$ , em unidades de  $L^3t^{-1}$ , sujeita a uma escala de tempo de esvaziamento constante,  $T$ , um parâmetro do LRM, em unidades  $T^{-1}$ .

Para obter-se a solução analítica do LRM faz-se o seguinte. Toma-se o reservatório vazio no instante inicial,  $t_0$ . Supõe-se que em  $t_0$  ocorra um evento de precipitação repentina e instantânea de intensidade  $R$ . Desta forma escreve-se  $R\delta(t - t_0)$ , sendo  $\delta(t - t_0)$  a função direta do LRM. Nestas condições, a solução da equação diferencial é expressa por:

$$Q_t = Q_0 \exp\left[-\frac{(t - t_0)}{T}\right] + R \exp\left[\frac{(t - t_0)}{T}\right] \quad (2.11)$$

A resposta do reservatório (vazão),  $Q_t$ , agora é dada por uma **função de transferência de armazenamento linear**. A solução é uma função (analítica) do tempo e implica no aumento de  $S$  (e da vazão  $Q$ ) nos instantes iniciais, seguida por uma diminuição exponencial após atingir-se o máximo, em uma escala de tempo  $T$ .

Nash (1959) [41], aplica o conceito de reservatório linear para fundamentar fisicamente um modelo de transferência de água em uma bacia hidrográfica composta por múltiplos reservatórios lineares, arrançados em série, na chamada (*castata de Nash*).

Nash propõe igualdade das relações de armazenamento linear dos reservatórios, isto é  $dS = KdQ$ , com o parâmetro  $K$  invariante. O parâmetro  $K$  equivale à *escala de tempo do reservatório linear*. Por sua vez, a escala de tempo é proporcional ao tempo de concentração médio ou tempo de atraso médio.

A equação da continuidade pode ser combinada com a relação de armazenamento linear,  $K$ . Assim, resulta na seguinte expressão

$$I - Q = \frac{dS}{dt} = K \frac{dQ}{dt} \quad (2.12)$$

ou

$$Q + K \frac{dQ}{dt} = I \quad (2.13)$$

Multiplica-se ambos os lados da Eq. 2.13 por  $e^{(t-t_0)/K}$  para reescrever-se a equação diferencial como,

$$\frac{d}{dt}(Qe^{(t-t_0)/K}) = \frac{I}{K}e^{(t-t_0)/K} \quad (2.14)$$

ou

$$Qe^{(t-t_0)/K} = \frac{1}{K} \int (e^{(t-t_0)/K}) dt + C_1 \quad (2.15)$$

Seja uma precipitação repentina e instantânea em  $t_0$  efetivamente capaz de reabastecer o reservatório com um **volume unitário** ( $S = 1$ ). Nesta condição resulta,

$$Q = e^{-(t-t_0)/K} \left[ \frac{1}{K} \int e^{(t-t_0)/K} \delta(0) dt + C_1 \right] \quad (2.16)$$

ou

$$Q = \frac{1}{K} (e^{-(t-t_0)/K}), (t - t_0) > 0 \quad (2.17)$$

A integral é igual a *Transformada de Laplace* da *função Delta de Dirac*, isto é  $L(\delta)$ . Assim,  $S = 1$  no tempo inicial  $t = t_0 = 0$ . Portanto,

$$L(\delta(0)) = \int \delta(0) e^{-p(t-t_0)} dt = e^{p0} = 1 \quad (2.18)$$

Esta solução estabelece a função resposta do reservatório linear ao pulso unitário de entrada. A função resposta mostra aumento de  $S$  até um máximo, seguido por decrescimento exponencial. O máximo ocorre na escala de tempo  $K$ .

No caso de dois reservatórios lineares em série, o fluxo de saída do primeiro reservatório fluirá para entrada do segundo, e o mesmo se dará para um número maior de reservatórios lineares em série.

No caso de somente dois reservatórios em série,  $R^{(2)} = Q^{(1)}$ , obtém-se:

$$Q_1 - Q_2 = K \frac{dQ_2}{dt} \quad (2.19)$$

cuja solução é igual a:

$$Q_2 = \frac{1}{K} \left( \frac{t}{K} \right) e^{-t/K} \quad (2.20)$$

Para o  $n$ -ésimo reservatório linear em série, a equação correspondente foi obtida por Nasch (1959) [41]. Nas condições de obtenção do *Hidrograma Unitário Instantâneo* (HUI) a solução é identificada com a função densidade de probabilidade (f.d.p.) de uma distribuição de probabilidade gama. Escreve-se  $Q_n$  como

$$Q_n = \frac{1}{K\Gamma(n)} \left( \frac{(t - t_0)}{K} \right)^{n-1} e^{-(t-t_0)/K} \quad (2.21)$$

Quanto maior o número de reservatórios maior o atraso do máximo da vazão em relação ao instante do evento unitário. Devido às propriedades da função de distribuição gama, o HUI pode facilmente ser escalado pelo parâmetro  $\beta$  da f.d.p. Gama (Wilks, 2006 [43]; Press *et al.*, 1989 [44]).

### Solução numérica da EDP para criadouros

No presente trabalho, a condição física média dos criadouros do *Aedes aegypti* é representada por um modelo de reservatório linear. A solução numérica da EDP correspondente à dinâmica do reservatório linear é obtida por aplicação do método de diferenças finitas, esquema implícito, atrasado.

Considera-se as seguintes etapas para a implementação do *modelo de reservatório linear* e do *modelo de doença infecciosa*:

- i) Assimilação dos dados atmosféricos observados na vizinhança  $\pm \Delta t$  do tempo de integração  $t$ , por relaxação newtoniana, a cada passo de tempo. Caso não exista observação nova dentro da vizinhança, o último valor observado é assimilado, por persistência. Os dados observados assimilados têm frequência nominal horária. A escala média de tempo da assimilação é de 2 *h*.
- ii) Cálculo do balanço de radiação da superfície;
- iii) Cálculo do balanço de energia da superfície;
- iv) Cálculo do fluxo de calor latente da superfície e da evapotranspiração potencial associada (método de Penman);
- v) Cálculo do fluxo de calor sensível da superfície como resíduo do balanço de energia;
- vi) Prognóstico das variáveis do reservatório linear;
- vii) Diagnóstico dos parâmetros entomológicos e de reprodutibilidade do *Aedes aegypti* na fase aquosa;
- viii) Prognóstico da dinâmica populacional com modelo da doença infecciosa (dengue).

#### 2.3.2 Evapotranspiração potencial pelo método de combinação de Penman

Uma vez que os reservatórios de água dos criadouros urbanos servem como instrumento para análise da fase aquática do mosquito, foi considerada a análise da quantidade de precipitação e da umidade relativa, a fim de quantificar e qualificar a sensibilidade desses parâmetros meteorológicos com as dinâmicas populacionais do modelo.

Para tanto, a evapotranspiração (ET) foi considerada nesse estudo por ser uma variável de extrema importância para a modelagem hidrológica, dependendo tanto da disponibilidade de energia quanto do déficit de saturação de vapor de água da superfície e da Camada Limite Superficial (CLS)

Daí a necessidade de considerar-se ambos os balanços de energia e de água na determinação da ET, como amplamente estabelecido na literatura (Penman, 1948 [45]; Thom e Oliver, 1977 [46]; Monteith e Unsworth, 2007 [47]).

Um método apropriado que combina os métodos de balanço de energia e aerodinâmico (função do déficit de vapor de água em relação à saturação) foi proposto por Penman (1948)[45], no qual a ET ocorre sobre uma superfície sem déficit hídrico. Posteriormente, Monteith (vide por exemplo,

Monteith e Unsworth, 2007 [47]) realizou a generalização da combinação para incluir o controle fisiológico da perda de vapor por estômatos espalhados nas folhas vegetais. Uma revisão em português dos métodos de Penman e Penman-Monteith encontra-se em Karam e Pereira Filho (2006)[48].

Alguns pesquisadores tem definido a evapotranspiração como a perda de água de uma superfície com qualquer tipo de vegetação e sob qualquer condição de umidade do solo (por exemplo, Borges (2005) [49]. Entretanto, considera-se que uma definição mais apropriada da evapotranspiração deve incluir explicitamente a dependência das condições atmosféricas e energéticas, como indicado por Brutsaert (2005)[10]).

Vepraskas *et al.* (2006) [50] mencionam que os erros na estimativa da evapotranspiração são críticos para os modelos hidrológicos.

A evapotranspiração pode ser obtida por método direto ou estimada por métodos indiretos. Em micrometeorologia, os fluxos turbulentos na CLS são obtidos diretamente pelo *método de correlação* das flutuações turbulentas em torno da média temporal (*Eddy Correlation method*). Neste caso, dispõe-se de observações contínuas de alta frequência de amostragem (entre 1 a 100 Hz).

Estimativas por métodos indiretos também são empregadas quando somente se dispõe dados observados em baixa frequência de amostragem (tipicamente horária). Neste caso, métodos aerodinâmico ou do perfil, energéticos (BREB, *Bowen ratio energy balance method*) ou métodos bulk (similares à lei de Ohm) são indicados.

Para aplicação do método das correlações faz-se necessário a instalação de instrumental e facilidades micrometeorológicas, como o arranjo dos instrumentos ao longo de um torre micrometeorológica de uma ou mais dezenas de metros. Para uma apresentação básica destas facilidades micrometeorológicas vide, por exemplo, Oke (1987)[9] e Marques Filho *et al.* (2008)[51].

O método de combinação de Penman-Monteith foi desenvolvido por Monteith para calcular a evapotranspiração sobre superfícies vegetadas. Vide Monteith e Unsworth (2007) [47] e Oke (1987)[9] para revisões detalhadas.

O método calcula o fluxo de vapor de água através das folhas de vegetação, as quais apresentam estômatos que abrem e fecham controlando fisiologicamente a troca de gases entre o interior das folhas vegetais e atmosfera (Allen *et al.*,1998)[52].

A evapotranspiração de PM é sempre menor ou igual à evapotranspiração potencial de Penman.

De acordo com Grimmond e Oke (2002)[53], as formulações de Penman (P) e PM também podem ser modificadas para representar os fluxos de superfícies urbanas em modelos numéricos, descrevendo *resistência superficial* não somente em termos da *resistência estomática*, controlada pelos estômatos localizados nas folhas da vegetação, mas também pelo número, dimensão e tipo de reservatórios de água superficiais e outras fontes de vapor urbanos, por exemplo, transpiração animal, cocção de alimentos, combustão de álcool etílico em carros, etc.

Penman (1948)[45] em sua derivação considera simultaneamente os efeitos do saldo do balanço de energia (BREB) e o método aerodinâmico (AERO). A combinação do BREB e AERO utiliza a linearização da temperatura pela curva de equilíbrio da concentração de vapor de água. A evapotranspiração advectiva associada à diferença de vapor da superfície e do ar pode assim ser expressa pelo déficit de saturação de pressão de vapor em relação ao seu valor de equilíbrio.

A diferença de concentração de vapor é expressa por  $(\rho_{v0}^* - \rho_{va})$ .

Uma expansão em série de Taylor apresenta dois termos, o primeiro corresponde à diferença entre a densidade de vapor de saturação da superfície na temperatura  $T_0$  e a do ar  $T_a$ , e o segundo corresponde ao déficit da densidade de vapor do ar ( $vdd_a$ ). Resulta,

$$(\rho_{v0}^* - \rho_{va}) \approx s(T_0 - T_a) + vdd_a \quad (2.22)$$

Toma-se uma fórmula aerodinâmica (*bulk*), similar a *lei de Ohm*, para a resistência elétrica, para escrever-se fluxo de calor latente turbulento, estabelecido entre uma superfície saturada e o ar sobre ele não saturado. Obtém-se

$$Q_E = L_v(\rho_{v0}^* - \rho_{va})/r_{aV} \quad (2.23)$$



sendo  $r_{aV}$  a resistência aerodinâmica ao transporte de vapor de água. Substitui-se 2.22 em 2.23 para escrever

$$Q_E = [L_v s(T_0 - T_a) + L_v \cdot vdd_a]/r_{aV} \quad (2.24)$$

Toma-se uma expressão aerodinâmica similar para a densidade de fluxo de calor sensível. Isto é

$$Q_H = C_a(T_0 - T_a)/r_{aH} \quad (2.25)$$

Substitui-se 2.25 em 2.24 e expressa-se o fluxo de calor latente da seguinte forma

$$Q_E = \frac{L_v s Q_H r_{aH}}{C_a r_{aV}} + \frac{L_v \cdot vdd_a}{r_{aV}} \quad (2.26)$$

Do balanço de energia da superfície  $Q_H = Q^* - Q_G - Q_E$ , e da constante psicrométrica  $\gamma = C_a/L_v$  e dada as condições de similaridade na CLS, tem-se  $r_{aH}$  e  $r_{aV}$ . Portanto,

$$Q_E = \frac{s}{\gamma}(Q^* - Q_G - Q_E) + \frac{C_a \cdot vdd_a/r_{aH}}{\gamma} \quad (2.27)$$

Os termo podem ser arranjados para obter a formulação de combinação abaixo:

$$Q_E = \frac{s}{s + \gamma}(Q^* - Q_G) + \frac{C_a \cdot vdd_a/r_{aH}}{s + \gamma} \quad (2.28)$$

A Eq. 2.28 corresponde ao método de combinação de Penman (1948) [45]. A equação resultante apresenta dois termos. O primeiro associado à energia disponível para evaporação, também dependente da temperatura. O segundo é conhecido por termo de advecção ou de déficit de vapor, associado às condições aerodinâmicas da superfície.

### 2.3.3 Evapotranspiração pelo método de combinação de Penman-Monteith

Muitas superfícies são apenas parcialmente saturadas. neste caso, faz-se necessário modificar 2.24 para introduzir o déficit de densidade de vapor como  $vdd_o = (\rho_{v0}^* - \rho_{va})$ . Logo, obtém-se:

$$Q_E = \frac{s(Q^* - Q_G) + [C_a(vdd_a - vdd_o)]/r_{aH}}{s + \gamma} \quad (2.29)$$

Depois de simplificação obtém-se

$$(s + \gamma) + C_a \cdot vdd_o/(r_{aH} Q_E) = [s(Q^* - Q_G) + C_a \cdot vdd_a/r_{aH}]/Q_E \quad (2.30)$$

A resistência apropriada para transferência de vapor entre a superfície das folhas do dossel vegetal e a atmosfera adjacente, denominada resistência estomática (ou superficial)  $r_c$  pode ser expressa por

$$r_c = L_v(vdd_o)/Q_E \quad (2.31)$$

Ao se colocar o déficit de densidade de vapor na superfície  $vdd_o$  em evidência em 2.31 e ao substituir em 2.30, encontra-se:

$$(s + \gamma) + \frac{C_a r_c}{L_v r_{aH}} = [s(Q^* - Q_G) + C_a \cdot vdd_a/r_{aH}]/Q_E \quad (2.32)$$

nesta equação  $\gamma = C_a/L_v$  é a constante psicrométrica.

Substitui-se  $C_a/L_v$  em 2.32 para se obter

$$Q_E = s(Q^* - Q_G) + C_a \cdot vdd_a/r_{aH} - (s + \gamma) + \gamma(r_c/r_{aH}) \quad (2.33)$$

Portanto, a Eq. 2.33 expressa o método de combinação de Penman-Monteith, cuja forma mais comum é expressa por

$$Q_E = \frac{s}{s + \gamma} \left[ \frac{(Q^* - Q_G) + C_a \cdot v d d_a / r_{aH}}{1 + r_c / r_{aH}} \right] \quad (2.34)$$

Agora, o termo advectivo também é controlado pela fisiologia vegetal, limitando a evapotranspiração a valores menores ou iguais à evapotranspiração potencial de Penman. Entretanto, dosseis vegetais apresentam Índices de Área Foliar (IAF) maior que um, isto implica em um fator multiplicativo do fluxo resultante de cada metros quadrado de área de vegetação. Tipicamente florestas tropicais chuvosas apresentam valores altos de  $IAF$ , por exemplo  $IAF \approx 7$ . Daí resulta que a evapotranspiração real (estimada por penamn-Monteith) pode ser maior que a correspondente evapotranspiração potencial de Penman.

Outros detalhes da derivação da combinação de Penman-Monteith podem ser encontrados em Monteith e Unsworth (2007)[47], Oke (1987)[9] e Karam e Pereira Filho (2006)[48].

## 2.4 Modelo de dinâmica de população

Neste trabalho, foi implementado um modelo de doença infecciosa baseado em um sistema de equações diferenciais parciais não-lineares correspondente à evolução temporal da dinâmica das populações durante os ciclos epidêmicos de Dengue. Tal implementação numérica foi feita em linguagem Fortran-90 e a forma final do sistema apresentou um número maior de equações em relação ao encontrado na literatura. Modelos anteriores para a dengue (Ferreira e Yang, 2003 [17]) não consideram:

1. a assimilação de dados atmosféricos observados;
2. o papel da precipitação e
3. os efeitos da retroalimentação associados à reinfecção.

Os dados atmosféricos ( $T$ ,  $p$ ,  $q$ ,  $UR\%$ ,  $OC \downarrow$  direta e difusa, e a taxa de precipitação  $R$ , foram preparados e formatados como arquivos XYZ.DAT para assimilação 4D por relaxação newtoniana (*nudging*).

O sistema de equações foi dividido em três reservatórios populacionais que, por sua vez, foram subdivididos em compartimentos (ou caixas). Os grandes compartimentos são:

1. compartimento da população de vírus, subdividida em quatro sorotipos: DENV-1, DENV-2, DENV-3 e DENV-4;
2. compartimento da população do vetor *Aedes aegypti*, subdividida em seis compartimentos: ovo, larva, pupa e mosquito W1-susceptíveis, mosquito W2-expostos e mosquito W3-infectantes; e
3. compartimento da população humana, dividida em seis compartimentos: susceptíveis, expostos (latentes), infectados-infectantes, recuperados, reinfectedos infectantes e mortos.

As variáveis prognósticas são frações relativas das populações totais. Portanto, a unidade representa toda a população sob pandemia.

O modelamento proposto neste trabalho apresenta inovações associadas à implementação de retroalimentação associada à reinfecção, a inclusão da modelagem da dinâmica dos sorotipos de vírus, e quanto à assimilação 4D dos dados atmosféricos observados.

### 2.4.1 Dinâmica de população do vírus

Com as considerações acima, a dinâmica de transmissão da dengue, para a população de vírus, é modelada a partir das equações dispostas em 2.35:

$$\begin{cases} Den_k(t) = Den_k(0) + a(i - i_0) + b(i_r - i_r^0)\delta_k \\ Se\ i_0, i_r^0 = 0, \quad Den_k(0) = 0 \Rightarrow Den_k(t) = (ai + bi_r)\delta_k \end{cases} \quad (2.35)$$

sendo  $Den_k$  o número de vírus da dengue em relação ao total, para o sorotipo  $k$ ,  $a$  e  $b$  são parâmetros empíricos (correlações entre o número de vírus e o número de infectados e infectados) e  $\delta_k$  uma constante para normalização, que representa a taxa de crescimento líquido do vírus em função do sorotipo. Neste trabalho, supõe-se que se encontram  $10^4$  vírus em cada indivíduo humano infectado. Aplicam-se neste caso,  $a = 10^4$  e  $b = 10^4$ .

$$\begin{cases} Se\ \exists\ sorotipo\ \forall\ k \rightarrow \delta_k = 1 \\ Se\ \sim\ \exists\ sorotipo\ k \rightarrow \delta_k = 0 \end{cases} \quad (2.36)$$

Associada a forma integral da Eq. 2.35 propõe-se uma correspondência com a seguinte forma:

$$\begin{cases} \frac{\delta}{\delta t} Den_k(t) = \left( a \frac{\delta i}{\delta t} + b \frac{\delta i_r}{\delta t} \right) \delta_k & (I) \\ Den_k(t) = Den_k(t - \Delta t) + \left( \frac{\Delta Den_k(t)}{\Delta t} \right) \Delta t & (II) \end{cases} \quad (2.37)$$

Sendo 2.37-I a Eq. diferencial e 2.37-II a Eq. algébrica.

Ambas representações da equação prognóstica da população de vírus da dengue, visam representar o processo da dinâmica populacional do vírus.

A hipótese usada aqui para o modelamento da população de vírus é a existência de uma correlação linear entre a população de vírus e a população humana infectada e reinfectada, considerados diretamente proporcionais.

### 2.4.2 Modelos de Malthus e Verhulst

Do ponto de vista teórico, a dinâmica de uma população infectada por vírus pode ser fundamentada pelos trabalhos pioneiros de Malthus (1798) [54] e Verhulst (1845) [55].

O *modelo de Malthus* (1798) [54] é um dos conhecidos e aplicados para descrever a dinâmica populacional sob efeito de epidemias de algumas espécies de vírus.

A forma integral do modelo de Malthus corresponde a uma função exponencial, que é a solução de uma equação diferencial de primeira-ordem (Pingle, 2003 [56] e Sodr e, 2007 [57]). A forma diferencial do modelo de Malthus apresenta a seguinte forma,

$$\frac{dN}{dt} = rN(t) \quad (2.38)$$

sendo  $dN/dt$  a taxa de variação da população relativa e  $r$  taxa de crescimento da população obtida como

$$r = 1 + \alpha \quad (2.39)$$

sendo  $\alpha$  a taxa de crescimento média da população dada por

$$\alpha = \left( \frac{N_t}{N_0} \right)^{\frac{1}{t}} - 1 \quad (2.40)$$

Considera-se que  $N_t$  é o número de indivíduos da população no tempo  $t$  e que  $N_0$  é o número de indivíduos infectados da população inicial. Desde que

$$N(t) = N_0 e^{rt} \quad (2.41)$$

ou seja, uma função de derivada positiva, o modelo de Malthus não apresentará limites quanto ao número de indivíduos infectados. Por este motivo, a aplicação direta do modelo Malthus não é recomendada para descrever a dinâmica de qualquer população, mas somente para aquelas nas quais o desenvolvimento observado apresenta-se exponencial, considerado um intervalo de tempo particular.

Já o *modelo de Verhulst* (1845) [55], também conhecido por *modelo logístico*, supõe que a fração da população infectada possa crescer somente até certo limite máximo, isto é, o número de indivíduos infectados tende a se estabilizar numa determinada escala de tempo, dada uma certa infecção. A estabilidade da população está relacionada com a capacidade de suporte do ambiente em que esta população vive.

Considerando hipótese similar a de Malthus, Verhulst supõe que a variação temporal do número de indivíduos infectados seja proporcional à própria população, e acrescenta a hipótese de que a taxa de variação da população deveria ser proporcional à fração da população ainda não infectada até o instante  $t$ .

Com estas hipótese, a forma diferencial do modelo de Verhulst pode ser expressa por (Sodré (2007) [57])

$$\frac{dN}{dt} = rN(t)\left(1 - \frac{N(t)}{L}\right)N(t) \quad (2.42)$$

A Eq. 2.42 é uma EDP não-linear porque a variável de estado  $N = N(t)$  aparece com um expoente diferente de um. A reta  $N(t) = L$  é a assíntota para a curva sigmóidal, sendo que  $L$  representa a capacidade máxima do suporte ambiental, também uma função do tempo,  $f(t)$ . A equação apresenta uma dependência linear em relação à chamada *taxa intrínseca de crescimento*, definida por

$$r = n - m \quad (2.43)$$

na qual  $n$  é a taxa de natalidade e  $m$  a taxa de mortalidade da população.

Ao analisar-se os valores de  $\mathbf{k}$ , em função de  $N$ , para  $N^{n+1} = LN^n$ , obtém-se:

- Se  $N \lll k \Rightarrow \frac{dN}{dt}(t) = rN(t)(1 - \delta) \cong rN(t), \delta > 0$ , ocorre aumento do número de indivíduos infectados;
- Se  $N \cong k \Rightarrow \frac{dN}{dt}(t) = rN(t)(1 - 1) = 0, \frac{dN}{dt}(t) = 0$ , número de indivíduos infectados estacionário; e
- Se  $N \ggg k \Rightarrow \frac{dN}{dt}(t) = rN(t)(1 + \delta), \frac{dN}{dt}(t) < 0, \delta > 0$ , ocorre redução do número de indivíduos infectados.

### 2.4.3 Dinâmica da população do vetor *Aedes aegypti*

A população de mosquitos é descrita a partir do sistema de equações diferenciais acopladas (Eq. 2.44), para a dinâmica da população relativa do *Aedes aegypti* nas fases aquática e alada. O sistema acoplado permite representar as interrelações entre as diferentes fases, nas quais os estágios da metamorfose se relacionam entre si através dos estágios anteriores e posteriores a um determinado compartimento.

Uma representação do sistema de EDP considera compartimentos populacionais na forma de caixas correspondentes aos estágios sucessivos de ovos (E), larvas (L), pupas (P) e fase alada do mosquito, este subdividido em três estágios quanto à viremia do vetor: ( $W1, W2, W3$ ), respectivamente, mosquitos expostos, infectados e infectantes.

As equações dependem de parâmetros entomológicos (do inseto) e ambientais.

Os parâmetros entomológicos estabelecem em função da temperatura e da disponibilidade de água. Entre os parâmetros dependentes das variáveis atmosféricas em cada estágio sucessivo da metamorfose tem-se:

1. as taxas de natalidade da população relativa
2. as taxas de mortalidade dos mosquitos fêmeas,  $\mu_w$ ;
3. o período de incubação extrínseca do vírus no mosquito,  $\gamma^{-1}$ .

O sistema de EDP correspondente ao modelo proposto para dinâmica populacional para o mosquito vetor *Aedes aegypti* para os episódios epidêmicos de Dengue é expresso como uma função dependente do tempo  $t$  e de parâmetros diversos, em unidades de  $dia^{-1}$ , a partir da Eq. 2.44:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dE}{dt}(t) = \phi W(t) - (\varphi + \mu_e)E(t) \\ \frac{dL}{dt}(t) = \varphi E(t) - (\delta + \mu_l)L(t) \\ \frac{dP}{dt}(t) = \delta L(t) - (\sigma + \mu_p)P(t) \\ \frac{dW_1}{dt}(t) = \sigma P(t) - [\beta_w i(t) + \mu_w]W_1(t) \\ \frac{dW_2}{dt}(t) = \beta_w i(t)W_1(t) - (\gamma + \mu_w)W_2(t) \\ \frac{dW_3}{dt}(t) = \gamma W_2(t) - \mu_w W_3(t) \end{array} \right. \quad (2.44)$$

Sendo que:

( $E$ ) representa o compartimento de ovos, que é função da ovoposição,  $\phi$ , e da capacidade suporte do criadouro de ovos ( $\varphi + \mu_e$ ) que, por sua vez é função da eclosão, ou seja, transformação de ovos em larvas, em  $dia^{-1}$ ,  $\varphi$ , e da taxa de mortalidade de ovos,  $\mu_e$ .

( $L$ ) representa o compartimento de larvas, que é função da eclosão,  $\varphi$ , e da capacidade suporte do criadouro de larvas ( $\delta + \mu_l$ ) que, por sua vez é função da pupação, ou seja, transformação de larvas em pupas, em  $dia^{-1}$ ,  $\delta$ , e da taxa de mortalidade de larvas,  $\mu_l$ .

( $P$ ) representa o compartimento de pupas, que é função da pupação,  $\delta$ , e da capacidade suporte do criadouro de pupas ( $\sigma + \mu_p$ ) que, por sua vez é função da taxa de transformação pupas em voadores expostos ( $W_1$ ), em  $dia^{-1}$ ,  $\sigma$ , e da taxa de mortalidade de pupas,  $\mu_p$ .

( $W_1$ ) representa o número relativo de indivíduos de *Aedes aegypti* no estágio de voadores não-infectados (ou estágio  $W_1$  da fase alada), variável prognóstica em função do tempo, em  $dia^{-1}$ , e dos seguintes parâmetros entomológicos:

- $\sigma$ , a taxa de transformação de pupas para  $W_1$ , em  $dia^{-1}$ ;
- $[\beta_w i(t) + \mu_w]$ , a capacidade total de criadouros (reservatórios) de  $W_1$ ,
- $\beta_w i(t)$ , a taxa de transformação de  $W_1$  para  $W_2$  (mosquitos infectados, porém não-infectantes), em  $dia^{-1}$ ; e

- $\mu_w$ , a taxa de mortalidade de mosquitos fêmeas adultas, para o estágio  $W_1$ , em  $dia^{-1}$ .

( $W_2$ ) representa o número relativo de indivíduos de *Aedes aegypti* no estágio de voadores infectados não-infectantes (ou estágio  $W_2$  da fase alada), variável prognóstica em função do tempo, em  $dia^{-1}$ , e dos seguintes parâmetros entomológicos:

- $\beta_w i(t)$ , a taxa de transformação de  $W_1$  para  $W_2$ , em  $dia^{-1}$
- $(\gamma + \mu_w)$ , a capacidade total de criadouros (reservatórios) de  $W_2$
- $\gamma$ , a taxa de transformação de  $W_2$  para  $W_3$  (mosquitos infectantes, também conhecido como maduros), em  $dia^{-1}$ ; e
- $\mu_w$ , a taxa de mortalidade de mosquitos fêmeas adultas, para o estágio  $W_2$  em  $dia^{-1}$ .

( $W_3$ ) representa o número relativo de indivíduos de *Aedes aegypti* no estágio de voadores infectantes (ou estágio  $W_3$  da fase alada), variável prognóstica em função do tempo, em  $dia^{-1}$ , e dos seguintes parâmetros entomológicos:

- $\gamma$ , a taxa de transformação de  $W_2$  para  $W_3$ ; e
- $\mu_w$ , a taxa de mortalidade de mosquitos fêmeas adultas, para o estágio  $W_3$ , em  $dia^{-1}$ .

Considera-se que:

$$\phi = \frac{1}{3}\phi_{max} \left[ 1 - \min \left( \frac{L}{C_l}; 1 \right) \right] \quad (2.45)$$

Onde  $\phi$  representa a taxa de ovoposição, que foi parametrizada em função da ovoposição máxima  $\phi_{max}$ , do compartimento de larvas  $L$ , bem como, da disponibilidade máxima do reservatório para receber os criadouros de larvas  $C_l$ .

sendo:

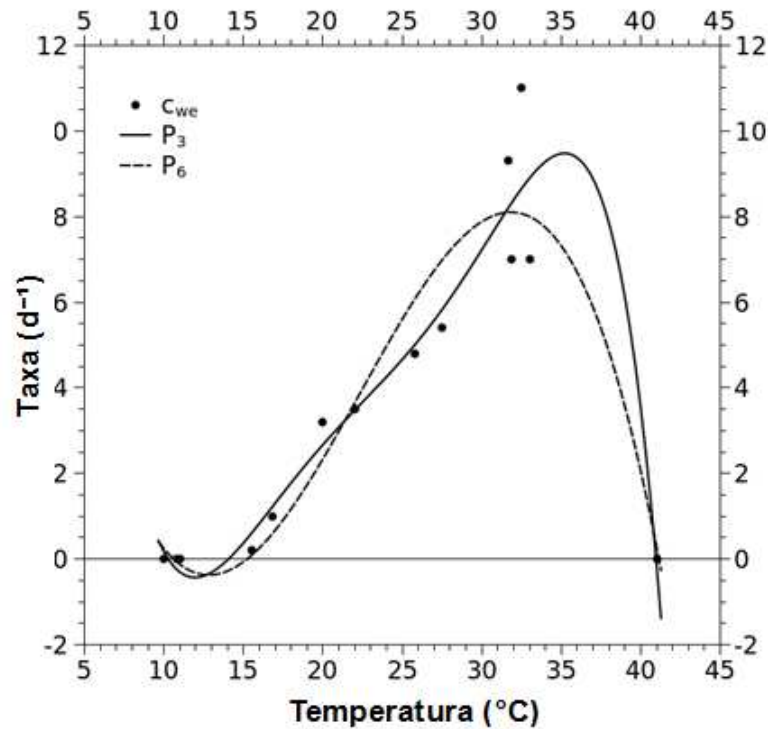
$$C_l = \frac{V_{C_l}}{V_{min} \times larva^{-1}} = \frac{V_{C_l}(m^3)}{7,5 \times 10^{-6}(m^3)} \quad (2.46)$$

Na Eq. 2.46,  $C_l$  representa um reservatório do criadouro de larvas típico, sendo  $V_{C_l}$  o volume de água do criadouro e  $V_{min} \times larva^{-1}$  o volume de água mínimo para a manutenção de uma larva no criadouro. O valor de  $7,5 \times 10^{-6}m^3$  foi definido a partir de ensaios numéricos. O efeito do volume de água nos criadouros simulados é que, se há muitas larvas no reservatório acima do valor considerado sustentável (por exemplo, entre 40 a 60 larvas para 1 litro de água), o valor da taxa de ovoposição,  $\phi$ , se torna muito pequeno (próximo de zero). Conseqüentemente, as larvas eclodidas não poderão sobreviver à competição por alimento e espaço. Assim, a interrupção do ciclo do *Aedes aegypti* pode ser emulada pela simulação.

#### 2.4.4 Parâmetros entomológicos

Yang *et al.* (2009)[12] parametrizaram as taxas de natalidade, metamorfose e mortalidade do *Aedes aegypti* em função da temperatura do ar. A forma da parametrização são funções polinomiais de terceira e sexta ordem. (vide Figs. 2.4, 2.5, e 2.6).

Por outro lado, Otero (2006)[18] expressou as taxas metabólicas em função de atividade enzimática, isto é, dependentes das *taxas enzimáticas poikilotermais*, em unidade de  $dia^{-1}$ . O resultado de Otero na forma de parametrizações apresenta desvios em relação à proposição de Yang *et al.*



**Figura 2.4:** Parametrização da taxa de ovoposição (valor relativo), em  $\text{dia}^{-1}$ , em função da temperatura do ar,  $T$ , em ( $^{\circ}\text{C}$ ), como proposta por Yang *et al.* (2009) [12]. Os pontos são observações; a linha contínua corresponde à parametrização por uma função polinomial de terceira-ordem; e a linha tracejada à função polinomial de sexta-ordem. Note-se a assimetria em direção à altas temperaturas, com optimum aparente a  $35^{\circ}\text{C}$ .

(2009)[12], e pode conduzir a resultados diferentes, isto é, significativamente diferentes do ponto de vista estatístico (não mostrado adiante).

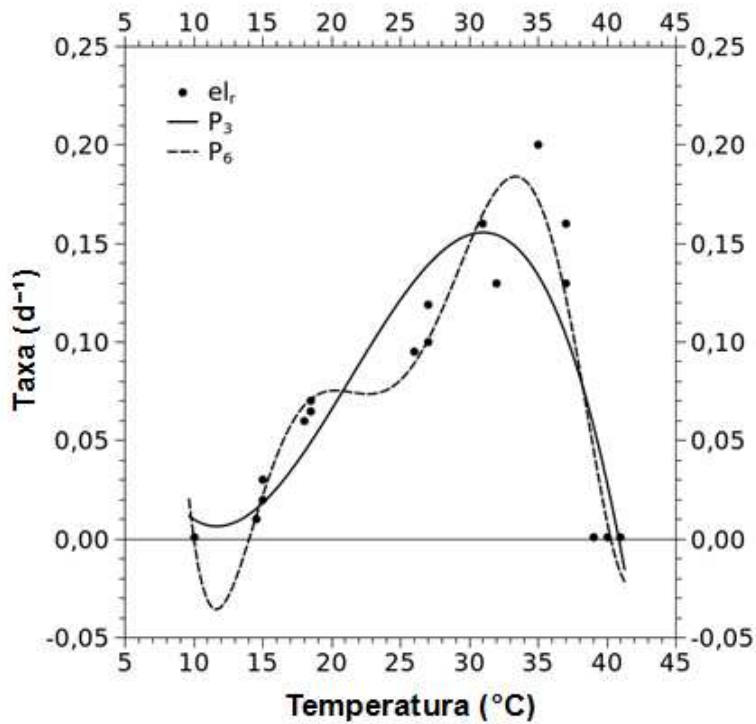
Para este trabalho empregam-se as parametrizações das taxas metabólicas propostas por Yang *et al.* (2009)[12]. Considera-se que as parametrizações de Yang *et al.* (2009) são mais apropriadas para simulações pois foram obtidas diretamente da observação de indivíduos *Aedes aegypti* (vivos) em laboratório, e não pela análise da atividade enzimática de uma molécula.

### 2.4.5 Dinâmica da população humana

A população humana, é descrita a partir das equações matemáticas em 2.47, que compreendem as classes de indivíduos numa determinada categoria de infecção pelo vírus da dengue, conforme Modelo SEIRS detalhado na Fig. 1.16, os indivíduos susceptíveis  $s(t)$ , expostos  $e(t)$ , infectantes  $i(t)$  e recuperados  $r(t)$ .

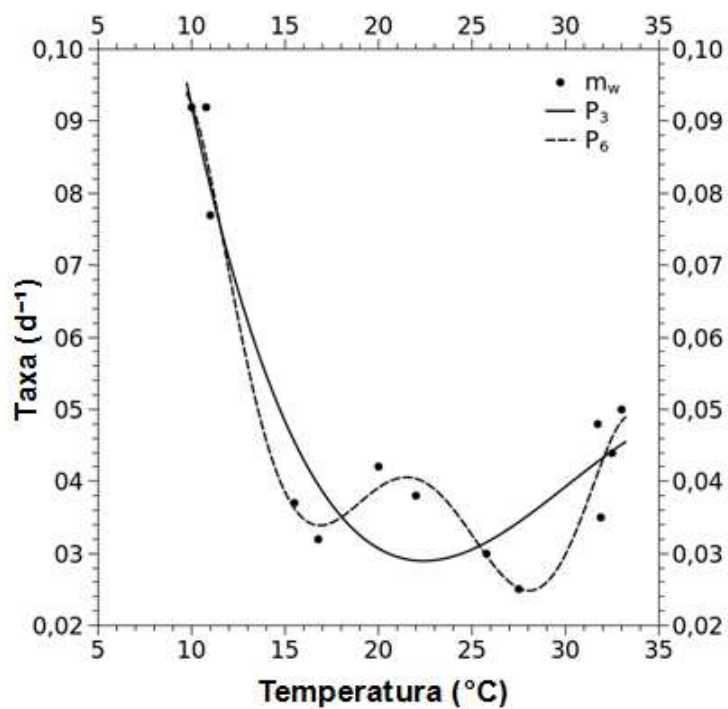
Tais equações, assim como aquelas para os sorotipos de vírus, bem como para o mosquito, também são inter-relacionadas e em função do tempo ( $t$ ); bem como, através das categorias de infecção no organismo humano, em função da  $\eta^{-1}$ , o período de infecção ou recuperação da população humana e de  $\alpha^{-1}$ , o período de incubação intrínseca do vírus na população humana e de  $(\mu_h)$ , a taxa de mortalidade de indivíduos humanos .

O sistema de EDP usado para simular a dinâmica da população humana sujeita ao evento epidêmico de infecção pelo vírus da Dengue é dado por:



**Figura 2.5:** Parametrização da taxa de pupação (valor relativo) (ovos em larvas), em  $\text{dia}^{-1}$ , em função da temperatura do ar,  $T$ , em  $^{\circ}\text{C}$ , como proposta por Yang et al. (2009) [12]. Os pontos são observações; a linha contínua corresponde à parametrização por uma função polinomial de terceira-ordem; e a linha tracejada à função polinomial de sexta-ordem. Note-se a assimetria em direção às altas temperaturas, com optimum aparente a  $35^{\circ}\text{C}$ .





**Figura 2.6:** Parametrização da taxa de mortalidade de mosquitos (valor relativo), em  $dia^{-1}$ , em função da temperatura do ar,  $T$ , em  $^{\circ}C$ , como proposta por Yang et al. (2009) [12]. Os pontos são observações; a linha contínua corresponde à parametrização por uma função polinomial de terceira-ordem; e a linha tracejada à função polinomial de sexta-ordem. Note-se os efeitos da hipotermia e hipertermia, respectivamente, abaixo de  $16^{\circ}C$  e acima de  $32^{\circ}C$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{ds}{dt}(t) = -\lambda s + \mu_h - \mu_h s + (i + i_r + r)W_s \\ \frac{de}{dt}(t) = \lambda s - \Upsilon e - \mu_h e \\ \frac{di}{dt}(t) = \Upsilon e - \eta i - \mu_i i - W_s i - \mu_h i \\ \frac{di_r}{dt}(t) = k\lambda r - \eta i_r - \mu_{i_r} i_r - \mu_h i_r - W_s i_r \\ \frac{dr}{dt}(t) = -k\lambda r + \eta i + \eta i_r - \mu_h r \\ \frac{dm}{dt}(t) = \mu_i i + \mu_{i_r} i_r \end{array} \right. \quad (2.47)$$

Sendo:

$s(t)$  representa a categoria dos indivíduos susceptíveis à contaminação por um dos sorotipos analisado, em função do tempo (t), em  $dia^{-1}$ , que varia em função de  $\mu_h$ , a taxa de mortalidade de todos os indivíduos da população antes da contaminação pelo sorotipo analisado; bem como, de  $(i + i_r + r)$ , o reservatório de indivíduos contaminados pelo vírus da dengue através do mosquito no estágio  $W_s$  e que efetivamente são capazes de passar para a categoria de indivíduos expostos ( $e(t)$ ), reservatório este que é função de  $\lambda s$ , a taxa de transformação de indivíduos suscetíveis em expostos, em  $dia^{-1}$  e de  $\mu_h s$ , a taxa de mortalidade dos indivíduos suscetíveis daquela população contaminada pelo sorotipo analisado.

$e(t)$  representa a categoria dos indivíduos expostos à infecção por um dos sorotipos analisado (infectados), em função do tempo (t), em  $dia^{-1}$ , que varia em função de  $\lambda s$ , o reservatório de indivíduos suscetíveis contaminados por  $W_s$  e capazes de passarem à categoria de  $e(t)$ ; bem como, de  $\Upsilon e$ , a taxa de transformação de indivíduos expostos em infectados, em  $dia^{-1}$ ; e de  $\mu_h e$ , a taxa de mortalidade dos indivíduos expostos daquela população contaminada pelo sorotipo analisado.

$i(t)$  representa a categoria dos indivíduos infectantes de um dos sorotipos analisado, em função do tempo (t), em  $dia^{-1}$ , que varia em função de  $\Upsilon e$ , a taxa de transformação de indivíduos expostos em infectados, em  $dia^{-1}$ ; bem como, de  $\eta i$ , a taxa de transformação de indivíduos infectados em recuperados, em  $dia^{-1}$ ; de  $\mu_h i$ , a taxa de mortalidade dos indivíduos infectados daquela população contaminada pelo sorotipo analisado e de  $W_s i$ , a taxa de infecção nos indivíduos infectados através dos mosquitos contaminados.

$i_r(t)$  representa a categoria dos indivíduos reinfectedados por um determinado sorotipo analisado, em função do tempo (t), em  $dia^{-1}$ , que varia em função de  $k\lambda r$ , a taxa de transformação de indivíduos reinfectedados para indivíduos recuperados, em  $dia^{-1}$ ; de  $\eta_{i_r} i_r$ , a taxa de transformação de indivíduos que se encontram sendo reinfectedados em recuperados (não contaminantes);  $\mu_{i_r} i_r$ , a taxa de mortalidade de indivíduos sendo reinfectedados; de  $\mu_h i_r$ , a taxa de mortalidade dos indivíduos reinfectedados e de  $W_s i_r$ , a taxa de infecção pelo mosquito nos indivíduos reinfectedados.

$r(t)$  representa a categoria dos indivíduos recuperados da infecção por um determinado sorotipo analisado, em função do tempo (t), em  $dia^{-1}$ , que varia em função de  $k\lambda r$ , a taxa de transformação de indivíduos reinfectedados para indivíduos recuperados, em  $dia^{-1}$ ; de  $\eta i$ , a taxa de transformação de indivíduos infectados em recuperados; de  $\eta_{i_r} i_r$  a taxa de transformação de indivíduos sendo reinfectedados em indivíduos em recuperados e de  $\mu_h r$ , a taxa de mortalidade dos reinfectedados na população contaminada pelo sorotipo analisado.

$m(t)$  representa a categoria dos indivíduos que morreram durante infecção por um determinado sorotipo analisado, em função do tempo ( $t$ ), em  $dia^{-1}$ , que varia em função de  $\mu_i i$ , a taxa de mortalidade dos indivíduos infectados e de  $\mu_{i_r} i_r$  a taxa de mortalidade de indivíduos que se encontravam em recuperação.

Somando-se as Eqs. 2.47, os termos semelhantes e opostos se cancelam. Assim, a seguinte forma reduzida pode ser obtida para a população total relativa ( $T$ ),

$$\frac{d}{dt} \left[ \underbrace{s + e + i + i_r + r + m}_T \right] = \frac{dT}{dt} = 0 \quad (2.48)$$

Esta é uma relação de consistência física (lei de conservação) para a população humana.  $dT/dt = 0$  indica que o modelo trata a população como fechada (*closed population model*). Consequentemente, aplica-se à população um valor unitário ( $T = 1$ ) e as variáveis que a compõem a relação de consistência física ( $s + e + i + i_r + r + m = 1$ ) são as frações da população por categoria.

### Reprodutividade basal e Saldo líquido de reprodução

Duas propriedades importantes na caracterização das condições epidêmicas são a *reprodutividade basal* ( $R_0$ ) e o *saldo líquido de reprodução* ( $R_n$ ) (Yang *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2010) [58] [59].

A  $R_0$  pode ser obtida da análise de estabilidade do sistema. Existem três possíveis pontos de equilíbrio epidemiológico para o modelo de Yang *et al.* (2007) [58]:

- Comunidade livre da infestação de mosquitos;
- Comunidade livre da transmissão da dengue e
- Comunidade com prevalência de dengue.

Para entender  $R_0$  é necessário conhecer  $\bar{R}_0$  e  $Q_0$ .

O número médio de novos mosquitos infectantes produzidos por um único mosquito infectante,  $\bar{R}_0$ , é dado por:

$$\bar{R}_0 = \frac{\gamma}{\gamma + \mu_w} \times \frac{\epsilon \beta'_h}{\mu_w} \times \frac{\alpha}{\alpha + \mu} \times \frac{\beta_w}{\eta + \mu} \quad (2.49)$$

Um mosquito suscetível, ao picar um indivíduo infectado, torna-se infectante com probabilidade de  $\frac{\gamma}{\gamma + \mu_w}$ , com  $\gamma$  sendo a taxa de transformação de mosquitos suscetíveis em infectantes e  $\frac{1}{\mu_w}$  a probabilidade de sobrevivência desse mosquito. Com isto, o mosquito infectante é capaz de picar e infectar indivíduos suscetíveis, com uma probabilidade média de  $\frac{\epsilon \beta'_h}{\mu_w}$ , sendo  $\epsilon$  a redução efetiva de repasto sanguíneo por envelhecimento do mosquito e  $\beta'_h$  a frequência com que os mosquitos picam os indivíduos suscetíveis ou a taxa de transformação de suscetíveis em expostos. A partir disto, cada indivíduo infectado ou exposto, após o período latente, torna-se infectante com uma probabilidade de  $\frac{\alpha}{\alpha + \mu}$ , onde  $\alpha$  representa a taxa de transformação de indivíduos expostos em infectantes, com  $\frac{1}{\eta + \mu}$  o período de infecção,  $\eta$  a taxa de transformação de indivíduos infectantes em recuperados e  $\beta_w$  a taxa de transformação de voadores suscetíveis em infectados não infectantes.

O número médio de mosquitos fêmeas descendentes produzidas por uma única fêmea,  $Q_0$ , ou número de descendentes basal, é dado por:

$$Q_0 = \frac{\delta}{\delta + \mu_l} \times \frac{\sigma}{\sigma + \mu_p} \times \frac{\phi}{\mu_w} \quad (2.50)$$

Sendo  $\frac{\delta}{\delta+\mu_l}$  a probabilidade da larva se tornar pupa, e  $\delta$  a taxa de transformação de larva em pupa;  $\frac{\sigma}{\sigma+\mu_p}$ , a probabilidade da pupa se tornar mosquito adulto, com  $\sigma$  representando a taxa de transformação de pupa em mosquito a uma taxa de sobrevivência de  $\frac{1}{\mu_p}$  e  $\frac{\phi}{\mu_w}$  a média de ovos viáveis produzidos por cada mosquito fêmea.

A partir dos parâmetros acima, Eqs. 2.49 e 2.50, o número de reprodutividade basal,  $R_0$ , também conhecido com quantidade de novos mosquitos adultos que podem vir a ser infectados, é descrito por:

$$R_0 = \bar{R}_0 \times \frac{\delta C(1 - \frac{1}{Q_o})}{\mu_w} \times \frac{\sigma}{\sigma + \mu_p} \quad (2.51)$$

Sendo que o número de mosquitos é dado pelo número de larvas  $[C(1 - \frac{1}{Q_o})]$  que eclodem a partir da sobrevivência ( $\frac{1}{\mu_w}$ ) de um mosquito adulto, se tornam pupa, com probabilidade de  $\frac{\delta C(1 - \frac{1}{Q_o})}{\mu_w}$  e emergem como mosquitos adultos com probabilidade de  $\frac{\sigma}{\sigma + \mu_p}$ .  $C$  é a capacidade total de criadouros (reservatórios) de larvas,  $\delta$  é a taxa de transformação de larvas em pupas e  $\sigma$  é a taxa de transformação de pupas para a fase adulta (voadores).

Vynnycky e White (2010) [7] definem o número de reprodução basal,  $R_0$ , como sendo o número médio de pessoas infectadas após a introdução de um agente infeccioso numa população suscetível, e consideram, como condição inicial, ser o  $R_0 > 1$  para que o número de indivíduos infecciosos aumente numa população de indivíduos suscetíveis. A partir disto, descrevem as equações que seguem, como sendo representativas para o cálculo de  $R_0$ :

$$R_0 = \beta N D \quad (2.52)$$

A Eq. 2.52 é usada para o cálculo de  $R_0$  em modelos de transmissão de doenças infecciosas imunizantes, sendo que  $\beta$  representa a taxa de contato entre dois indivíduos por unidade de tempo;  $N$  o tamanho da população suscetível a uma determinada infecção e  $D$  a duração da infecção.

Pode-se também considerar para o referido cálculo os indivíduos recuperados da infecção por unidade de tempo,  $r(t)$ . Logo, assume-se que a duração média da infecção seja representada por  $D = 1/r$  e, ao substituí-la na Eq. 2.52, tem-se que:

$$R_0 = \frac{\beta N}{r} \quad (2.53)$$

A Eq. 2.52 pode ser derivada usando-se lógica elementar, a partir do modelo SIRS, Fig. 1.13, ou do modelo SEIRS, Fig. 1.15. Por exemplo, ao se utilizar o modelo SIRS, contendo categoria de indivíduos Suscetíveis  $S(t)$ , Infecciosos  $I(t)$  e Imunes ou Recuperados  $R(t)$ ; a taxa de contato entre as categorias de indivíduos suscetíveis e infecciosos se dá, por lógica, pela expressão  $\beta S(t)I(t)$ , a qual significa o número de indivíduos suscetíveis que, em contato com a infecção, se tornam infecciosos, por unidade de tempo ( $t$ ). Como condição inicial, para haver aumento do número de pessoas infecciosas, a taxa  $\beta S(t)I(t)$  deve ser maior que a taxa de recuperação  $r$  de indivíduos infecciosos  $I(t)$ , por unidade de tempo  $rI(t)$ , uma vez que a categoria seguinte de indivíduos para o modelo em questão é a de recuperados  $R(t)$ . Logo, chega-se à expressão:

$$\beta S(t)I(t) > rI(t) \quad (2.54)$$

Uma vez que  $N$  representa o tamanho da população suscetível a uma determinada infecção; logo, por igualdade,  $N = S(t)$ . Substituindo-o na Eq. 2.54, obtem-se:

$$\beta NI(t) > rI(t) \quad (2.55)$$

Cancelando-se o termo  $I(t)$  e ajustando-se a Eq. 2.55, obtém-se a Eq. 2.56:

$$\beta N > r \implies \frac{\beta N}{r} > 1 \quad (2.56)$$

Uma vez sabido que a duração média da infecção é representada por  $D = 1/r$  e que  $\beta ND = R_0$ . Ao substituí-los na Eq. 2.56, chega-se à condição necessária para haver aumento do número de indivíduos infecciosos, numa dada população de indivíduos suscetíveis, expressa por

$$\beta ND > 1 \implies R_0 > 1 \quad (2.57)$$

De acordo com Vynnycky e White (2010) [7], em geral, o  $R_0$  pode ser obtido, na prática, em função da população relativa de indivíduos infectados ou de indivíduos suscetíveis, ao final de cada epidemia, baseados no modelo SEIRS e considerando ainda que indivíduos podem se combinar aleatoriamente. Logo, citam três possíveis Eqs. para o cálculo de  $R_0$ :

$$R_0 = -\frac{\ln(1 - Z_f)}{Z_f} \quad (2.58)$$

Na Eq. 2.58, segundo Diekmann e Heesterbeek (2000) [60], assume-se que todos os indivíduos de uma população são suscetíveis a uma determinada infecção e  $Z_f$  seria a proporção da população infectada, que é medida ao final daquela infecção.

$$R_0 = \frac{\ln(S_f) - \ln(S_0)}{S_f - S_0} \quad (2.59)$$

A Eq. 2.59 é mais usual, pois considera que  $S_0$  e  $S_f$  são, respectivamente, o número relativo de indivíduos suscetíveis ao início e ao final de uma determinada infecção, numa dada população. Ainda, de acordo com Diekmann e Heesterbeek (2000) [60], tal Eq. é equivalente à Eq. 2.60, proposta por Becker (1989) [61]

$$R_0 = \frac{N-1}{C} \sum_{j=S_f+1}^{S_0} 1/j = \frac{N-1}{C} \ln \left\{ \frac{S_0 + \frac{1}{2}}{S_f - \frac{1}{2}} \right\} \quad (2.60)$$

Onde  $N$  é o tamanho da população,  $C$  é o número de casos notificados de indivíduos infectados ao final de uma determinada infecção, e  $S_0$  e  $S_f$  são, respectivamente, o número relativo de indivíduos suscetíveis ao início e ao final da mesma infecção.

Vynnycky e White (2010) [7] descrevem ainda o saldo líquido de reprodução,  $R_n$ ,

$$R_n = R_0 s \quad (2.61)$$

Sendo  $R_n$  definido como o número médio de indivíduos com infecções secundárias (indivíduos reinfetados), a partir de cada indivíduo infectado, numa população relativa de indivíduos suscetíveis ( $s$ ) a uma determinada infecção.

$R_n$  varia em função do número de indivíduos reinfetados para cada indivíduo infectado; logo, se  $R_n > 1$ , há mais de um reinfetado por infectado e o saldo aumenta; se  $R_n < 1$ , há menos reinfetados por infectado e o saldo diminui e se o número de reinfetados é igual ao de infectados,  $R_n = 1$  e o saldo líquido não varia.

### Estabilidade do sistema de equações (teorema de Lyapunov)

De acordo com Lyapunov (1892) [13], a análise de estabilidade de Lyapunov fornece uma definição geométrica de estabilidade de um estado de equilíbrio, sem considerações de energia, mas apenas as propriedades topológicas do sistema.

Seja o sistema não-linear:

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (2.62)$$

O *Teorema 1 da Estabilidade de Lyapunov* diz que se existe para o sistema descrito em 2.63 uma função positiva definida por  $V(x_1, x_2, \dots, x_n)$  ( $V > 0$ ) e  $V(0) = 0$ , sendo 0 o ponto de equilíbrio e cuja derivada  $V'(x_1, x_2, \dots, x_n)$  é negativa semidefinida ( $V' \leq 0$ ), então a solução é estável.

O *Teorema 2 da Estabilidade de Lyapunov* diz que se existe para o sistema descrito em 2.63 uma função positiva definida  $V(x_1, x_2, \dots, x_n)$  ( $V > 0$ ) e  $V(0) = 0$ , sendo 0 o ponto de equilíbrio e cuja derivada  $V'(x_1, x_2, \dots, x_n)$  é negativa definida ( $V' < 0$ ), então a solução é assintoticamente estável. Quando um sistema não linear pode ser aproximado por um sistema linearizado, se este sistema for estável ele é chamado de infinitesimalmente estável.

O Teorema da Instabilidade de Lyapunov diz que se existe para o sistema acima uma função positiva definida  $V(x_1, x_2, \dots, x_n)$  ( $V > 0$ ) e  $V(0) = 0$ , sendo 0 o ponto de equilíbrio e cuja derivada  $V'(x_1, x_2, \dots, x_n)$  é positiva definida ( $V' > 0$ ) então a solução é instável.

A função  $V$  dos teoremas de Lyapunov age como uma espécie de distância entre os pontos da trajetória e o ponto de equilíbrio em questão. De acordo com Castrucci e Curti (1981) [62], para que  $V$  seja não crescente ao longo das trajetórias, basta exigir que a derivada temporal de  $V$  aplicada em cada uma das trajetórias soluções seja menor que ou igual a zero, isto é:

$$\frac{dV(\phi_t(x))}{dt} \leq 0 \quad (2.63)$$

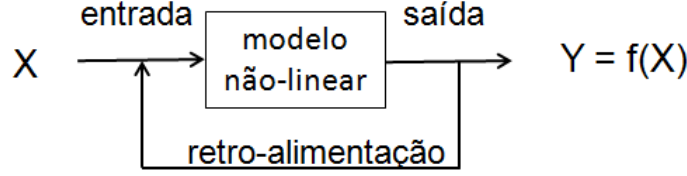
Logo, a estabilidade depende da existência da *Função de Lyapunov*. No método de Lyapunov, os sistemas dinâmicos são sempre representados por equações de estado:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \\ \dot{x}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n, t) \end{cases} \quad (2.64)$$

que, na forma vetorial, pode ser escrita como:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, t) \\ x^T = (x_1, x_2, \dots, x_n); \quad f^T = (f_1, f_2, \dots, f_n) \end{cases} \quad (2.65)$$

Onde os parâmetros do sistema, chamado de *não-autônomo*, variam no decorrer do tempo,  $t$ , influenciando os valores das derivadas temporais do estado. A entrada (geralmente tempo-dependente)  $x(t)$  pode ser vista como um controle, estímulo, perturbação ou função forçante. Para sistemas com insumos, deve-se quantificar o efeito das entradas sobre a estabilidade do sistema. Todavia, os resultados teóricos do método são mais fáceis de serem deduzidos quando o sistema dinâmico é *autônomo*, ou seja, quando não dependem do tempo; logo, a Eq. 2.65 pode ser reescrita como:



**Figura 2.7:** Elementos do modelo não-linear para a dinâmica populacional da dengue. Ilustração baseada em Lyapunov (1892) [13].

$$x = f(x) \quad (2.66)$$

Sendo  $x$  os pontos de equilíbrio do sistema dinâmico para  $f(x) = 0$ , e o vetor de velocidade  $x$  é nulo.

Conforme vista na Fig. 2.7, o modelo de dinâmica populacional, com parâmetros de entrada e saída, respectivamente,  $x$  e  $y$ , torna-se um sistema não-linear, com pontos de equilíbrio que precisam de outros estudos.

$$\text{Se } y = \frac{\partial x}{\partial y} = x' \iff f(f(x)) = x' \quad (2.67)$$

Neste caso, os pontos de equilíbrio podem estáveis ou instáveis e representados por nós, focos, nós não-degenerados, estrelas, etc. O procedimento para o cálculo dos pontos de equilíbrio é a análise da trajetória material:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{v}{u} \quad (2.68)$$

Isto é feito linearizando a Eq. 2.68, obtendo a sua forma aproximada no intervalo:

$$\begin{cases} x^{(0)} = f(y, \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n) \\ x^{(1)} = f(f(x), \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n) \\ x^{(2)} = f(f^{(2)}(x), \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n) \\ x^{(n)} = f(f^{(n)}(x), f^{(n-1)}(x), \dots, f^{(2)}(x), f(x), \alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n) \end{cases} \quad (2.69)$$

Ao se linearizar, escreve-se a forma matricial e encontra-se os auto-valores e os autovetores do sistema. Associado a um sistema dinâmico assintoticamente estável,  $x = f(x)$ , e a sua função de Lyapunov  $V(x)$ , define-se um *domínio de estabilidade* como sendo a região dos pontos  $x$  em que  $v(x) < k$ ,  $k > 0$ , uma constante, e  $dV/dt$  senidefinida negativa. O sinal e o valor do auto-valor  $k$  determinam o tipo e o ponto de equilíbrio. Para  $k = 0$ , o ponto de equilíbrio é um centro.

## 2.5 Ciclo de assimilação de dados

A assimilação de dados permite filtrar sinais de alta frequência presentes nas observações, interpola no tempo e reconstrói as variáveis (forçantes externas) do tempo de observação para o tempo de simulação (como uma função observação,  $H$ ).

Neste trabalho, emprega-se um esquema de assimilação 4D de dados observacionais baseado em relaxação newtoniana, também conhecida como *nudging*. A assimilação 4D refere-se a assimilação temporal, ou seja, ao longo de janelas temporais da simulação.

O arquivo de entrada foi preparado para a assimilação 4D contendo uma linha para cada dado.

### Relaxação newtoriana (*nudging*)

A relaxação, segundo Kister (1974) [63], é uma técnica de inicialização dinâmica e assimilação dimensional de quarta grandeza. Neste método há um período de integração pré-processada no qual as variáveis dos dados observacionais do modelo são direcionadas por termos forçantes extras nas equações. Quando o tempo inicial presente é alcançado, os termos extras são retirados das equações do modelo e o processamento produz menos alguma forçante, ou seja, ocorre um pré-processamento dos dados assimilados para eliminar possíveis falhas observacionais, formatar e preencher os campos de dados.

O objetivo principal da relaxação é colocar os dados e o modelo em harmonia, a fim do modelo ser processado relativamente livre de ruídos. Segundo Haltiner e Williams (1980) [64], para a realização da técnica, passos devem ser seguidos:

- a) especificar a condição inicial para o pré-processamento do período de tempo ( $t$ ), num período ( $t_o - T$ ), onde  $t_o$  é o tempo inicial para um novo processamento (no presente estudo foi considerado o ano decimal).
- b) executar a assimilação de ( $t_o - T$ ), ou seja, pré-processar o período de tempo ( $t$ ) pela inclusão de termos extras nas equações do modelo a fim de padronizar as outras entradas de dados, forçando o pré-processamento das outras variáveis através dos valores de pontos de grade determinados pelas observações (o ano decimal já foi assimilado durante os pré-ajustes do modelo).
- c) executar o processo efetivo de  $t_o$  depois de retirar a forçante ou os termos de deslocamento.

As equações para uma particular variável  $\alpha$  pode ser expressa na forma:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = F + N(\alpha, t)\varepsilon[\alpha^{(0)} - \alpha] \quad (2.70)$$

Sendo que  $F$  representa um termo qualquer nas equações do modelo;  $N(\alpha, t)$  o coeficiente de relaxação negativo; e  $\varepsilon$ , um fator de carga  $\leq 1$ , ou seja, um fator de certeza com relação à precisão do valor de  $\alpha^{(0)}(t)$  que é uma melhor estimativa baseado em observações. Se  $\alpha^{(0)}(t)$  assume ser um valor verdadeiro,  $\varepsilon$  pode ser um.

A técnica de relaxação, em geral é simples. Primeiro assume-se que a forçante física  $F$  é zero, e adicionalmente que  $N$  é constante e  $\varepsilon = 1$ . Depois reduz-se 2.70 para:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = N[\alpha^{(0)} - \alpha] \quad (2.71)$$

ou

$$\alpha = \alpha_0 e^{-Nt} + N e^{-Nt} \int_0^1 e^{Nt} \alpha^{(0)} dt \quad (2.72)$$

Desta forma,  $t = 0$  representa o início do período de pré-processamento e  $\alpha_0$  é o valor de  $\alpha$  para  $t = 0$ . Se  $\alpha^{(0)}(t)$  for constante no tempo,  $\alpha$  está relaxado, ou seja, houve a assimilação do dado; logo, a solução de 2.72 é:



$$\alpha = \alpha_0 + (\alpha_0 - \alpha^0)e^{-Nt} \quad (2.73)$$

Num segundo caso, em que os dados observados encontram-se mudando no decorrer do tempo,  $\alpha^0 = \alpha^0(t) + \alpha t$  (o que é mais propício ocorrer com os dados do modelo). Logo, a solução para este caso é:

$$\alpha = \alpha^0(t) + [\alpha_0 - \alpha^0]e^{-Nt} - (\alpha/N)(1 - e^{-Nt}) \quad (2.74)$$

Devido à natureza dos termos de *nudging*, que é amortecimento ou difusão, os termos devem ser avaliados em  $(t - \Delta t)$ , ou seja, no *tempo-passo*  $(n - 1)$ , quando o tempo central diferenciado (leapfrog) é aplicado para a integração numérica do período de pré-processamento dos dados, em geral, para manter a estabilidade computacional.

## 2.6 Análise de Variância - ANOVA

Foi usada a metodologia de ANOVA para análise de variância dos dados observacionais. A forma de apresentar as equações a seguir foi proposta por Guimarães e Sarsfield Cabral (2007) [65].

A análise de variância (analysis of variance - ANOVA) é a comparação de grupos no que diz respeito à sua experiência. Alguns autores usam a palavra tratamento em vez de grupo e diz-se que a experiência tem tantos níveis ou efeitos quantos tratamentos (ou grupos) distintos. Esta comparação é feita a partir da análise da dispersão presente no conjunto de dados, daí a designação de análise de variância.

A ANOVA serve para determinar se a diferença observada entre duas médias amostrais é devida, apenas, às variações aleatórias de uma amostra a outra, ou se os dados vêm de grupos onde as médias são verdadeiramente diferentes, através da comparação do afastamento entre as médias amostrais com a variação existente dentro das amostras. O que importa não é o quanto as médias amostrais estão distantes, mas o quão distantes estão relativamente à variabilidade de observações individuais.

Designa-se por  $g$  o número de grupos (efeitos) e por  $n_1, n_2, \dots, n_g$  as dimensões correspondentes. As observações relativas ao  $i$ -ésimo grupo são denotadas por  $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ini}$ ; e  $i = 1, 2, \dots, g$ .

Admite-se que cada  $x_{ij}$  é uma observação de uma variável aleatória (v.a.)  $X_{ij}$  e pressupõe que é possível decompor cada valor observado em três termos aditivos. A decomposição pode ser escrita como:

$$X_{ij} = \underbrace{m + \alpha_{ij}} + \varepsilon_{ij} = \underbrace{m_i} + \varepsilon_{ij}, \quad \varepsilon_{ij} \sim N(0, \sigma) \quad (2.75)$$

Sendo que  $X_{ij}$  são os valores observados em cada grupo, onde  $X$  é o valor obtido,  $i$  se refere ao grupo e  $j$  se refere à observação dentro do grupo;  $m$  é uma constante (a média geral);  $\alpha_{ij}$  é o desvio da média do grupo em relação à média geral ( $X - m$ ) e  $\varepsilon_{ij}$  o desvio do valor observado em relação à média do grupo.

Considera-se que as v.a.'s  $\varepsilon_{ij}$  são independentes, cada v.a.  $X_{ij}$  segue uma lei normal de média  $m_i = m + \alpha_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, g$ , e desvio padrão  $\sigma$ ; e as v.a.'s  $X_{ij}$  também são independentes; bem

como todas as v.a.'s envolvidas possuem a mesma variância ( $\sigma^2$ ).

$$X_{ij} \sim N(m_i, 0)$$

Logo, a Eq. 2.6 propõe a seguinte relação:

Valor observado = Média da população subjacente ao  $i$ -ésimo grupo + Valor residual.

Em prática, ANOVA propõe testar se as médias  $m_1, m_2, \dots, m_g$  das  $g$  populações associadas nas  $g$  amostras são significativamente diferentes umas das outras. E as hipóteses do teste podem ser especificados como se segue:

$$H_0 : m_1 = m_2 = \dots = m_g = m \quad \text{ou} \quad \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_g = \alpha$$

H1: os valores  $m_i$  não são todos iguais ou algum  $\alpha$  é diferente de zero.

A partir disto, estima-se a variância  $\sigma^2$  por dois métodos diferentes, um que não depende da veracidade de  $H_0$  e outro que depende da veracidade de  $H_0$ . Depois comparam-se as duas estimativas. Se  $H_0$  é verdadeira, então as duas estimativas devem ser próximas; caso contrário, devem diferir significativamente. Considera-se ainda para o cálculo as seguintes equações:

$$\left\{ \begin{array}{l} N = \sum n_i \\ \bar{X}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} \\ \bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} \end{array} \right. \quad (2.76)$$

Sendo que  $N$  é o número total de observações,  $\bar{X}_i$  a média das observações do grupo  $i$  e  $\bar{X}$  a média de todas as observações. A variabilidade total das observações  $X_{ij}$  é dada pela soma dos quadrados das distâncias de cada observação na média global  $\bar{X}$ , a partir da Eq. 2.79:

$$SST = \sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X})^2 \quad (2.77)$$

Logo, verifica-se que:

$$\underbrace{\sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X})^2}_{\text{SST}} = \underbrace{\sum_{i=1}^g n_i (X_i - \bar{X})^2}_{\text{SSB}} + \underbrace{\sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2}_{\text{SSW}} \quad (2.78)$$

ou seja,

$$\underbrace{SST} = \underbrace{SSE} + \underbrace{SSD} \quad (2.79)$$

Sendo  $SSE$  a variabilidade das observações entre grupos, que corresponde à soma ponderada das variações das médias de cada grupo,  $\bar{X}_i$ , em torno da média global,  $\bar{X}$  (a ponderação é feita pelo número de observações de cada grupo,  $n_i$ ); e  $SSD$  a variabilidade das observações dentro dos grupos, que corresponde à soma das variações das observações  $X_{ij}$  dentro de cada um dos diferentes grupos (para cada grupo  $i$ , a variação das observações é calculada relativamente na média desse grupo,  $\bar{X}_i$ ).

Considera-se ainda para os cálculos a média da soma dos quadrados entre grupos e a média da soma dos quadrados dentro dos grupos,  $MSE$  e  $MSD$ , respectivamente, que são dadas pela Eq. 2.80:

$$\begin{cases} MSE = \frac{SSE}{g-1} \\ MSD = \frac{SSD}{N-g} \end{cases} \quad (2.80)$$

Os valores de  $MSD$  e  $MSE$  são as duas estimativas de  $\sigma^2$  anteriormente referidas (sendo  $MSE$  aquela que depende da veracidade de  $H_0$ ).

$F = \frac{MSE}{MSD}$  é o *Fator* usado para efetuar o teste de  $H_0$  contra  $H_1$ . Para validação de  $H_0$ , tem-se que:

$$F \sim F(g-1, N-g),$$

onde  $F(g-1, N-g)$  representa a *Distribuição de Ficher* com  $g-1$  e  $N-g$  *graus de liberdade*.

Assim, quando a hipótese  $H_0$  é verdadeira, estes valores devem ser próximos e, consequentemente, a razão  $\frac{MSE}{MSD}$  terá um valor próximo de 1. Se  $H_0$  não for verdadeira, então o valor de  $MSE$  será significativamente superior ao de  $MSD$ . Assim, a hipótese  $H_0$  é rejeitada para valores elevados de  $\frac{MSE}{MSD}$ . Logo, a hipótese  $H_0$  é rejeitada para valores elevados de  $F$ , pelo que:

$$p\text{-valor} = P(F \geq f_0),$$

E  $f_0$  representa o valor observado de  $\frac{MSE}{MSD}$ .

Ainda, de acordo com Guimarães e Sarsfield Cabral (2007) [65], em muitas situações, não se pode usar ANOVA porque os dados contrariam a hipótese de normalidade ou da igualdade de variâncias, ou seja, na prática, a homogeneidade das variâncias só se torna significativa quando as dimensões dos grupos são muito diferentes, mais precisamente, quando  $(n_i)_{max} \geq 2(n_i)_{min}$ . Quando as amostras não são muito desequilibradas, o efeito da heterogeneidade das variâncias, mesmo se acentuada, é pouco significativo.

## 2.7 Verificação das incertezas da simulação

Em geral, para se avaliar as incerteza das variáveis simuladas emprega-se estimadores estatísticos como a *Raiz do Erro Quadrático Médio* (RMSE) e a *Eficiência de Nash-Sutcliffe* (NSE). Estes

estimadores são obtidos a partir da mediação das diferenças entre o número de indivíduos infectantes (variável simulada) e o número de notificações de hospitalização por dengue (variável observada).

Primeiro, define-se a *inovação*  $z_i$  da variável  $y_i$  como a diferença entre o valor de  $y$  observado ( $y_i^{obs}$ ) e o simulado ( $y_i^{sim}$ ). A partir da inovação  $z_i$  é possível obter-se diferentes estimadores da incerteza global do modelo em relação às observações. Obtém-se  $z_i$  por

$$z_i = y_i^{obs} - y_i^{sim} \quad (2.81)$$

sendo  $y_i^{obs}$  os valores observados e  $y_i^{sim}$  os respectivos valores simulados.

A seguir, apresentam-se as expressões de alguns estimadores da eficiência do modelo. Entre eles, o erro quadrático médio ( $RMSE^2$ ) e a eficiência de Nash-Sutcliffe ( $NSE$ ).

### 2.7.1 Raiz do erro quadrático médio

O *Erro Quadrático Médio* ( $RMSE$ ) é uma estatística usada para avaliação da capacidade da simulação em reproduzir às observações. De acordo com Singh *et al.* (2004) [66], o  $RMSE$  serve para medir o desvio médio entre os valores observados e simulados. Diferentes pesquisadores tem empregado o RMSE (Chu e Shirmohammadi, 2004; Singh *et al.*, 2004; Vazquez-Amábile e Engel, 2005) [67] [66] [68].

Uma expressão conveniente para o  $RMSE$  a escrita como

$$RMSE = \text{sqr}t\left(\frac{\sum_{i=1}^n z_i^2}{n}\right) \quad (2.82)$$

sendo  $n$  o número de pares de pontos de observação e simulação. O estimador atribui maior peso aos valores de inovação maiores e menor peso aos valores de inovação menores.  $RMSE$  apresenta uma distribuição quadrática. Logo, as incertezas ( $z_i$ ) se distribuem simetricamente em torno de um segmento linear central. este segmento de reta une o baricentro das observações e o baricentro da simulação. O comprimento do segmento de reta indica a amplitude da incerteza sistemática do modelo acrescida dos erros sistemáticos das observações. Os erros sistemáticos podem ser reduzidos por calibração estática ou dinâmica, mas qualquer calibração depende dos eventos disponíveis na série de base, e em geral falha para eventos mais intensos e de período de retorno longo. Se os baricentros forem iguais, o modelo não apresenta bias ou erro sistemático, e o efeito das incertezas a simulação e dos erros das observações se espalharão em torno de um ponto central. Quanto mais próximo de zero estiver o  $RMSE$ , maior a eficiência preditiva. Valores de  $RMSE$  inferiores à metade do desvio padrão  $\sigma_{obs}$  são considerados relativamente baixos, indicando capacidade preditiva do modelo. Se ao mesmo tempo  $\sigma_{sim}$  for inferior à  $\sigma_{obs}$ , além de preciso o modelo será acurado.

Em termos do módulo da inovação escreve-se uma estatística observação-simulação que pode apresentar-se assimétrica em relação aos baricentros, correspondentes agora à mediana das observações e à mediana das simulações, expressa aqui pelo seguinte somatório,

$$\varepsilon_b = \frac{\sum_{i=1}^n \|z_i\|}{n} \quad (2.83)$$

Esta é uma estatística associada à *incerteza absoluta média* (ou *bias*),  $\varepsilon_b$ , entre o baricentro das observações e o baricentro do modelo. Os baricentros correspondem, neste caso, às medianas ou quantil médio (de 50%).

O desvio sistemático do modelo em relação às observações pode ser obtido como o seguinte estimador,

$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \quad (2.84)$$

que expressa o valor médio da *inovação*.

A solução do problema da análise corretiva global modelagem-observação, a partir da teoria de filtragem de Kalman (Kalnay, 2002)[69], está fora do escopo deste trabalho.

### 2.7.2 Eficiência de Nash-Sutcliffe

A *eficiência de Nash-Sutcliffe* (NSE) é definida como uma estatística normalizada que determina a magnitude relativa da variância residual da variável simulada em comparação com a variação de dados observados, sendo definida pela Equação 2.85 (Nash e Sutcliffe, 1970) [70],

$$\left\{ \begin{array}{l} NSE_{local} \equiv 1 - \frac{(\log_{10} z_i(t))^2}{(\log_{10} y_i^{obs} - \text{Log}_{10} \bar{y}^{obs})^2} \\ \text{sendo } \bar{y}^{obs} = \text{moda} = 0 \\ NSE_{local} \equiv 1 - \frac{(\log_{10} y_i^{obs} - \log_{10} y_i^{sim})^2}{(\log_{10} y_i^{obs})^2} \end{array} \right. \quad (2.85)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} NSE_{acum} \equiv 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (\log_{10} z_i(t))^2}{\sum_{i=0}^n (\log_{10} y_i^{obs} - \text{Log}_{10} \bar{y}^{obs})^2} \\ \text{sendo } \bar{y}^{obs} = \text{moda} = 0 \\ NSE_{acum} \equiv 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (\log_{10} y_i^{obs} - \log_{10} y_i^{sim})^2}{\sum_{i=0}^n (\log_{10} y_i^{obs})^2} \end{array} \right. \quad (2.86)$$

sendo  $\bar{y}^{obs}$  a média dos valores observados.

NSE pode ser descrita como o resultado de subtrair-se da unidade o valor da razão entre o desvio quadrático médio e a variância das observados. Uma maneira de interpretar este resultado é considerá-lo como medida da eficiência da simulação em explicar a variância observada.

Os valores de NSE podem variar de  $-\infty$  a 1. Um valor unitário (ou 100%) indica que a inovação média do modelo é muito menor ou próxima de zero comparada à variância das observações, em um mesmo período de tempo. Em geral, na simulação de eventos reais, esta eficiência do modelo não é tão alta, sendo comumente inferior a 100%.

Pode ocorrer da trajetória do modelo interceptar a trajetória das observações. Neste caso, a NSE será muito alta, mas apenas durante a interceptação. Por isto, é importante tomar-se sua evolução temporal ou calculá-la em separado para as diferentes escalas temporais observadas.

Em geral, supõe-se que a eficiência aumente com o aumento da resolução, mas nem sempre isto ocorre, principalmente com o uso de parametrizações dos processos sub-grade.

Valores da NSE próximos de zero indicam que as incertezas sistemáticas do modelo são de mesma ordem de grandeza dos erros observacionais. Valores maiores que zero, principalmente superiores a 0,5 mostram a eficiência do modelo em prever de forma melhor que a *persistência*, isto é, da simples conservação da estrutura estatística presente nas observações. Por outro lado, a verificação de valores menores que zero indica que a simulação encontra-se fora da vizinhança das observações, ou seja, o módulo da inovação é maior que o desvio padrão das observações.

## 2.8 Coeficiente de Correlação de Pearson

O coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), segundo Kendall e Stuart (1977) [71] é uma medida de associação linear entre as variáveis realizado através do compartilhamento de variância. O sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis, neste caso, positiva. ( $r$ ) pode assumir apenas valores entre -1 e 1:

- para  $r = 1$ , há uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis;
- para  $r = -1$ , há uma correlação perfeita negativa entre as duas variáveis;
- para  $r = 0$ , as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra, mas pode haver uma dependência não linear entre ambas.

A intensidade da associação linear entre as variáveis pode ser expressa pela Eq. 2.87:

$$r = \frac{C_{x,y}}{S_x S_y}, \quad r \in [-1, 1] \quad (2.87)$$

Sendo  $C_{x,y}$  a covariância ou variância conjunta das variáveis X e Y;  $S_x$  o desvio padrão da variável X; e  $S_y$  o desvio padrão da variável Y.

## 2.9 Entropia e Graus-dia

O termo entropia foi primeiramente usado por Clausius, em 1865, para determinar uma quantidade de energia dissipativa, através da transformação de calor em trabalho. A entropia é uma função de estado associada a um sistema em equilíbrio termodinâmico. Tal função está associada à *Segunda Lei da Termodinâmica*, a qual explica que um sistema físico isolado evolui para um estado de equilíbrio termodinâmico, quando se atinge a entropia máxima. Esta entropia máxima corresponde a uma desordem sistêmica que, por sua vez, está relacionada à uma distribuição totalmente aleatória de objetos dispostos de forma estatisticamente homogênea. Logo, a ordem se relaciona à heterogeneidade, correspondendo a uma maior diversidade e menor redundância sistêmica (Atlan, 1992) [72].

Baseado nas leis que regem a termodinâmica, considera-se que qualquer organismo vivo constitui um sistema de reações químicas e de processos físico-químicos sempre em estado de não-equilíbrio. A manutenção deste estado só é conseguida através do consumo de energia, retirada do meio ambiente. Juntamente com a realização de trabalho celular, ocorre a dissipação de uma parte dessa energia. Esta energia dissipada em forma de calor é utilizada pelos animais nos mais diversos processos sistêmicos que envolvem o organismo, desde o metabolismo às atividades funcionais. Logo, através da variação de entropia num sistema fechado é possível relacionar a influência desta nas atividades funcionais de determinado ser vivo, através da dissipação de energia.

De acordo com Murphy e O'Neill (1997) [73], Schrödinger postula que a Termodinâmica aplicável aos sistemas biológicos encontra-se num estado de não-equilíbrio, onde "um organismo mantém-se vivo no seu estado altamente organizado retirando energia de alta qualidade do meio externo e processando-a para produzir, dentro de si, um estado mais organizado. A vida é um sistema longe do equilíbrio que mantém seu nível local de organização às custas de um maior orçamento global de entropia".

De acordo com BRUNINI *et al.* (1976) [74], uma das formas de relacionar a temperatura do ar ao desenvolvimento biológico é por meio do uso do sistema de unidades térmicas ou graus-dia. O uso de graus-dia admite uma relação linear entre o acréscimo de temperatura do ar e a taxa de desenvolvimento a qual, apesar das restrições, permite determinar a temperatura-base ou mesmo a duração das fases de um determinado ciclo biológico em relação a uma caracterização bioclimática. A partir do índice de graus-dia é possível verificar a relação entre a temperatura do ar e a duração do período emergência-maturação dos diversos componentes biológicos a se testar.

Neste trabalho, definem-se os graus-dia (GD) e a variação de entropia durante o ano epidêmico, calculados a partir do primeiro dia de julho (considerado representativo das condições de inverno).

Como ponto inicial toma-se a *Primeira Lei da Termodinâmica*,

$$\begin{cases} dq = c_p dT - \alpha dp \\ \frac{dq}{\bar{T}} = c_p \frac{dT}{\bar{T}} - \frac{\alpha}{\bar{T}} dp \end{cases} \quad (2.88)$$

sendo  $\bar{T}$  a temperatura média anual,  $c_p$  é o calor latente do ar e  $dp$  o termo da pressão .

Logo, a entropia pode ser definida por:

$$\left\{ \begin{array}{l} ds = \frac{dq}{\bar{T}} = c_p \frac{dT}{\bar{T}} - \frac{\alpha}{\bar{T}} dp \\ \Delta s = \int_{t_0}^t ds = \int_{t_0}^t \left[ c_p \frac{dT}{\bar{T}} - \alpha \frac{dp}{\bar{T}} \right] dt \\ \Delta s \cong \sum_{i=0}^n ds \cong c_p \sum_{i=0}^n \frac{T^{(i)} - T^{(i-1)}}{\bar{T}} - \bar{\alpha} \sum_{i=0}^n \frac{p^{(i)} - p^{(i-1)}}{\bar{T}} \end{array} \right. \quad (2.89)$$

sendo  $\bar{T} = 300k = cte$ , a temperatura média anual,  $t_0$  o primeiro dia de julho de cada ano.  $T^{(i)}$  e  $T^{(i-1)}$  são as temperaturas nos instantes  $t$  e  $t - 1$ , respectivamente. A variação da entropia acumulada,  $\Delta s$  é dada em unidades de  $JK^{-1}kg^{-1}$ .

Neste trabalho, para o cálculo dos graus-dia acumulados ( $GD_{acum}$ ) considera-se o acúmulo das diferenças de temperatura entre o instante  $t$  e o primeiro instante  $t_0$  do primeiro de julho de cada ano, quando se reinicializa a somatória dos graus-dias, a partir de zero. Assim,

$$\left\{ \begin{array}{l} GD = c_p(T - T_0) \\ GD_{acum} \cong c_p \sum_{i=0}^n (T^{(i)} - T_0) \end{array} \right. \quad (2.90)$$

sendo  $T_0$  a temperatura no instante  $t_0$ . Os graus-dias acumulados são calculados em unidades de  $J.Kg^{-1}$ .

## Capítulo 3

# Resultados

Foram realizadas análises para dados de observações atmosféricas, notificações por dengue, bem como análise conjunta destes a partir das simulações feitas pelo modelo, correlacionando os dados observacionais com os dados simulados gerados.

O modelo simulou o desenvolvimento dinâmico populacional da dengue, nos pontos focais das cinco Estações do COMAER apresentadas, no decorrer dos anos do estudo, fornecendo, após as simulações, um banco de dados numérico, além de scripts, e figuras com gráficos das variações temporais, segundo [12], do desenvolvimento do mosquito com seus parâmetros entomológicos de mortalidade e de mudança de fase; dos sorotipos do vírus e da população humana relativa com suas classes de infecção (susceptíveis, expostos, infectados e recuperados), além de indivíduos mortos e da população total; bem como, gráficos das variáveis atmosféricas junto à superfície (pressão atmosférica; precipitação; temperatura; umidade relativa do ar; razão de mistura; radiação solar total, difusa e terrestre; calor latente e calor sensível; quantidade de água no reservatório linear à superfície e taxa de precipitação).

As simulações geradas para o reservatório linear hidrológico em conjunto com os dados de água precipitável disponível foram concludentes para o presente trabalho, pois algumas correlações entre a análise da variação temporal das notificações por dengue e da distribuição e frequência do ciclo hidrológico foram investigadas.

### 3.1 Análise de Observações Atmosféricas

Os dados oriundos da maioria das estações meteorológicas dos aeroportos mantidas pelo COMAER na RMRJ entre 2003 e 2008, apresentam falhas de longo período, com excessão da estação localizada no Aeroporto Tom Jobim (Galeão).

Falhas por período são encontradas nos dados distribuídos como mensagem METAR referentes às Estações Meteorológicas dos aeroportos dos Afonsos (SBAF), Jacarepaguá (SBJR) e de Santa Cruz (SBSC). O preenchimento de falhas não é trivial neste caso, por causa do longo período sem informações locais.

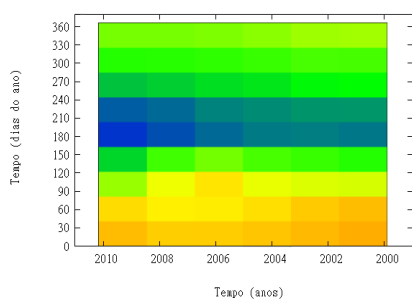
Como a Estação Meteorológica de Superfície do Galeão (SBGL) apresenta poucas falhas, e considerando-se que os desvios das temperatura do ar entre os aeroportos na RMRJ são pequenas (entre 1 e 2°C), os dados do Galeão foram usados em combinação com os dados de precipitação de todas os postos da GeoRIO, para análise e assimilação no modelo.

Somente os resultados obtidos a partir de assimilação dos arquivos meteorológicos do aeroporto do Galeão e do posto telepluviométrico da Ilha do Governador da GeoRIO será apresentada nas sub-seções seguintes.

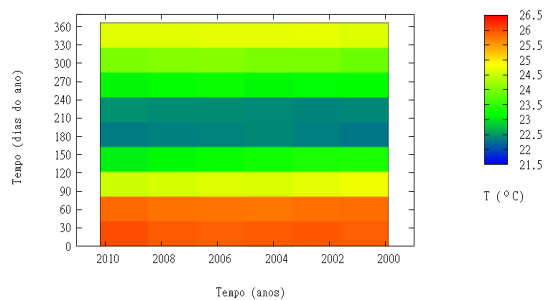
#### 3.1.1 Dados Observacionais de Temperatura do Ar

A série temporal da temperatura média na Estação Meteorológica de Superfície do Afonsos (SBAF), Fig. 3.1-a, mostra uma variação entre a mínima de 22°C a máxima de 27°C, resultando

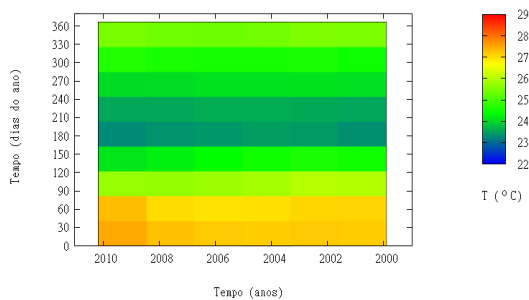




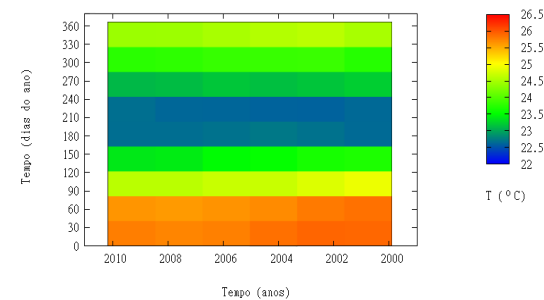
(a)



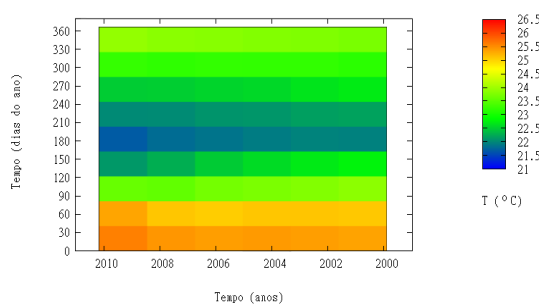
(b)



(c)



(d)



(e)

**Figura 3.1:** Visão bidimensional dos dados observacionais de *Temperatura Média do Ar* junto à superfície, em anos por dias do ano, respectivamente, eixos  $x$  e  $y$ ; em graus Celsius, no período de jan. 2000 a dez. 2010, coletados da NOAA - NCDC, a partir de dados brutos de METAR das Estações Meteorológicas de Superfície estudadas, pertencentes ao COMAER, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010, no Município do Rio de Janeiro: (a) Afonsos (SBAF); (b) Galeão (SBGL); (c) Jacarepaguá (SBJR); (d) Santos Dumont (SBRJ) e (e) Santa Cruz (SBSC).

**Tabela 3.1:** Quadro comparativo das temperaturas ( $T$ ) médias, em  $^{\circ}\text{C}$  e da quantidade de dias de verão associados à temperaturas elevadas ( $T_{\text{verão}}$ ), observadas nas Estações Meteorológicas de Superfície utilizadas no trabalho.

| Cód. Estação | Nome          | $T_{\text{med}}$ | $T_{\text{max}}$ | $T_{\text{min}}$ | $T_{\text{verão}}$ | qtde dias $T_{\text{verão}}$ |
|--------------|---------------|------------------|------------------|------------------|--------------------|------------------------------|
| SBAF         | Afonso        | 24,5             | 27,0             | 22,0             | 26,5               | 90                           |
| SBGL         | Galeão        | 24,0             | 26,5             | 21,5             | 26,0               | 75                           |
| SBJR         | Jacarepaguá   | 25,5             | 28,0             | 23,0             | 27,5               | 80                           |
| SBRJ         | Santos Dumont | 24,25            | 26,5             | 22,0             | 26,0               | 75                           |
| SBSC         | Santa Cruz    | 23,75            | 26,0             | 21,5             | 25,5               | 75                           |

em uma média de  $24,5^{\circ}\text{C}$ , no período entre janeiro de 2000 e dezembro de 2010.

No verão, a média é igual a  $26,5^{\circ}\text{C}$ . No inverno a média é aproximadamente  $22^{\circ}\text{C}$ . Para a primavera e outono tem-se média aproximada de  $24^{\circ}\text{C}$ .

A temperatura média na Estação Meteorológica de Superfície do Galeão (SBGL), Fig. 3.1-b, apresentou variação em  $0,5^{\circ}\text{C}$  abaixo da observada em SBAF, entre  $21,5^{\circ}\text{C}$  a  $26,5^{\circ}\text{C}$ , com média de  $24^{\circ}\text{C}$ , para o mesmo período entre janeiro de 2000 e dezembro de 2010. Diferentemente de SBAF, permaneceu com uma média de  $26^{\circ}\text{C}$  nos primeiros setenta e cinco dias do ano, para todos os anos apresentados.

A temperatura média na Estação Meteorológica de Superfície de Jacarepaguá (SBJR), no Bairro da Barra da Tijuca, Região Administrativa da Barra da Tijuca, no Município do Rio de Janeiro, Fig. 3.1-c, apresentou variação muito similar à da Estação dos Afonso (SBAF), com variação anual de temperatura entre  $23^{\circ}\text{C}$  a  $28^{\circ}\text{C}$ , média de  $25,5^{\circ}\text{C}$ , média de  $27,5^{\circ}\text{C}$  nos primeiros oitenta dias do ano, e de  $23^{\circ}\text{C}$  de meados de junho a início de setembro, além de um valor médio em torno de  $25^{\circ}\text{C}$  nos demais meses, no decorrer dos anos.

A temperatura média na Estação Meteorológica de Superfície do Santos Dumont (SBRJ), no bairro da Praça Quinze, Região Administrativa do Centro I, no Município do Rio de Janeiro, Fig. 3.1-d apresentou variação muito similar à da Estação do Galeão, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010, com diferença na temperatura média mínima em  $0,5^{\circ}\text{C}$ , enquanto que em SBGL a mínima apresentada foi de  $21,5^{\circ}\text{C}$ , em SBRJ a mínima permaneceu em torno de  $22^{\circ}\text{C}$ .

A temperatura média na Estação Meteorológica de Superfície de Santa Cruz (SBSC), no Bairro de Santa Cruz, Região Administrativa de Santa Cruz, no Município do Rio de Janeiro, Fig. 3.1-e, no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2010, apresentou variação média da temperatura aual entre  $21,5^{\circ}\text{C}$  e  $26^{\circ}\text{C}$ , com média de  $24^{\circ}\text{C}$  e média de  $26^{\circ}\text{C}$ , em torno dos primeiros setenta e cinco dias do ano, para todo o período de anos apresentado.

Ao observar a Tabela 3.1, conclui-se que, em relação as séries de variáveis meteorológicas das estações estudadas, a  $T_{\text{med}}$  de ocorrência é de  $24,4^{\circ}\text{C}$ , com variação média de  $22^{\circ}\text{C}$  a  $26,8^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{max}}$  de  $28^{\circ}\text{C}$  em SBJR, e  $T_{\text{min}}$  de  $21,5^{\circ}\text{C}$  em SBGL e SBSC.

O período ideal para o desenvolvimento populacional do mosquito, em função da temperatura, variou em torno dos primeiros setenta e nove dias do ano, o que corresponde ao período do verão com temperaturas médias mais elevadas, com  $T_{\text{verão}}$  de  $26,3^{\circ}\text{C}$ . A Estação SBJR, que se encontra situada no Aeroporto de Jacarepaguá, na Barra da Tijuca, foi a que apresentou temperaturas mais elevadas. Embora a relação de causa-efeito ainda não seja bem entendida, as maiores quantidades de casos notificados por Dengue também se encontram no Bairro de Jacarepaguá, que se prevaleceram dominantes durante todo o período estudado, indicando que a dinâmica do mosquito é modulada

pelas altas taxas de temperatura.

A Estação de SBSC, apesar de apresentar as temperaturas mais baixas, também apresenta altas quantidades de casos notificados por dengue, mas que não são dominantes durante todo o período do estudo, sugerindo haver outros fatores que condicionam o alto índice de casos por dengue.

### 3.1.2 Dados Observacionais de Umidade Relativa do Ar

A umidade relativa em SBAF apresentou uma média diária-anual de 76%, com variação média entre 73 a 80%, no período de Janeiro de 2000 a Dezembro de 2010, conforme Fig. 3.2-a.

O período compreendido entre a segunda quinzena de junho a início de setembro teve variações 2 a 4% acima. Houve uma redução na taxa de umidade no decorrer dos anos estudados em torno de 1%, o que ficou bem caracterizado nos meses de julho e de dezembro.

A umidade relativa em SBGL apresentou uma média diária-anual de 80%, com variação média entre 78 a 83%, no período de Janeiro de 2000 a Dezembro de 2010, Fig. 3.2-b. O período compreendido entre abril e junho, bem como dezembro, apresentou maior umidade, com variação média entre 80 e 82%. Houve uma redução na taxa de umidade no decorrer dos anos estudados, com variação média de 3%, nos meses compreendidos entre janeiro e março e entre agosto e novembro.

A umidade relativa em SBJR apresentou uma média diária-anual de 76%, com variação média entre 74 a 78%, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010, conforme Fig. 3.2-c. O efeito de umidade na referida estação foi inverso em relação à SBAF e SBGL, ou seja, houve um aumento da umidade no decorrer dos anos, com variação marcante em abril, em torno de 4%, e em maio, novembro e dezembro, aumento em torno de 2%.

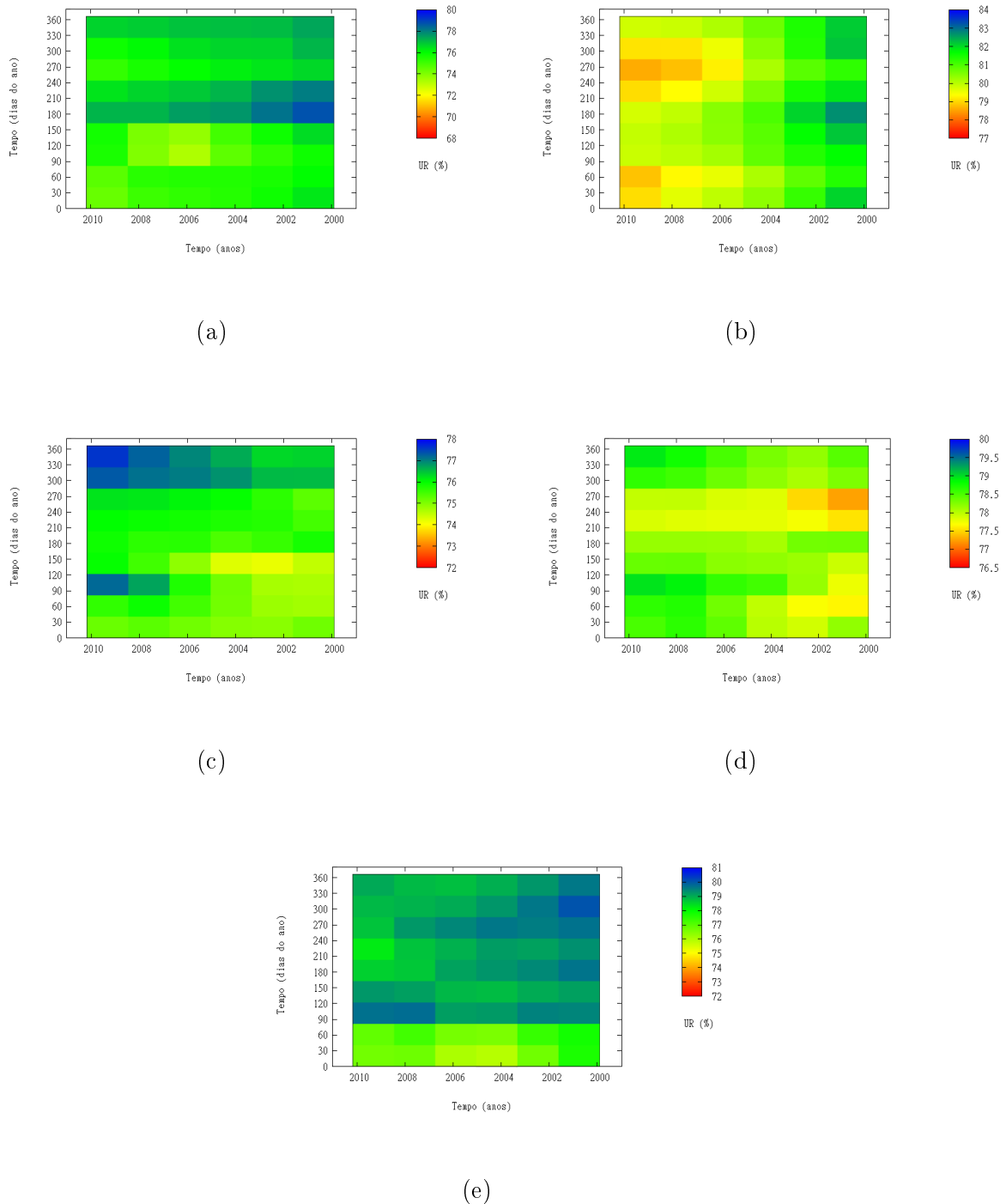
A umidade relativa em SBRJ apresentou uma média diária-anual de 78%, com variação média entre 77 a 79%, no período do estudo, Fig. 3.2-d. O efeito de umidade na referida Estação também foi inverso em relação à SBAF e SBGL, apresentando um aumento da umidade no decorrer dos anos, com variação média de 2%.

A umidade relativa em SBSC apresentou uma variação média entre 77 a 80%, no período do estudo, conforme Fig. 3.2-e. A Estação apresentou uma variação diferentemente das demais, com uma taxa bem homogênea no decorrer dos meses, bem como no decorrer dos anos. De janeiro a meados de março a taxa se manteve em torno de 77% e nos demais meses variação média de 79 a 80%.

**Tabela 3.2:** Quadro comparativo das Umidades Relativas (UR) médias, em %, e da quantidade de dias de verão associados às taxas de UR apresentadas para aquele período ( $UR_{\text{verão}}$ ), observadas nas Estações Meteorológicas de Superfície utilizadas no trabalho.

| Cód. Estação | Nome          | $UR_{med}$ | $UR_{max}$ | $UR_{min}$ | $UR_{\text{verão}}$ | qtde dias $UR_{\text{verão}}$ |
|--------------|---------------|------------|------------|------------|---------------------|-------------------------------|
| SBAF         | Afonso        | 76,5       | 80         | 73         | 76                  | 120                           |
| SBGL         | Galeão        | 80,5       | 83         | 78         | 80                  | 75                            |
| SBJR         | Jacarepaguá   | 76,0       | 78         | 74         | 78                  | 80                            |
| SBRJ         | Santos Dumont | 78,0       | 79         | 77         | 78                  | 90                            |
| SBSC         | Santa Cruz    | 77,9       | 80         | 75,5       | 77                  | 75                            |

Ao observar a Tabela 3.2, conclui-se que, em relação às Estações estudadas, a  $UR_{med}$  de ocorrência é de 77,9%, com variação média de 75,8% a 80%;  $UR_{max}$  de 83% em SBGL, e  $UR_{min}$  de 73% em SBAF.



**Figura 3.2:** Visão bidimensional dos dados observacionais de *Umidade Relativa Média do Ar* junto à superfície, em anos por dias do ano, respectivamente, eixos  $x$  e  $y$ ; em porcentagem, no período de jan. 2000 a dez. 2010, coletados da NOAA - NCDC, a partir de dados brutos de METAR das Estações Meteorológicas de Superfície estudadas, pertencentes ao COMAER, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010, no Município do Rio de Janeiro: (a) Afonosos (SBAF); (b) Galeão (SBGL); (c) Jacarepaguá (SBJR); (d) Santos Dumont (SBRJ) e (e) Santa Cruz (SBSC).

A Estação SBGL, que se encontra situada no Aeroporto Internacional Antônio Carlos Jobim, no Galeão, foi a que apresentou as maiores taxas de UR, com média de 80,5% e SBJR apresentou as menores taxas, com média de 76%.

O período de verão apresentou uma média de oitenta e oito primeiros dias do ano com uma taxa média de UR de 77,4%.

### 3.1.3 Dados Observacionais de Precipitação

De acordo com a Tabela 3.3, a análise volumétrica em função da inclinação do ajuste linear ( $\tan \theta$ ), com validação do Teste Q Quadrado, entre as séries observacionais individuais de precipitação não-acumulada e a média de precipitação dos 32 Postos Telepluviométricos, pertencentes à Fundação Geo-Rio, na RMRJ, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010, foi a seguinte:

- a) os Postos que possuem valores de precipitação volumétrica acima da média de precipitação observada para a RMRJ, ou seja,  $\tan \theta \geq 1,15$  ( $\theta > 45^\circ$ ), são: Cidade de Deus, Ilha do Governador, Itanhangá, Riocentro, Santa Teresa, Sumaré e Tijuca;
- b) os Postos que possuem valores de precipitação volumétrica próxima à média de precipitação observada para a RMRJ, ou seja,  $0,85 \leq \tan \theta < 1,15$  ( $\theta \simeq 45^\circ$ ), são: Bangu, Campo Grande, Copacabana, Grajaú, Itaúna, Laranjeiras, Piedade, Santa Cruz, São Conrado, Sepetiba e Urca;
- c) os Postos que possuem valores de precipitação volumétrica abaixo da média de precipitação observada para a RMRJ, ou seja,  $0,75 \leq \tan \theta < 0,85$  ( $\theta < 45^\circ$ ), são: Anchieta, Cachambi, Grota Funda, Madureira, Penha e Vidigal; e
- d) os Postos que possuem valores de precipitação volumétrica muito abaixo da média de precipitação observada para a RMRJ, ou seja,  $\tan \theta < 0,75$  ( $\theta \ll 45^\circ$ ), são: Gericinó, Guaratiba, Irajá, Jardim Botânico, Mendanha, São Cristóvão, Saúde e Tanque.

Em relação à análise volumétrica de precipitação dos Postos Telepluviométricos, o Posto da Tijuca foi o que apresentou maior volume de precipitação, com inclinação ( $\tan \theta$ ) igual à 2,4638. O que era de se esperar devido ao volume médio de precipitação anual que ocorre junto ao Maciço da Tijuca. Já os Postos de Irajá e Tanque foram os que apresentaram menores médias, com inclinação ( $\tan \theta$ ) média de 0,59.

Há de se considerar que alguns postos apresentaram inconsistências nos dados, conforme verificado pelos baixos valores de  $R^2$ . São eles: Copacabana, Gericinó, Grota Funda, Guaratiba, Irajá, Itaúna, São Cristóvão, Sepetiba e Tanque.

Um análise tipo dupla massa foi efetuada com dados de estações selecionadas, Fig. 3.3. O valor acumulado ao longo dos anos foi utilizada na comparação. Alguns postos apresentam modificações súbitas de comportamento hidrológico, como visto nas Figs. 3.3-b e 3.3-c. A causa da inconsistência pode ser atribuída à: 1) alteração da exposição do pluviômetro ou 2) ao reposicionamento do Posto Pluviométrico pela GEORIO.

Gráficos não mostrados aqui feitos com dados não-acumulados mostram grande dispersão espacial e variância temporal, principalmente, em associação com chuvas convectivas e acima do quartil  $Q_75\%$  (intensas), isto é, acima de  $2,0 \text{ mmh}^{-1}$ .

A mediana de precipitação volumétrica, na RMRJ, é realmente muito pequena, aproximadamente  $0,2 \text{ mmh}^{-1}$  (Karam, 2011, comunicação pessoal).

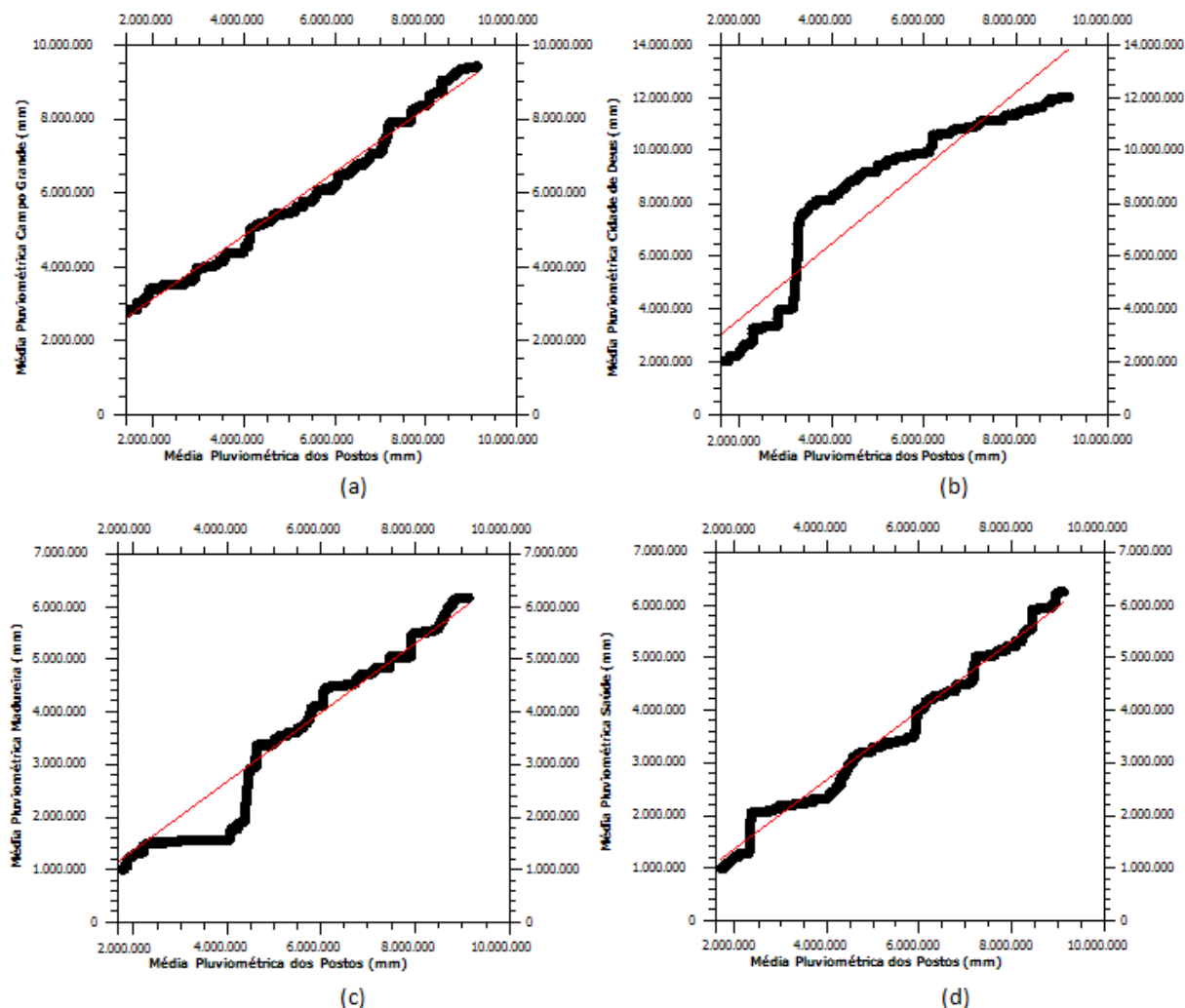
Com relação ao regime pluviométrico na Rede de Monitoramento, comparando-se os períodos com eventos de precipitação e períodos com ausência desta, uma contagem indica uma fração de pelo menos 30,3683% do período com chuva. Logo, a fração do período sem precipitação na Rede foi de 69,6317%.

A análise de Variância, Teste ANOVA, na Rede de Monitoramento para testagem dos dados em uma determinada direção indicaram que as médias de precipitação de um ou mais Postos são significativamente diferentes entre si e da média geral. A partir de ANOVA, verificou-se que as amostras de cinco postos pluviométricos não diferiam significativamente entre si e da média

**Tabela 3.3:** Ajuste linear dos valores das séries de precipitação não-acumulada dos 32 Postos Telepluviométricos, pertencentes ao Sistema ALERTA-RIO da Fundação GEORIO/Prefeitura do Rio de Janeiro, na RMRJ, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010.

| Posto Telepluviométrico | Inclinação ( $\tan\theta$ ) | Teste Q Quadrado | $R^2$  |
|-------------------------|-----------------------------|------------------|--------|
| Anchieta                | 0,8071                      | 66099,0002       | 0,1618 |
| Bangu                   | 1,0898                      | 117829,9337      | 0,1678 |
| Cachambi                | 0,8074                      | 85333,9553       | 0,1294 |
| Campo Grande            | 0,8704                      | 102789,4456      | 0,1223 |
| Cidade de Deus          | 1,7643                      | 423700,0008      | 0,1298 |
| Copacabana              | 0,8784                      | 245639,2756      | 0,0521 |
| Gericinó                | 0,7375                      | 128364,9207      | 0,0727 |
| Grajaú                  | 1,0080                      | 137022,8848      | 0,1272 |
| Grota Funda             | 0,7956                      | 117832,0472      | 0,0883 |
| Guaratiba               | 0,6793                      | 96487,7128       | 0,0795 |
| Iha do Governador       | 1,3762                      | 373265,7986      | 0,0925 |
| Irajá                   | 0,5948                      | 84663,1622       | 0,0718 |
| Itanhangá               | 1,2752                      | 160095,2317      | 0,1654 |
| Itaúna                  | 1,0194                      | 224395,3587      | 0,0826 |
| Jardim Botânico         | 0,7007                      | 70713,3165       | 0,1123 |
| Laranjeiras             | 1,0198                      | 122427,8449      | 0,1393 |
| Madureira               | 0,8214                      | 85112,1288       | 0,1368 |
| Mendanha                | 0,7439                      | 88364,9569       | 0,0974 |
| Penha                   | 0,8250                      | 77523,01624      | 0,1499 |
| Piedade                 | 0,9204                      | 142903,1157      | 0,1037 |
| Riocentro               | 1,3488                      | 254687,9066      | 0,1220 |
| Santa Cruz              | 0,9968                      | 97714,4026       | 0,1651 |
| Santa Teresa            | 1,2096                      | 132696,3896      | 0,1786 |
| São Conrado             | 1,0266                      | 122020,1754      | 0,1408 |
| São Cristóvão/GeoRIO    | 0,7143                      | 101733,7560      | 0,0894 |
| Saúde                   | 0,6977                      | 79042,4756       | 0,1064 |
| Sepetiba                | 1,0391                      | 276940,2280      | 0,0697 |
| Sumaré                  | 1,3341                      | 181840,4642      | 0,1520 |
| Tanque                  | 0,5909                      | 70235,9584       | 0,0831 |
| Tijuca                  | 2,4638                      | 968777,3769      | 0,1129 |
| Urca                    | 1,0030                      | 122565,3907      | 0,1406 |
| Vidigal                 | 0,8408                      | 75842,1148       | 0,1482 |

geral para o nível de probabilidade de 5%: Campo Grande, Grota Funda, Mendanha, Santa Cruz e Vidigal. Já os Postos de Itaúna e Sepetiba também tiveram valores significativos entre si e a média, no entanto, para um nível de probabilidade extremamente maior, como visto para os valores de erro padrão e de p-valor, Tabela 3.4. Tijuca, Sumaré, Riocentro, Itanhangá, Cidade de Deus e Copacabana apresentaram médias extremamente altas, até em relação à média. Isto se explica pela distribuição do regime de chuvas em função da topografia, ou seja, tais regiões se encontram próximas de montanhas, Maciços e, com isto, são observadas altas taxas de precipitação nessas regiões devido às chuvas orográficas. Uma vez que a média de precipitação é alta, isso corrobora para não haver influência de possíveis falhas na aferição pluviométrica dos instrumentos medidores, sendo o comportamento da distribuição das chuvas ditado pelo volume e frequência da precipitação nesses locais, o que não ocorre nos outros Postos, que, em geral, possuem baixa frequência de



**Figura 3.3:** Gráfico de dispersão das séries históricas de precipitação ACUMULADA, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010, para análise da inclinação do ajuste linear entre a média de precipitação dos Postos Telepluviométricos e a precipitação média de determinado Posto, respectivamente, eixos  $x$  e  $y$ . Exemplo de distribuição por grau de inclinação: (a) Posto Campo Grande ( $\theta \simeq 45^\circ$ ); (b) Posto Cidade de Deus ( $\theta > 45^\circ$ ); (c) Posto Madureira ( $\theta < 45^\circ$ ); (d) Posto Saúde ( $\theta \lll 45^\circ$ ). Elaborado a partir de dados de precipitação da GeoRIO.

precipitação, como visto na Penha, Madureira e São Cristóvão, sugerindo que os dados parecem apresentar falhas e erros de marcação, o que é verificado a partir do gráfico de distribuição das precipitações, quando da extrapolação ou interpolação dos dados do posto, linha em negrito, em relação à linearização da reta, linha vermelha, Fig. 3.3, principalmente em (b) e (c).

### 3.2 Análise de Casos Notificados de Agravos por Dengue

As duas grandes epidemias por dengue, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010, ocorreram nos anos de 2002 e 2008, seguidas por 2011, Fig.3.4. Baseando-se em quantidade absoluta quanto ao número de casos de notificações por dengue, o mês de março é o que apresenta maior número de casos seguido dos meses de fevereiro, abril e janeiro.

Observa-se na Fig. 3.5-a que, apesar do mês de março apresentar maior valor absoluto de casos notificados por dengue, o mês de abril possui um maior volume epidêmico, ocorrendo a partir deste uma queda acentuada no número de casos. A dengue apresenta um aspecto sazonal, com uma

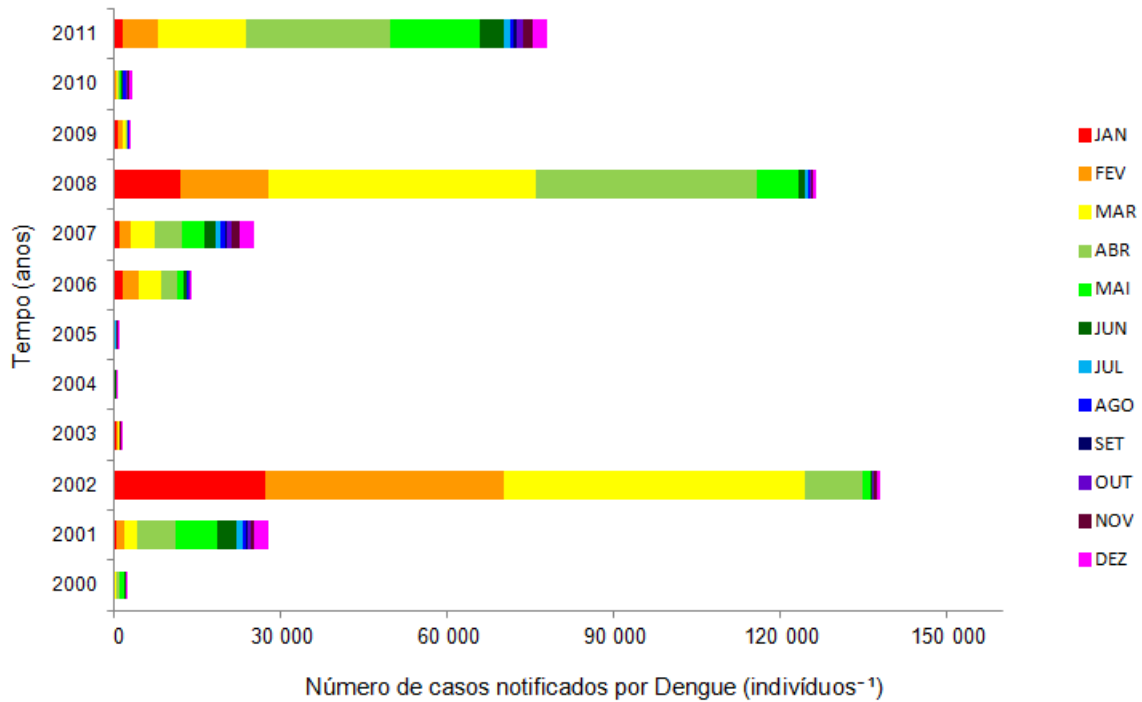
**Tabela 3.4:** *Teste Estatístico de Variância (ANOVA) entre valores médios das séries e média geral de precipitação não-acumulada dos 32 Postos Telepluviométricos, pertencentes à Fundação Geo-Rio, na RMRJ, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010.*

| Posto Telepluviométrico | Média  | DP     | Variância | Erro Padrão | P-valor |
|-------------------------|--------|--------|-----------|-------------|---------|
| Média                   | 0,1440 | 0,4483 | 0,2010    | 0,0014      |         |
| Anchieta                | 0,1100 | 0,9044 | 0,8179    | 0,0029      | 0,5094  |
| Bangu                   | 0,1298 | 1,2119 | 1,4686    | 0,0039      | 0,8348  |
| Cachambi                | 0,1142 | 1,0083 | 1,0166    | 0,0032      | 0,6088  |
| Campo Grande            | 0,1394 | 1,1021 | 1,2147    | 0,0035      | 0,7078  |
| Cidade de Deus          | 0,1866 | 2,2472 | 5,0410    | 0,0072      | 2,6255  |
| Copacabana              | 0,1763 | 1,6394 | 2,6878    | 0,0053      | 1,4443  |
| Gericinó                | 0,1273 | 1,1982 | 1,4358    | 0,0039      | 0,8184  |
| Grajaú                  | 0,1345 | 1,2761 | 1,6284    | 0,0041      | 0,9147  |
| Grota Funda             | 0,1481 | 1,1578 | 1,3406    | 0,0037      | 0,7708  |
| Guaratiba               | 0,1260 | 1,0427 | 1,0872    | 0,0034      | 0,6441  |
| Iha do Governador       | 0,1582 | 2,0655 | 4,2664    | 0,0067      | 2,2337  |
| Irajá                   | 0,1025 | 0,9727 | 0,9461    | 0,0031      | 0,5735  |
| Itanhangá               | 0,1775 | 1,4105 | 1,9895    | 0,0045      | 1,0952  |
| Itaúna                  | 0,1447 | 1,5928 | 2,5369    | 0,0051      | 1,3689  |
| Jardim Botânico         | 0,1266 | 0,9090 | 0,8263    | 0,0029      | 0,5136  |
| Laranjeiras             | 0,1583 | 1,2146 | 1,4753    | 0,0039      | 0,8381  |
| Madureira               | 0,0983 | 1,0113 | 1,0227    | 0,0033      | 0,6118  |
| Mendanha                | 0,1542 | 1,0077 | 1,0154    | 0,0032      | 0,6082  |
| Penha                   | 0,0955 | 0,9725 | 0,9458    | 0,0031      | 0,0573  |
| Piedade                 | 0,1280 | 1,2859 | 1,6536    | 0,0041      | 0,9273  |
| Riocentro               | 0,1902 | 1,7346 | 3,0088    | 0,0056      | 1,6049  |
| Santa Cruz              | 0,1411 | 1,1018 | 1,2139    | 0,0036      | 0,7074  |
| Santa Teresa            | 0,1586 | 1,2944 | 1,6756    | 0,0042      | 0,9382  |
| São Conrado             | 0,1621 | 1,2137 | 1,4730    | 0,0039      | 0,8369  |
| São Cristóvão/GeoRIO    | 0,0977 | 1,0765 | 1,1588    | 0,0035      | 0,6799  |
| Saúde                   | 0,1016 | 0,9578 | 0,9174    | 0,0031      | 0,5592  |
| Sepetiba                | 0,1550 | 1,7572 | 3,0878    | 0,0057      | 1,6443  |
| Sumaré                  | 0,2379 | 1,4913 | 2,2240    | 0,0048      | 1,2125  |
| Tanque                  | 0,1067 | 0,8913 | 0,7945    | 0,0029      | 0,4977  |
| Tijuca                  | 0,2579 | 3,3656 | 11,3276   | 0,0108      | 5,7643  |
| Urca                    | 0,1225 | 1,2163 | 1,4793    | 0,0039      | 0,8401  |
| Vidigal                 | 0,1408 | 0,9610 | 0,9235    | 0,0031      | 0,5622  |

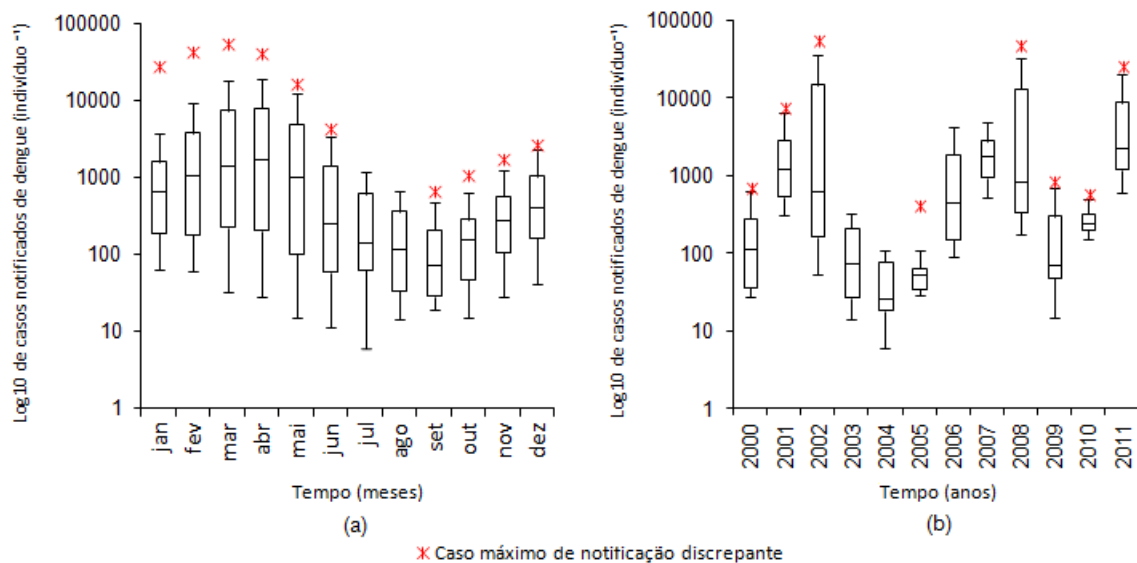
tendência cíclica da epidemia variando de agosto a abril, sugerindo que tal a distribuição mensal dos casos varie em função das Estações do ano, com um provável retardo cronológico em função do período compreendido entre o ciclo do mosquito até o surgimento das características clínicas da infecção no organismo humano, compreendendo uma média de 30 a 45 dias. O verão é a época do ano em que se registra o maior número de casos, pois o aumento da temperatura, bem como a distribuição e frequência de água acumulada pelas chuvas que geralmente ocorrem no período, favorecem o desenvolvimento do ciclo biológico e a conseqüente proliferação do mosquito. Enquanto que no verão o ovo pode chegar à fase adulta em torno de dez dias, no inverno ele pode levar mais de trinta dias, devido às características do clima frio e seco desta Estação.

Na Fig. 3.5 (b) observa-se baixas ocorrências de casos notificados em 2004-2005 e as altas





**Figura 3.4:** Distribuição Mensal de Casos Notificados de Agravos por Dengue no Município do Rio de Janeiro, RJ, para o período de Jan. 2000 a Dez. 2011. Dados brutos obtidos do SINAN-net.

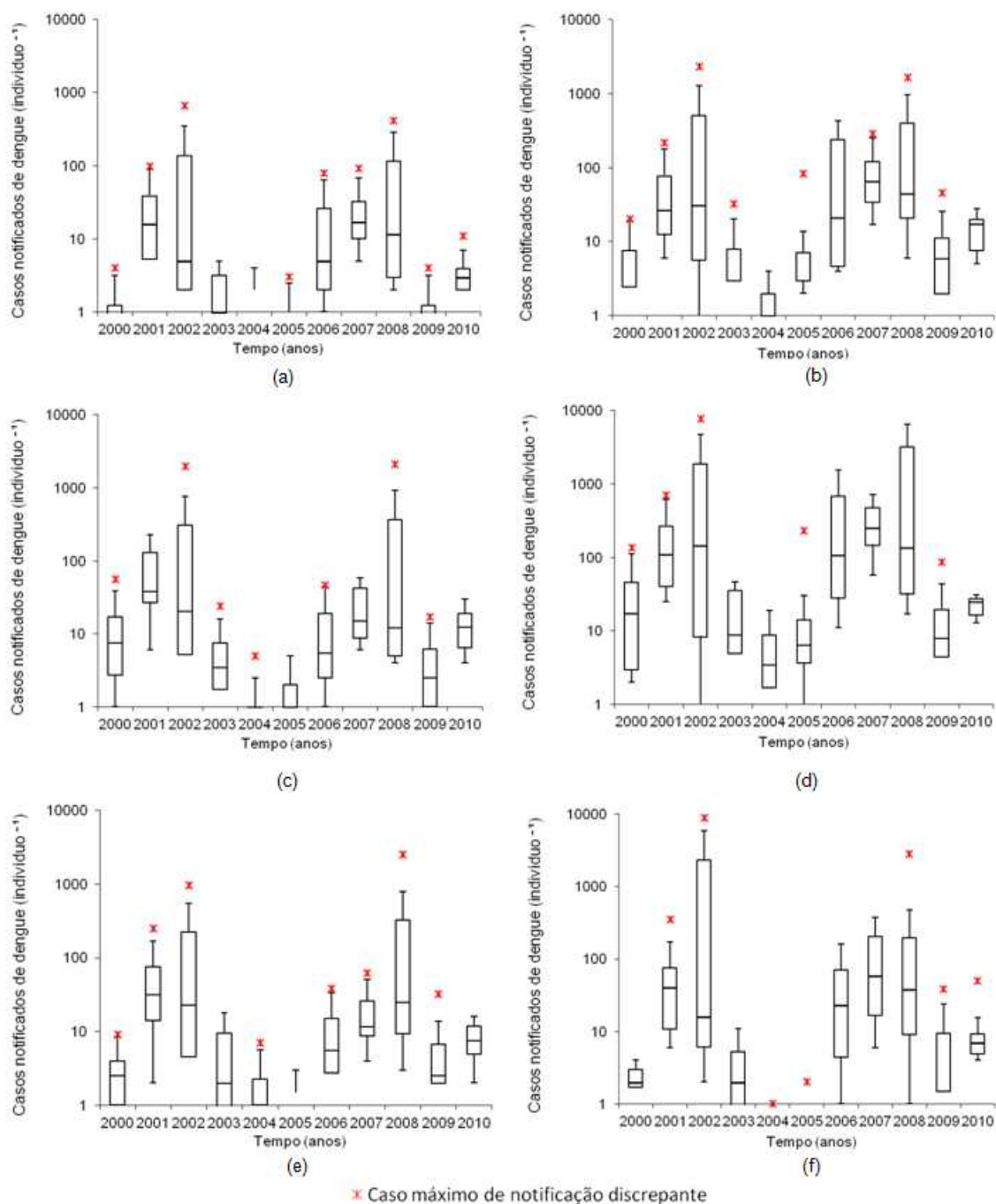


**Figura 3.5:** Distribuição histórica logarítmica do número de Casos Notificados de Agravos por Dengue no Município do RJ, no período de Jan. 2000 a Dez. 2011. (a) distribuição por meses e (b) distribuição por anos. Dados brutos obtidos do SINAN-net.

ocorrências em 2008 e 2002, este com maior volume epidêmico acumulado, seguidos de 2011.

Ao se analisar a distribuição de casos de dengue por Bairros, observou-se que estes apresentavam poucos casos notificados, alguns inclusive com séries anuais sem casos notificados, Campo dos Afonsos, por exemplo. Logo, houve uma certa variação na distribuição de casos notificados entre Bairros e Regiões, apresentando esta uma melhor distribuição em virtude de englobar maior quantidade de dados. Desta forma, os casos de notificações por dengue também são apresentados

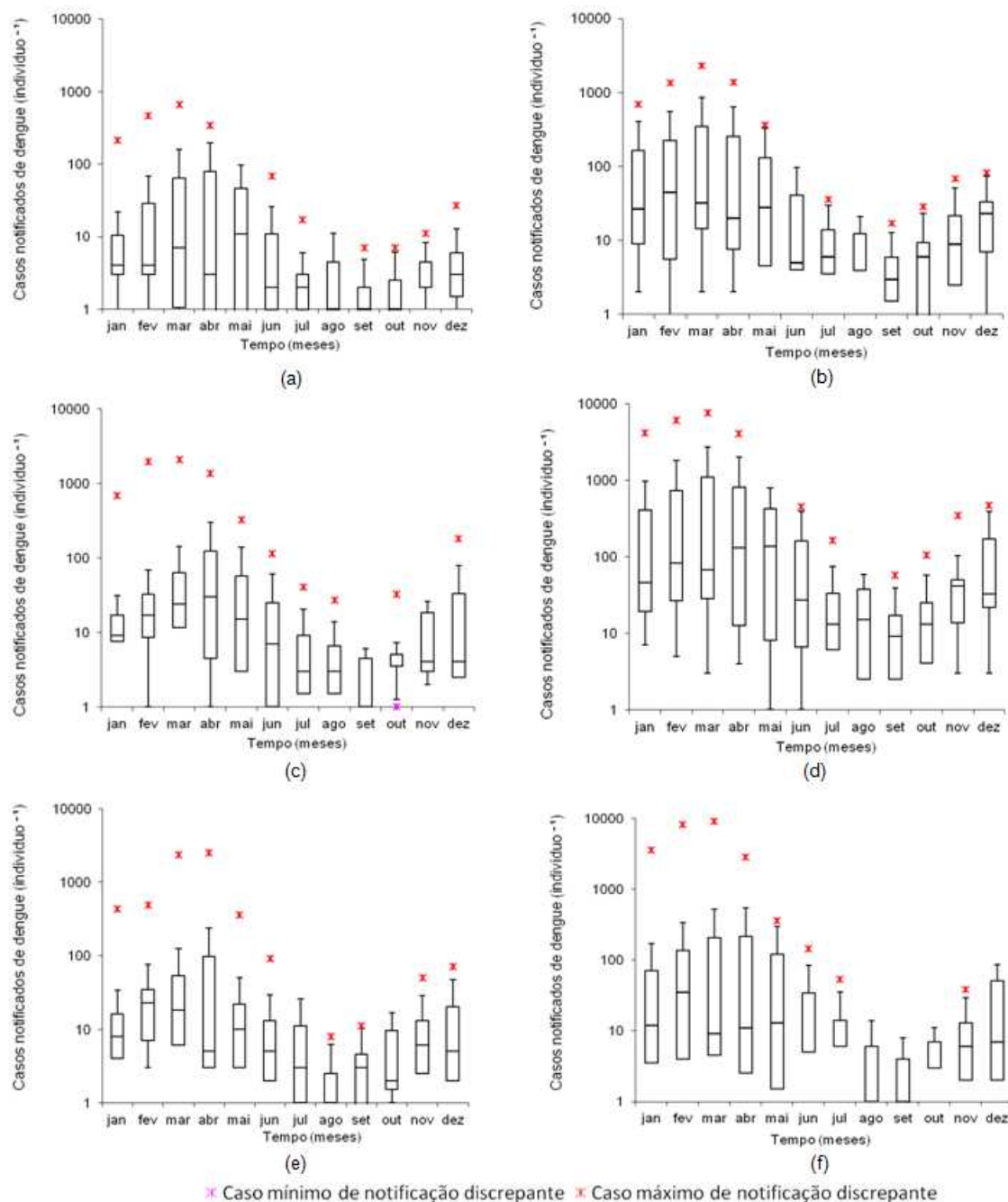
por Regiões Administrativas relativas aos Bairros do presente trabalho, com a inclusão dos casos ignorados (referentes à infecções por dengue não confirmadas, ou que não havia sido definidos os locais de infecção).



**Figura 3.6:** Quadro comparativo da distribuição anual dos casos notificados de agravos por Dengue no Município do RJ, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010, por Regiões Administrativas: (a) Centro; (b) Barra da Tijuca; (c) Ilha do Governador; (d) Jacarepaguá; (e) Realengo, (f) Santa Cruz. O eixo y foi modificado para uma escala em Log10 para mostrar maiores detalhes. Dados brutos obtidos do SINAN-net.

Observa-se a partir da Fig. 3.6 a mesma tendência cíclica anual da dengue no RJ para todas as Regiões Administrativas apresentadas, com um grande surto epidêmico em 2002, decrescendo a partir deste ano, com baixas ocorrências de casos notificados em 2004-2005, marcando a partir deste período o início de um ciclo epidêmico, com altas taxas em 2008 e o início de um novo ciclo a partir de 2009, com aumento gradativo no número de casos notificados. A Região Administrativa do Centro

foi a que apresentou a menor quantidade de casos. A Região Administrativa de Santa Cruz teve uma taxa representativa no ano de 2002; no entanto, menor que a de Jacarepaguá, que se manteve com as maiores taxas no decorrer de todos os anos, seguida da Região Administrativa da Barra, sugerindo haver alguma característica física própria destas Regiões que favorece a proliferação de mosquitos e o conseqüente aumento do número de casos. Tais locais são caracterizados pela existência de áreas urbanas cercadas por muita vegetação e locais de acúmulo de água, como rios, manguezais, dentre outros, fatores tais que favorece a proliferação do mosquito.



**Figura 3.7:** Quadro comparativo da distribuição mensal dos casos notificados de agravos por Dengue no Município do RJ, no período de Jan. 2000 a Dez. 2010, por Regiões Administrativas: (a) Centro; (b) Barra da Tijuca; (c) Ilha do Governador; (d) Jacarepaguá; (e) Realengo, (f) Santa Cruz. O eixo y foi modificado para uma escala em Log10 para mostrar maiores detalhes. Dados brutos obtidos do SINAN-net.

De acordo com a Fig. 3.7, há uma tendência sazonal das epidemias para todas as Regiões

Administrativas apresentadas, com início do ciclo epidêmico no mês de setembro e término em março-abril, ocorrendo um decréscimo gradativo do número de casos de notificação por dengue a partir destes meses. Um dos fatores determinantes para tal sazonalidade são as características físicas do clima na região do estudo, com a variação da temperatura em função das estações do ano, apresentando picos no Verão. Há um retardo temporal na ocorrência das notificações em função dessa variação de temperatura em torno de 30 a 45 dias, que corresponde ao tempo necessário para desenvolvimento total do ciclo do mosquito até atingir a sua maturidade e infecção da população humana com manifestação clínica da doença.

A Gerência de Vigilância Epidemiológica da Superintendência de Vigilância em Saúde, pertencente à Sub-Secretaria de Ações e Serviços de Saúde do Município do Rio de Janeiro (SMS-RJ), disponibilizou os Casos de Dengue por Áreas de Planejamento, por Regiões Administrativas, por Bairros, além de informar os casos ignorados, conforme descrito no Apêndice A.1.

### 3.2.1 Casos Notificados por Dengue e Índice de Oscilação Sul (IOS)

Foram analisadas as correlações entre as séries históricas do *Índice de Oscilação Sul* (IOS) e o *Número de Casos Notificados de Dengue* na RMRJ, através de gráficos de distribuição de séries históricas e de dispersão, além do teste de análise de variância (ANOVA), e todos apresentaram correlações positivas. O IOS, de acordo com Ropelewski e Jones (1987) [75], é uma medida das flutuações de grande escala na pressão a nível médio do mar que ocorrem entre o oeste e leste do Pacífico tropical durante os episódios de El Niño e de La Niña. O IOS é calculado com base nas diferenças normalizadas entre as anomalias de pressão mensais no nível médio da superfície do mar entre Tahiti (Oceano Pacífico Central) e Darwin (Austrália).

Períodos prolongados de valores negativos de IOS coincidem com grandes flutuações naturais positivas do aquecimento das águas superficiais de todo o Pacífico Tropical à este da América do Sul, configurando eventos de El Niño-Oscilação Sul (ENOS) (*El Niño-Southern Oscillation*, ENSO), enquanto que períodos positivos de IOS coincidem com flutuações negativas (resfriamento) da superfície oceânica do Pacífico oeste, configurando eventos de La Niña.

Ocorrem também frequentes períodos neutros quando o IOS apresenta diferenças absolutas menores que determinado valor, aqui considerado ser igual a 2,0 (*hPa*). De forma mais rigorosa, este valor na faixa de valores deve corresponder ao intervalo entre os quartis  $Q_{25\%}$  e  $Q_{75\%}$ . Acima de  $Q_{75\%}$  caracteriza-se El Niño e abaixo de  $Q_{25\%}$ , La Niña.

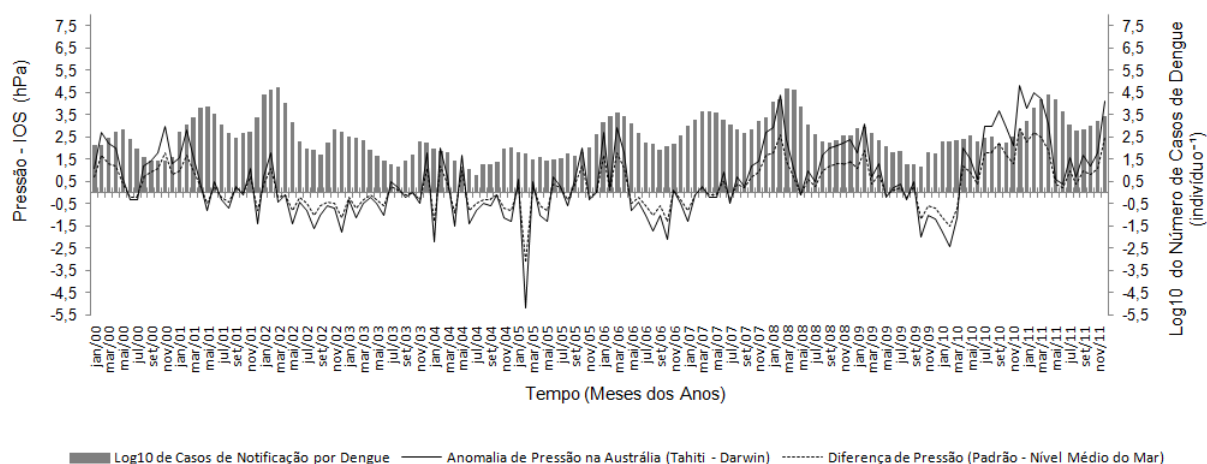
No gráfico da evolução temporal do IOS, Fig. 3.8, em quase todos os picos epidêmicos, ocorreram efeitos positivos de IOS, com anomalias de pressão acima de 2,0 (*hPa*), os quais caracterizam ocorrência dos episódios de La Niña de moderado a forte.

Já os pontos de baixa notificação epidemiológica foram acompanhados por taxas decrescentes de IOS, em sua maioria com efeitos negativos, caracterizando ENOS, destacando-se os períodos de fevereiro de 2005 e fevereiro de 2010, caracterizado pelas ocorrências mais fortes do fenômeno, período em que ocorreram uma das menores taxas de notificação por dengue.

A série histórica do IOS, no período de jan. 2000 a dez. 2011, indica que o ciclo de ENOS tem um período médio de ocorrência de dois anos, embora tenha sido relativamente inativo no ano de 2002, com valores relativamente baixos, enquanto que o registro histórico da dengue varia anualmente, de acordo com o seu período sazonal, com início e término entre agosto-setembro. Com isto, observa-se uma defasagem nas predições entre o IOS e as ocorrências de notificações por dengue na RMRJ, uma vez que esta se encontra numa escala micrometeorológica, sendo muito mais influenciada pelos efeitos climáticos locais e pelas características físicas da região, do que pelo IOS, em escala macrometeorológica.

O diagrama de dispersão foi usado para representar simultaneamente os valores das variáveis quantitativas de IOS e dos casos de dengue, a fim de analisar a associação entre ambos.

A Fig. 3.9 mostra um esquema do desenho do diagrama de dispersão, a qual é observada a distribuição homogênea dos casos de notificação por dengue na RMRJ, com relação ao IOS, medidas a cada mês, num conjunto de dados para o período de jan. 2000 a dez. 2011. O coeficiente de



**Figura 3.8:** Distribuição das séries históricas de IOS e de casos de notificados por dengue no Município do RJ, no período de Jan. 2000 a Dez. 2011. Dados brutos de IOS obtidos no Site da NOAA-NCDC e dos casos de notificação obtidos do SINAN-net.

correlação linear, obtido a partir das médias e desvios-padrão de cada um dos casos mensais de notificação por dengue em relação ao IOS apresenta uma pequena associação entre as variáveis, indicada por uma tendência crescente, no entanto dispersa, da nuvem de pontos com relação à linearização dos dados, sugerindo a existência de uma relação apenas funcional.

Em termos estatísticos, na Fig. 3.9, as duas variáveis se associam positivamente, pois apresentam uma inclinação da reta em torno de  $45^\circ$ . Entretanto, o valor de  $r^2 \simeq 0,0319$  indica que, aproximadamente, somente 3% dos casos notificados de dengue são explicados por IOS, o que demonstra um baixo grau de significância entre estas variáveis, sugerindo que fatores aleatórios ou fatores não considerados afetam a variância observada no número de notificação por dengue.

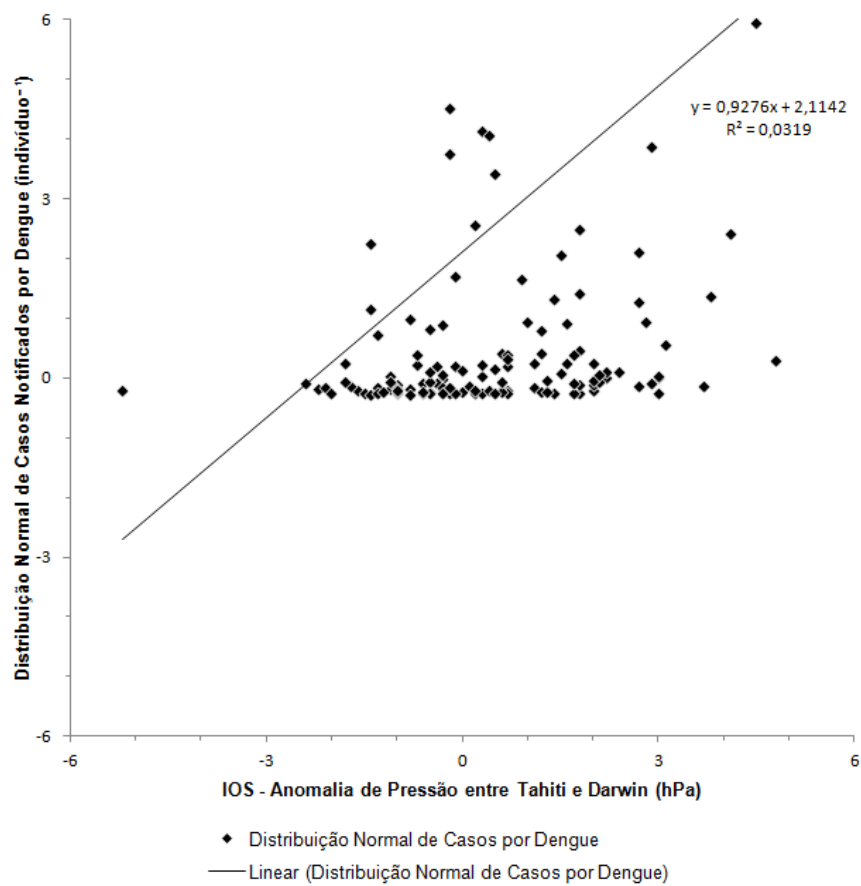
### 3.3 Simulações

Nesta Seção apresentam-se resultados de simulação, considerando a assimilação de 100% e de 50% da precipitação observada na Ilha do Governador, Rio de Janeiro, RJ. O objetivo de simular metade da amplitude dos eventos de precipitação observada é verificar a sensibilidade do modelo a partir da variação da precipitação.

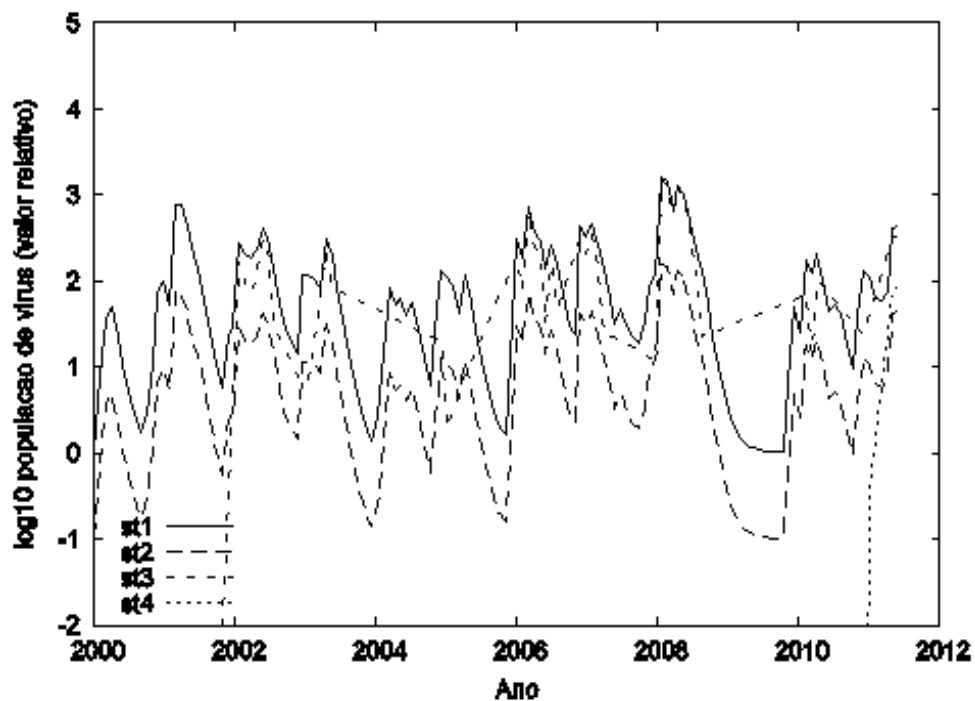
A resolução temporal da simulação é de 15 minutos entre Jan. 2000 e Jul. 2011. As taxas entomológicas utilizadas no modelo são inovações adaptadas de Yang *et al.* (2009) [12]. Esta resolução é bem superior à disponível para as notificações de agravos do SUS (30 dias). A baixa resolução temporal dos dados do SUS pode implicar que alguns preditores possam ser subestimados e assim previsões estatísticas apresentariam baixa eficiência preditiva.

#### 3.3.1 Simulação com assimilação de 100% e 50% da precipitação observada

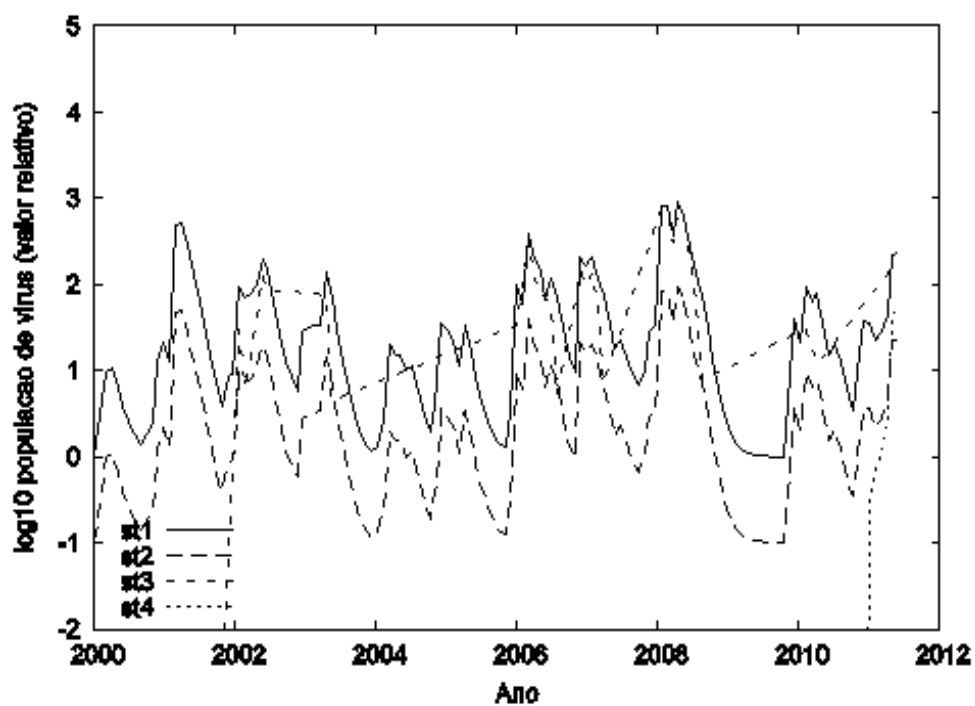
Na simulação da população relativa do vírus, Figs. 3.10-a e 3.10-b, considera-se a coexistência de Denv-1 e de Denv-2, no início do período simulado, em 2000, com introdução de Denv-3, em 2002, e de Denv-4, em 2011. Observa-se que os sorotipos variam conjuntamente, mantendo taxas similares e as mesmas amplitudes máximas, para cada quantidade de assimilação de R utilizada. Há uma variação considerável na quantidade de organismos, quando da modificação dos valores de R assimilados, sugerindo serem os vírus modulados pela dinâmica populacional dos mosquitos, em função das variações das taxas atmosféricas de temperatura e de precipitação, bem como de entropia e de graus-dia.



**Figura 3.9:** Gráfico de dispersão entre as séries históricas de IOS e distribuição normal de casos notificados por dengue na RMRJ, no período de Jan. 2000 a Dez. 2011. Anomalias de pressão entre Tahiti e Darwin. Dados brutos de IOS obtidos da NOAA-NCDC e dos casos de notificação obtidos do SINAN-net.

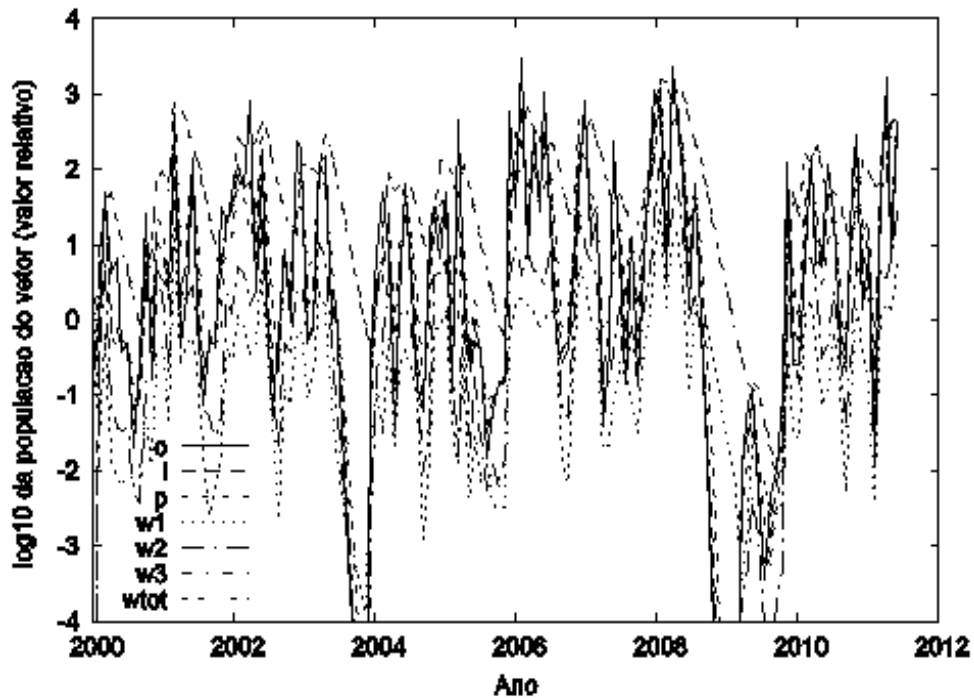


(a)

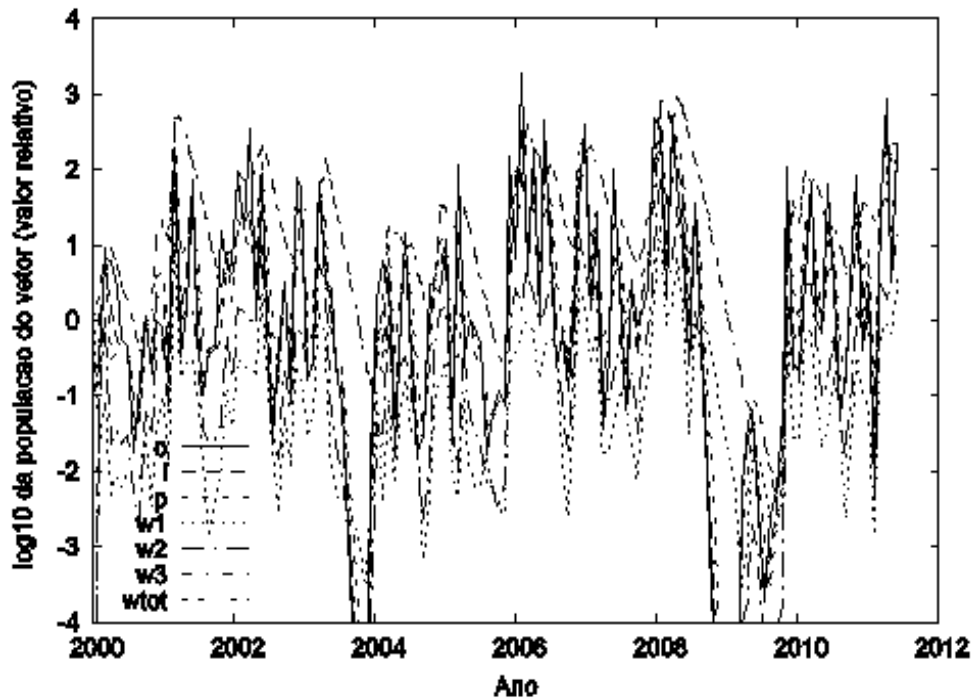


(b)

Figura 3.10: Simulação da evolução temporal da população relativa do vírus da dengue ( $st1$  = sorotipo SERV-1,  $st2$  = sorotipo SERV-2,  $st3$  = sorotipo SERV-3 e  $st4$  = sorotipo SERV-4): (a) com assimilação de 100% de  $R$  e (b) com assimilação de 50% de  $R$ .



(a)



(b)

**Figura 3.11:** Simulação da evolução temporal da população relativa de mosquitos *Aedes aegypti*, em suas diferentes fases (*o* = ovo, *l* = larva, *p* = pupa, *w1* = mosquitos susceptíveis, *w2* = mosquitos infectados não-infectantes, *w3* = mosquitos infectantes e *wtot* = total de mosquitos fêmeas): (a) com assimilação de 100% de *R* e (b) com assimilação de 50% de *R*.



Ao se comparar as assimilações com 50% e 100% de  $R$ , Figs . 3.11-a e 3.11-b, observa-se uma variação considerável da população de mosquitos, com uma amplitude média de 700 indivíduos a mais para os estágios de ovos, bem como do total de voadores, quando se utiliza 100% dos valores de  $R$ . Isto serve para destacar o efeito da água como fator modulador para o desenvolvimento e sobrevivência dos mosquitos *Aedes aegypti*, em seus diferentes estágios de vida.

Na Fig. 3.12, considera-se a população relativa total como sendo o valor unitário. Não há muita variação nos compartimentos de indivíduos expostos em relação aos infectados, para as assimilações com 100% e 50% de  $R$ , ou seja, ambos variam na mesma taxa de crescimento, Fig. *a* e *b*, respectivamente. O compartimento de indivíduos reinfetados diminui consideravelmente com a assimilação de metade de  $R$ , sugerindo que a precipitação possui efeito significativo sobre a infecção. O compartimento de indivíduos suscetíveis varia na mesma taxa, mas de forma inversamente proporcional.

A simulação da dinâmica populacional humana mostra ainda dois períodos no ciclo epidêmico, em que as taxas dos compartimentos exibem conexão entre si (no início dos anos de 2002 e de 2011). Tais momentos parecem ser influenciados pela força da reinfecção, a partir da introdução de um determinado sorotipo de vírus na população, como pode ser ilustrado pela Figura 3.10.

A Fig. 3.13-a mostra a simulação da variação do ciclo anual do desenvolvimento epidemiológico em função da variação energética dos seus estados entrópicos, com amostragem de 15 em 15 minutos. Tal variação energética obedece ao segundo princípio da termodinâmica, comportando-se como uma estrutura dissipativa. À medida que ocorre uma diminuição na variação de entropia, com valores mínimos negativos tendendo a zero, há uma menor ocorrência de casos notificados por dengue, ou seja, uma redução do nível de epidemias, o que é verificado principalmente nos anos de 2001, 2003, 2004 e 2005.

Na Fig. 3.13-b, a variação da entropia observada mostra a mesma periodicidade encontrada na análise da Figura 3.13-a, mas o gráfico é apresentado com pontos a cada 15 dias, indicando uma perda de resolução, sugerindo ser necessário uma resolução horária para que os máximos primários e secundários (anuais) da variação de entropia possam ser usados como precursores de anos epidêmicos. No gráfico nota-se a ocorrência de máximos antecedendo as epidemias de 2002 e 2008, logo, sugere-se que a organização energética da entropia é favorável aos surtos epidêmicos, ou seja, a variação dos ciclos é função grau energético estados entrópicos.

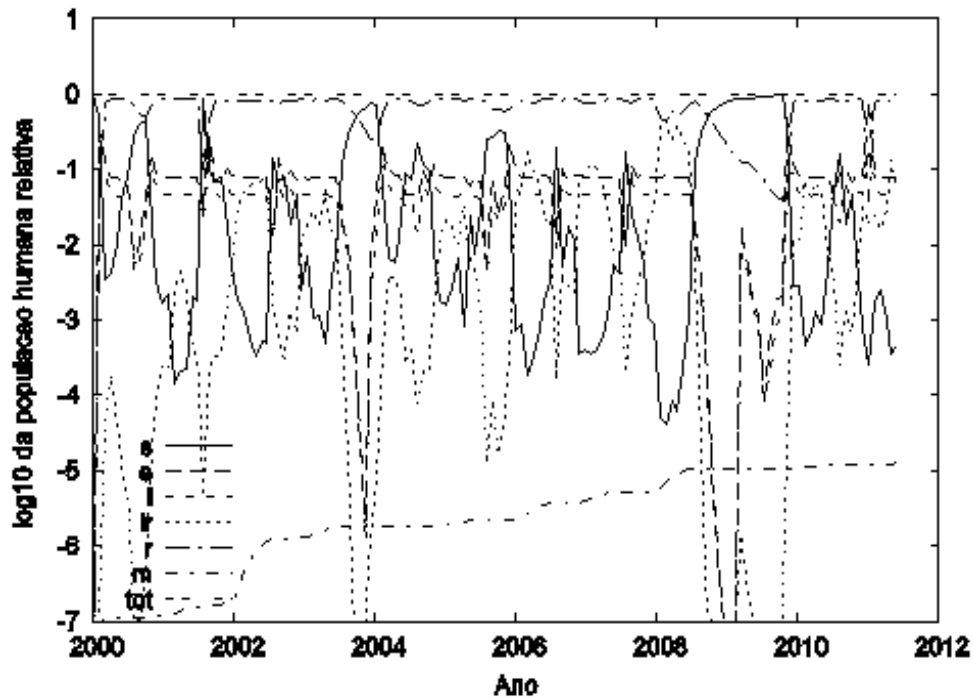
Considerando-se a temperatura média anual para a RMRJ, a variação da entropia está associada à energia disponível no sistema para manutenção dos processos biológicos em interação com os processos físico-ambientais.

O *acúmulo de energia* associado aos graus-dia acumulados (observados na RMRJ), expresso em unidades de Joules (energia), mostra indícios de que o ciclo dos graus-dia podem ser associados ao ciclo epidêmico anual, uma vez, que os valores de graus-dia maiores que  $10^{\circ}C$  ou  $20050 J$  para temperaturas acima de  $35^{\circ}C$  estimulam o metabolismo do mosquito em direção à reprodução eficiente no ambiente natural, Fig. 3.14.

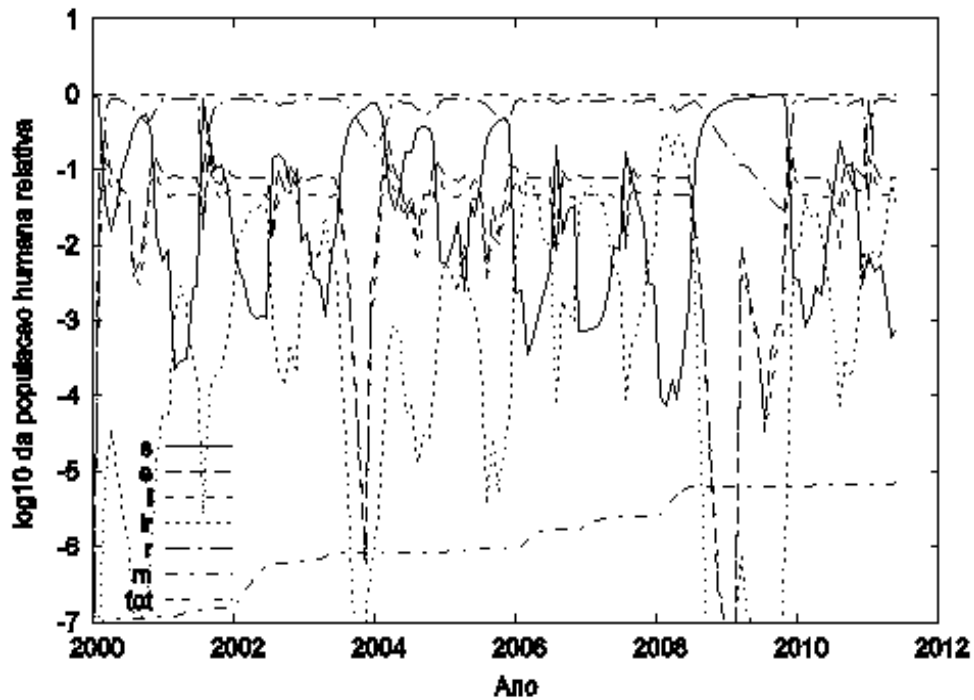
Observou-se que os meses antecedentes dos anos de baixa notificação (2004, 2009 e 2010) mostram uma redução do valor acumulado de graus-dia, impedindo ou limitando a ocorrência do surto da dengue. Logo, sugere-se que anos que apresentam baixos graus-dia acumulados podem estar relacionados a baixos valores de temperatura, limitante das condições necessárias para o desenvolvimento de um grande surto de dengue na RMRJ.

Contou-se o número de eventos de precipitação com intensidade maior que  $0,2 (mm h^{-1})$ . Não se nota uma correlação (visual) entre o número de eventos precipitantes e o número de notificações por dengue Fig. 3.15.

Desde que os reservatórios superficiais (criadouros) se enchem, não importa se a água se acumulou a partir de uma sucessão de eventos de precipitação fraca ou por um evento acumulativo mais intenso. No entanto, ao se observar simulação da dinâmica populacional do mosquito, Fig. 3.11, verifica-se que é evidente a distribuição sazonal do dengue para a distribuição temporal do modelo. Com o aumento de número de eventos de chuvas, também há um aumento do índice pluviométrico, o que determina a diminuição da atividade da forma alada do vetor, sugerindo ser ocasionado pelo

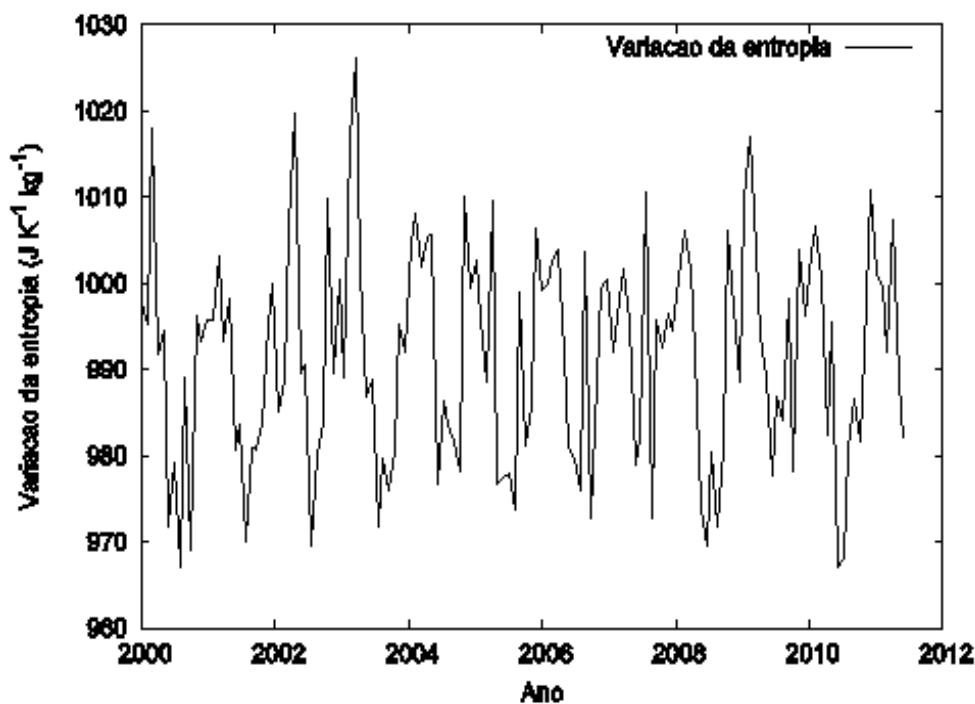


(a)

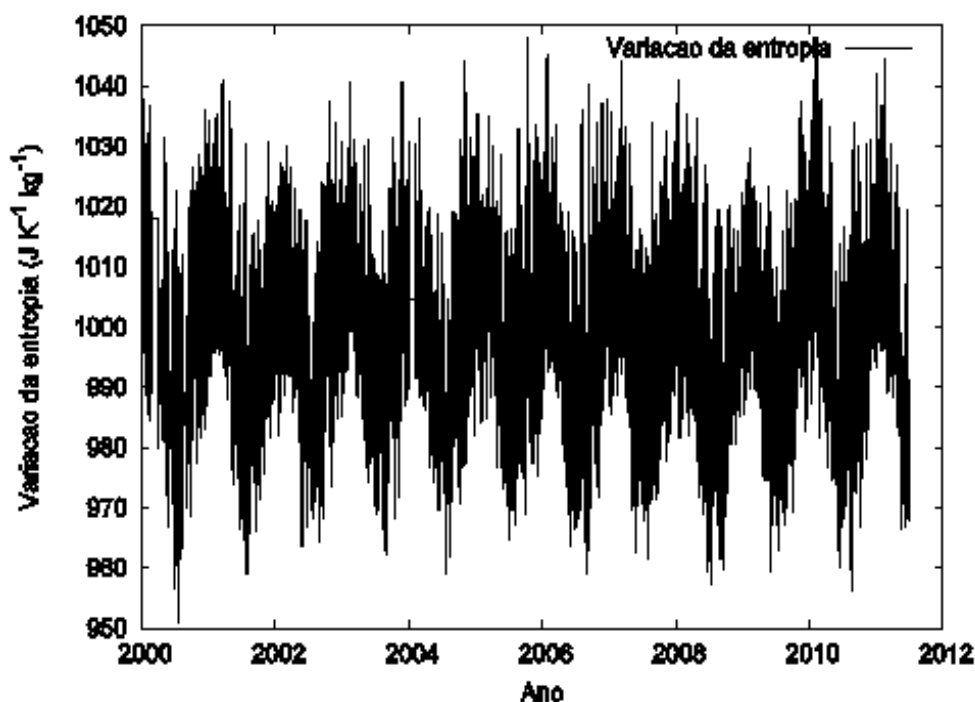


(b)

**Figura 3.12:** Simulação da evolução temporal da dinâmica da população humana relativa, nos diferentes compartimentos de infecção ( $s$  = susceptíveis,  $e$  = expostos,  $i$  = infectados,  $ir$  = reinfectados,  $r$  = imunes,  $m$  = mortos e  $tot$  = população humana total): (a) com assimilação de 100% de  $R$  e (b) com assimilação de 50% de  $R$ .

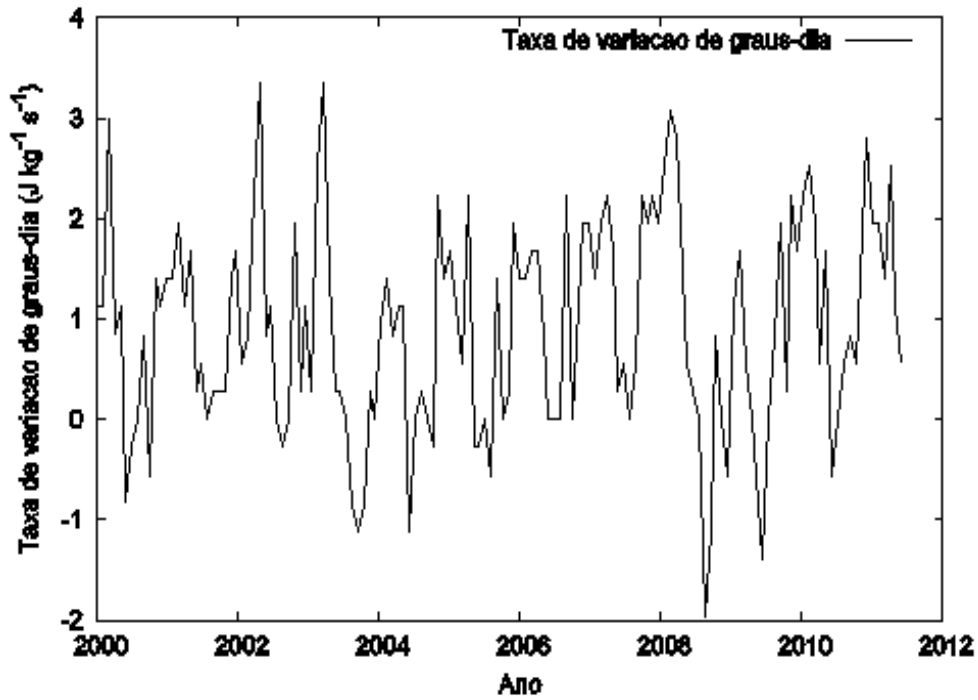


(a)

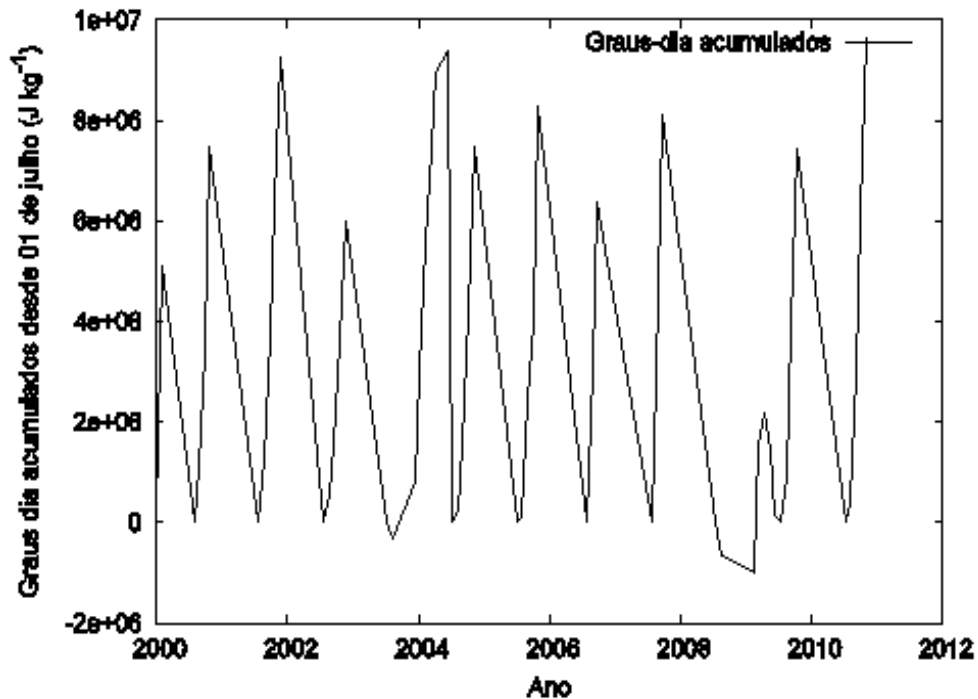


(b)

**Figura 3.13:** Evolução temporal da entropia estimada das observações de temperatura do ar, com assimilação de 100% de  $R$ . Em (a) é apresentada a variação da entropia a cada 15 minutos (resolução da simulação) e (b) idem apresentada a cada 15 dias (baixa resolução). Observa-se um perda de informação associada à baixa amostragem dos valores da variação da entropia. Em baixa resolução os máximos de entropia se perdem, e isto é desfavorável, se a entropia é usada para caracterizar a organização energética do ambiente favorável ao surto epidêmico.



(a)



(b)

**Figura 3.14:** Evolução temporal dos graus-dia (observados). Em (a) com assimilação de 100% de  $R$  e (b) com assimilação de 50% de  $R$ .

frio e/ou pela diminuição da reprodução de mosquitos por falta de chuvas, uma vez que os criadouros diminuem sua coluna de água. Esse período corresponde aproximadamente aos meses de abril-maio a agosto-setembro. Durante o verão, o aumento da temperatura e das chuvas promove um aumento na eclosão dos ovos e o surgimento de mosquitos, favorecendo o aumento da força de infecção.

A análise da entropia sugere (indícios) que a reprodução ocorre sob condições máximas da variação da entropia, isto é, durante máximos do fluxo de energia entrando no sistema, o que, em geral, antecede períodos chuvosos convectivos.

Ensaio numéricos foram realizados para testar a assimilação de somente 50% e 10% da precipitação observada. A redução do volume dos reservatórios não é afetada assimilando-se somente 50% da intensidade da precipitação, porque a taxa de 50% ainda é suficiente para a reprodução eficiente do *Aedes aegypti*. Já com a assimilação de 10% da precipitação observada o número de eventos de precipitação se reduz e a simulação torna-se sensível à redução da frequência de precipitações. Nestas condições, de fraca intensidade e baixa frequência de chuvas, o surto epidêmico de dengue (simulado) não ocorreria. O teste permite verificar a sensibilidade da parametrização da ovoposição em função do volume de água nos criadouros, em associação à frequência e intensidade da precipitação.

Conforme visto na Fig. 3.16-a, a variação temporal de água acumulada da chuva e principalmente a de água acumulada nos criadouros reafirmam o que foi sugerido anteriormente, que a distribuição, intensidade e frequência de água no decorrer dos anos associam-se aos surtos epidêmicos de dengue. A modelagem sugere que existe uma correlação entre a viremia e às condições meteorológicas, à variação de coluna de água, à entropia do ambiente associada à temperatura e energia acumulada desde o inverno (mais apropriadamente desde o solstício de inverno). Considera-se também a presença de uma defasagem temporal do acúmulo energético no ambiente e o ciclo reprodutivo do mosquito, pois o ovo pode (ou deve) permanecer em latência por um longo período de tempo (meses), para aguardar as condições ideais (energéticas e nutricionais), o que inclui altas temperaturas (estabelecidas) e preeminência de eventos precipitantes no verão, para eclodir e sobreviver.

A assimilação 4D na simulação de uma pequena fração da precipitação observada, considerando o mesmo número de eventos ou um número menor de eventos, pode reduzir muito o volume de água nos criadouros. Consequentemente, a redução da quantidade de água nos criadouros implicará em baixa incidência de pacientes infectados por dengue, Fig. 3.16-b.

### 3.4 Eficiência de Nash-Sutcliffe

Nesta seção apresenta-se a verificação, pela Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), do modelo proposto em simular a realidade.

O modelo calcula automaticamente a a NSE instantânea e a acumulada, a partir do quociente da evolução temporal entre o log10 do número relativo de indivíduos reinfetados no modelo (simulado) e o log10 do número de notificações de agravos por dengue (número de indivíduos infectados observados) durante surtos epidêmicos de dengue, a partir de dados da Ilha do Governador, RMRJ, entre o período de Jan. 2000 e Jul. 2011. Para o cálculo, considerou-se uma fração efetivamente susceptível de 35 mil pessoas para a população da RMRJ, estimada em aproximadamente 11 milhões. A evolução conjunta da população humana infectada prognósticas do modelo (simulada) e das notificações observadas é mostrada com assimilação de 100% de R e com assimilação de 50%, respectivamente Figs. 3.17-a e 3.17-b,

Há um decaimento da NSE no decorrer dos anos para ambas assimilações de R, e os valores iniciais, tanto para a NSE instantânea, como para a NSE acumulada encontram-se próximas à 82%, atingindo picos após calibração e operação do modelo, atingindo a NSE instantânea pico de 100% e a acumulada um valor aproximado de 95%. Ao final da simulação, meados de 2011, observa-se uma NSE instantânea de 49% e acumulada de 78%, para assimilação de 100% de R; enquanto que, para assimilação de 50% de R, observa-se uma NSE instantânea de 63% e acumulada de 83%, mostrando que a NSE aumenta com a redução da magnitude de R, indicando que a temperatura do ar junto à superfície é a principal variável ambiental e R é somente modulador.

Por ser utilizado o Log10 para o cálculo da NSE, seu valor instantâneo, em 2010, apresentou eficiência de 63% do modelo, o que significa um bom desempenho do modelo; no entanto, a correlação entre o número de reinfetados simulado e as notificações observada apresenta uma grande dispersão. Alguma inflação dos dados observados pode existir, uma vez que o SUS desconsidera casos apenas

não confirmados mas provavelmente associados à dengue, pelo menos em parte. A incerteza do modelo pode ser associada a ineficiência em simular sob condições de baixa incidência de dengue.

Considera-se a possibilidade de assimilar dados de notificação no modelo usando a relaxação newtoniana, já utilizada para as variáveis atmosféricas. Desta forma, o comportamento do modelo, quando há condições extremas e de não-ocorrência, poderia ser melhor investigado.

A simulação também apresenta picos de correlação infecções simuladas x observadas para período anual no qual ocorre a introdução de um novo sorotipo, quando o número de susceptíveis se eleva repentinamente, isto é, em apenas um passo de tempo  $\Delta t$  do modelo.

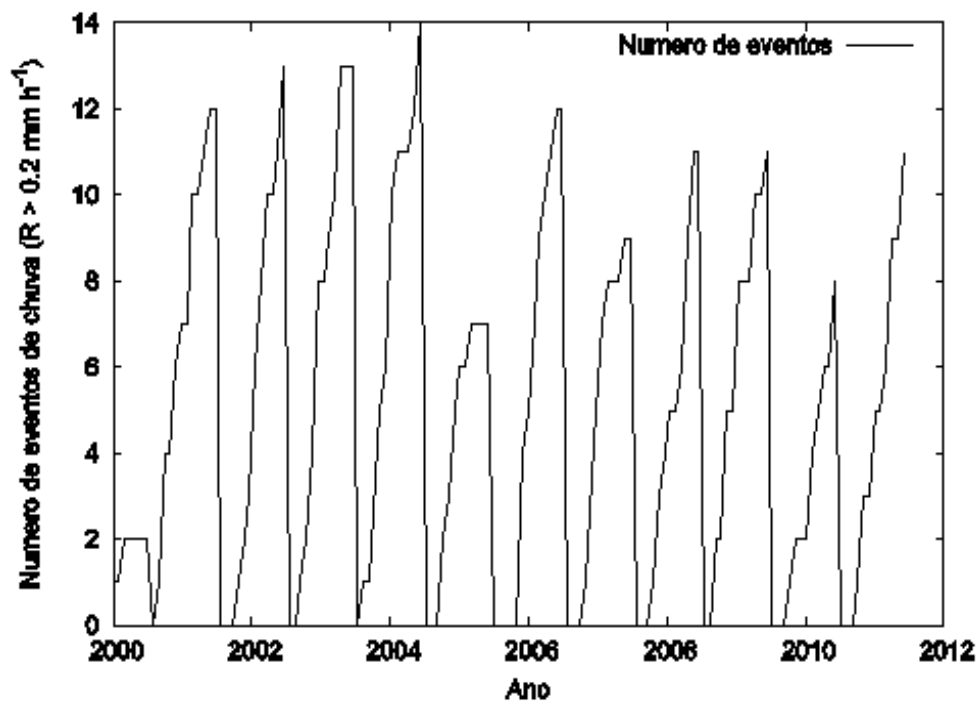
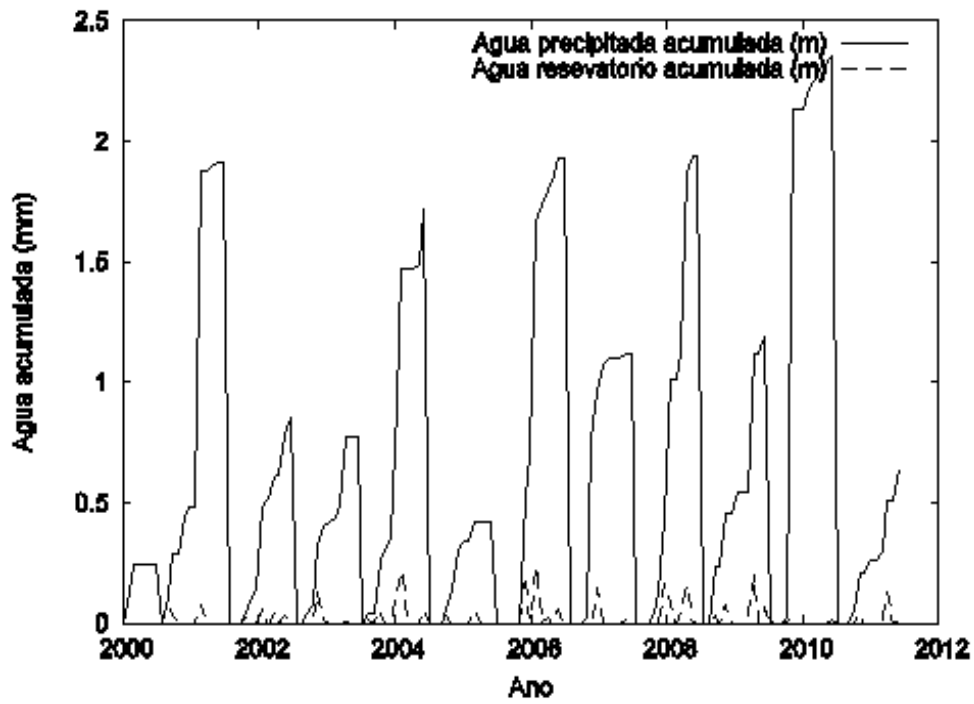
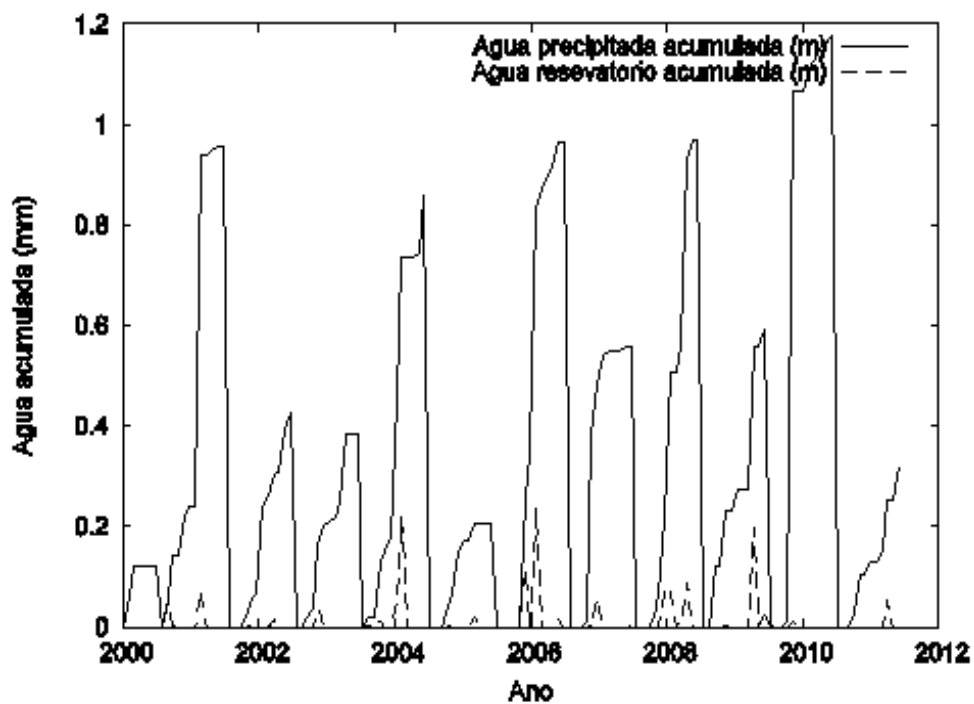


Figura 3.15: Número observado de eventos de precipitação com intensidade maior que  $0,2\text{mmh}^{-1}$ .



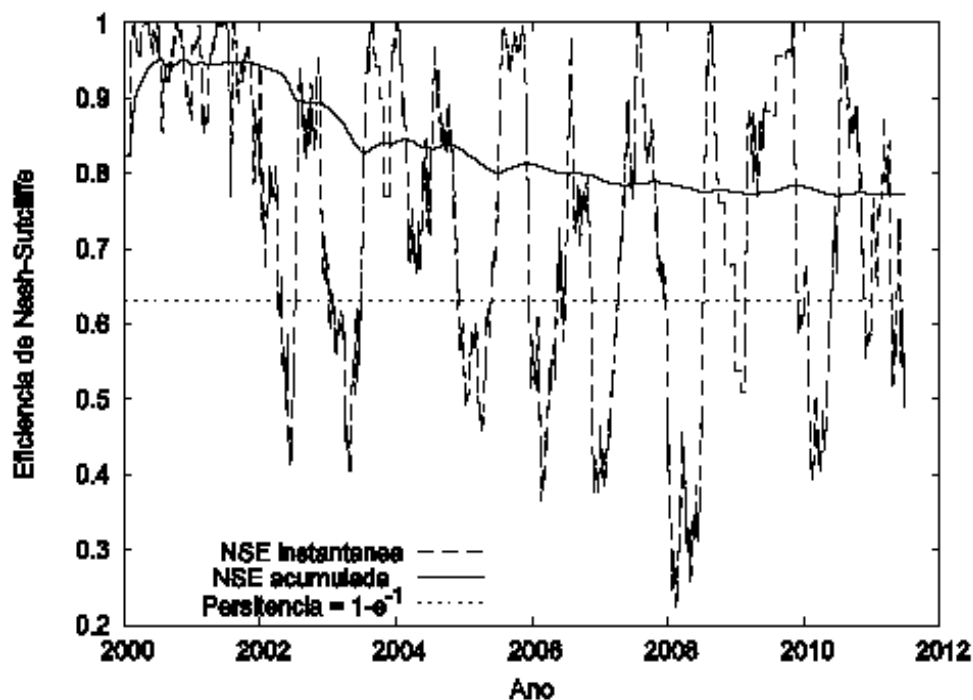
(a)



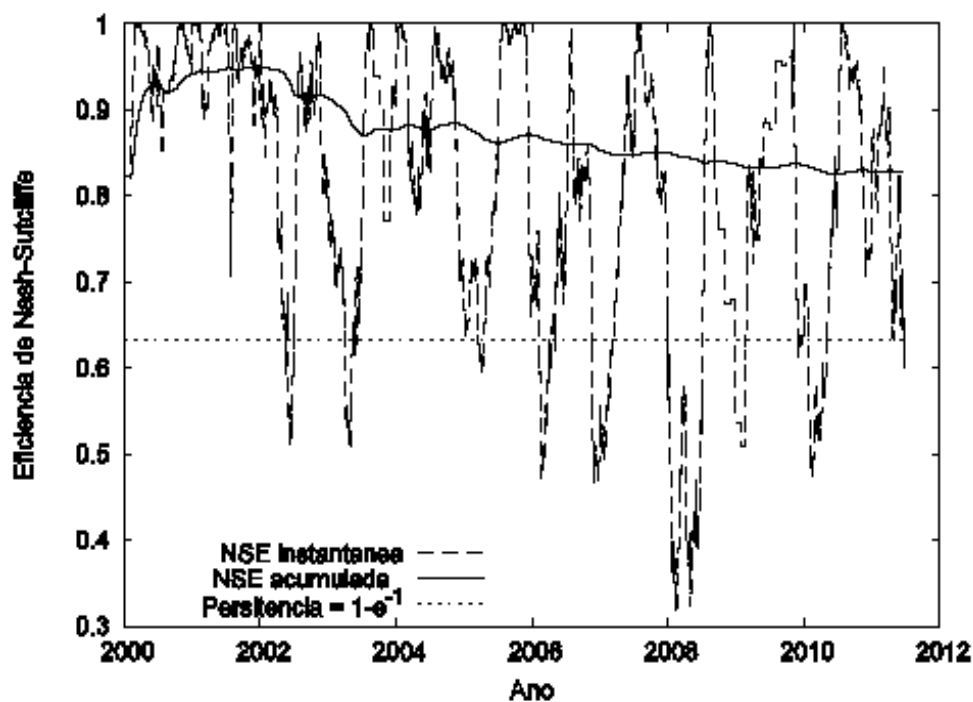
(b)

Figura 3.16: Evolução temporal do reservatório superficial de água dos criadouros: (a) com assimilação de 100% de  $R$  e (b) com assimilação de 50% de  $R$ .





(a)



(b)

**Figura 3.17:** *Evolução temporal entre 2000 e 2010 do  $\log_{10}$  do número relativo de indivíduos reinfetados durante surtos epidêmicos de dengue (simulado) e  $\log_{10}$  do número de notificações de agravos por dengue (observado), na Ilha do Governador, RMRJ. Destaca-se aqui a evolução conjunta para mostrar períodos de comportamento similar, períodos de crescimento conjunto e períodos de decrescimento conjunto. Considerou-se uma fração efetivamente susceptível de 350000 pessoas para a população da RMRJ estimada em 11 milhões. Em (a) com assimilação de 100% de  $R$  e (b) com assimilação de 50% de  $R$ .*

## Capítulo 4

# Conclusões

Este trabalho teve início com o processo investigatório dos casos notificados de hospitalização e mortalidade por dengue, obtidos junto ao SINAN-Net e ao SVS-RJ.

As variáveis atmosféricas foram obtidas a partir da NOAA-NCDC, referentes dados observacionais das Estações Meteorológicas de Superfície dos aeroportos na RMRJ mantidas pelo COMAER e a partir da rede de observação em mesoescala da precipitação na RMRJ, a cargo da GEORIO.

Os dados observacionais atmosféricos e de notificação por dengue foram analisados separadamente e após isto, foram assimilados no modelo durante as simulações.

Verificou-se a ocorrência de correlação entre os dados atmosféricos e os ciclos epidêmicos.

A simulação permitiu uma análise detalhada da dinâmica populacional dos organismos envolvidos durante eventos da doença infecciosa Dengue, considerando as populações de vírus, mosquito e humana.

Os resultados numéricos mostram a amplitude e a fase (defasagem) das taxas de infecção, através da variação de mínimos e máximos das frações da população infectados (i) e reinfectados (ir), durante ciclos epidêmicos.

Variáveis derivadas das observações (abióticas) também foram computadas para o período de investigação. Entre estas variáveis abióticas estão a variação da entropia, graus-dia, número de eventos de chuva, água acumulada nos reservatórios, etc. Abiótico não é uma categoria apropriada para a descrição geral destas variáveis, que são diretamente relacionadas à fisiologia animal e vegetal, por exemplo, via a Produção Primária Bruta (PPB) e o nível do estresse hídrico ao qual as plantas e animais consideram em diferentes ambientes ou tempos de seu desenvolvimento.

A Eficiência de Nash Sutcliffe foi determinada para avaliar as incertezas da simulação. Apesar das deficiências e da dificuldade de se reduzir a incerteza do modelo, mesmo com a assimilação das observações de variáveis atmosféricas e com a utilização do Log10, uma NSE de 63% é considerada promissora para o atual estado de desenvolvimento do modelo proposto; logo, o modelo simula bem a realidade. Até onde conhecemos da literatura, outros modelos disponíveis para a dengue não assimilam dados observacionais e também não indicaram sua Eficiência de Nash-Sutcliffe.

Com a introdução de diferentes sorotipos em uma mesma região, torna-se necessário considerar os efeitos conjuntos das reinfecções por eles produzidos na população. A ação virótica de um determinado sorotipo é potencializada pela introdução de outro sorotipo para a mesma população anteriormente infectada, como observado nas simulações feitas pelo modelo.

A altas taxas de temperatura são fatores determinantes para o aumento do número de casos notificados por dengue. Quanto à água, esta também contribui para aquele aumento. No entanto, as infecções não se encontram moduladas pela forma como se deu a distribuição e intensidade das chuvas ao longo do período reprodutivo do *Aedes aegypti*, mas sim pelo acúmulo de água nos reservatórios hidrológicos dos criadouros de mosquitos. Com isto, concluiu-se que a água é fator determinante da infecção como mantenedora da quantidade mínima necessária para eclosão dos ovos, desenvolvimento e sobrevivência dos diferentes estágios de vida do mosquito.

Quanto à relação entre entropia, graus-dia e ciclos epidêmicos, conclui-se que as transformações energéticas biológicas que envolvem os ciclos epidemiológicos seguem as leis da Termodinâmica e

os organismos vivos envolvidos no ciclo são sistemas termodinâmicos *in vivo*, pois possuem uma demanda constante de energia; bem como, destinam uma porção considerável dos seus processos bioquímicos para a aquisição e utilização dessa energia.

Observou-se ainda que a dinâmica populacional dos organismos envolvidos com a dengue variam concomitantemente com a variação espaço-temporal de entropia e de graus-dia, sendo estes fatores determinantes para os processos bioquímicos dos organismos envolvidos, uma vez que a dinâmica populacional apresentou uma boa resposta à energia disponível para os ciclos. A taxa negativa de graus-dia, assim possui alta resposta na redução dos ciclos epidemiológicos, assim como suas amplitudes máximas junto ao aumento da epidemia.

Quanto aos ciclos, observou-se que há uma defasagem do simulado em relação ao observado, principalmente no que tange ao acúmulo de água nos reservatórios dos criadouros de mosquitos. Isto provavelmente se deve ao período que antecede a infecção, uma vez que só os ovos dos mosquitos podem permanecer por um período de latência por até 450 dias.

Estudos feitos na RMRJ apontam Jacarepaguá e Barra da Tijuca como áreas com intensa atividade de UHI, coincidentemente, tais locais apresentam alto índice de casos notificados por dengue, considerando-se ainda que Jacarepaguá foi a que apresentou os maiores índices em quase todo o período de estudo. A temperatura média em Santa Cruz foi relativamente baixa, comparada àquelas localidades. No entanto, teve altos índices de casos notificados por dengue, sugerindo ser a taxa de infecção naquela localidade modulada por outros fatores. Tais locais, incluindo-se Jacarepaguá, apresentam grande área vegetada e pressupõe possíveis locais de acúmulo de água. Existem indícios de que as inter-relações da interface urbano-vegetada possuam influência sobre a dinâmica do mosquito.

As inter-relações existentes entre a superfície vegetada e superfície urbana são complexas, considerando-se nestas inter-relações fatores como evapotranspiração, disponibilidade de umidade na superfície, armazenamento de água e variação de temperatura. No entanto, tal complexidade se torna mais representativa quando se considera a ação humana, ou seja, o fator antropogênico, pois este potencializa a ação dos efeitos naturais, seja pela inserção de lixo, com consequentes potenciais locais de acúmulo de água, seja pela alteração do armazenamento de energia entre a superfície e a camada intra-urbana, através do aumento dos efeitos combinados da geometria urbana e dos processos industriais, que modificam a superfície, o transporte e o próprio balanço de energia. Há indícios de inter-relações na interface urbano-vegetada na dinâmica do mosquito junto ao Bairro de Santa Cruz.

## 4.1 Considerações Finais

Entende-se que a estratégia de combate vetorial adotada no Brasil não vem favorecendo a obtenção do impacto epidemiológico desejável, que é o de interrupção da circulação dos vírus circulantes, e nem mesmo assegura a redução do risco de introdução de outros sorotipos do vírus do dengue; no entanto, a implementação de modelos matemáticos permite um melhor entendimento a respeito da dinâmica populacional do *Aedes aegypti* e da infecção humana, permitindo uma avaliação dos pontos focais da doença e auxiliando no levantamento de possíveis hipóteses da infestação do vetor e de incidência da doença.

Os resultados gerados a partir da operacionalização de modelos computacionais, certamente, podem contribuir para ampliar o entendimento da dinâmica populacional dos organismos envolvidos sob ação do vírus da dengue, bem como para uma análise mais apurada da climatologia e micrometeorologia da RMRJ, e da dinâmica da doença infecciosa dengue, no que tange à sua dependência e à sinergia com as variáveis atmosféricas (temperatura, umidade e precipitação), os balanços de radiação, energia (incluindo-se entropia e graus-dia) e água sobre as diferentes superfícies urbanas e estados de criação do mosquito *Aedes aegypti*.

## 4.2 Sugestões de Pesquisas Futuras

Como sugestão de pesquisa, considerar-se-ia o aumento do escopo da área de estudo, sugerindo a ampliação do foco do micro modelo do Município do Rio de Janeiro para um modelo macro, por comparação de diferentes cidades e, desta forma, desenvolver-se-ia contribuições que evidenciariam as diferenças e especificidades da superfície regional, quanto à viremia e à climatologia associada.

Outro fator relevante seria, internamente a uma Metrópole, analisar a distribuição espaço-temporal simulada da infecção por Bairros e Municípios, permitindo o mapeamento e previsão de áreas de maior risco.

Em se tratando de modelagem, a modificação e consequente ajuste dos parâmetros entomológicos, considerando-se a variação da entropia, e sua referida testagem, contribuiria para a aferição do modelo e aplicação deste em diferentes escalas numéricas e espaço-temporais.

Na modelagem, poder-se-ia também forçar a assimilação no modelo da variação de dados observados de notificação por dengue e verificar a resposta induzida a esta variação, tanto junto aos dados climatológicos, quanto à dinâmica populacional humana, do vetor e dos sorotipos virais.

Como foi discutido neste trabalho, alguns apontamentos da evidência verossímil de semelhantes áreas de notificações por dengue e de intensas atividades de UHI, e devido ao pouco foco no assunto, sugere-se um estudo mais aprimorado nesta linha de forma a detalhar os fatores os quais levaram a considerar as inter-relações existentes entre apontamentos apresentados, principalmente em se tratando da interface área vegetada versus área urbana.

Há ainda a perspectiva de aplicação da metodologia e de seu desenvolvimento para a investigação comparativa dos surtos epidêmicos de duas grandes metrópoles brasileiras. Nesta perspectiva encontram-se as Regiões Metropolitanas do Rio de Janeiro e de Salvador.

Outra abordagem para o desenvolvimento é a possibilidade de uso da versão externalizada do modelo (um nó) como base de uma versão externalizada 2D (múltiplos nós com diferentes níveis de inter-relação). Assim, uma investigação da distribuição espacial dos surtos epidêmicos sobre a RMRJ seria factível, com possível desdobramento para visualização científica 2D, via Terraview/INPE, etc.

A questão da incerteza e da eficiência do modelo deve também ser aprofundada em estudos futuros. Uma possibilidade se encontra no domínio de testes de verificação entre os diferentes modelos da doença infecciosa Dengue, isto é, para os modelos já descritos na literatura. Seria necessário um encontro de modeladores, a distribuição de um conjunto básico de dados meteorológicos, como os usados neste trabalho e a definição de testes que devem ser aplicados aos resultados simulados para avaliar, entre outros indicadores de incerteza, a eficiência de Nash-Sutcliffe.

Nos próximos meses, da revisão deste trabalho deve resultar um artigo a ser submetido a revista científica, para permitir maior discussão com a comunidade de pesquisadores, e aperfeiçoamento ulterior.



# Apêndice A

## Apêndice

### A.1 Distribuição de Áreas de Planejamento na RMRJ

Área de Planejamento 1: Região I - Portuária (Bairros: Saúde, Gamboa, Santo Cristo e Cajú); Região II - Centro (Bairro Centro); Região III - Rio Comprido (Bairros: Catumbi, Rio Comprido, Cidade Nova e Estácio); Região VII - São Cristóvão (Bairros: São Cristóvão, Mangueira, Benfica e Vasco da Gama); Região XXI - Paquetá (Bairro: Paquetá) e Região XXIII - Santa Teresa (Bairro: Santa Teresa);

Área de Planejamento 2.1: Região IV - Botafogo (Bairros: Flamengo, Glória, Laranjeiras, Catete, Cosme Velho, Botafogo, Humaitá e Urca); Região V - Copacabana (Bairros: Leme e Copacabana); Região VI - Lagoa (Bairros: Ipanema, Leblon, Lagoa, Jardim Botânico, Gávea, Vidigal e São Conrado) e Região XXVII - Rocinha (Bairro: Rocinha);

Área de Planejamento 2.2: Região VIII - Tijuca (Bairros: Praça da Bandeira, Tijuca e Alto da Boa Vista); Região IX - Vila Isabel (Bairros: Maracanã, Vila Isabel, Andaraí e Grajaú);

Área de Planejamento 3.1: Região X - Ramos (Bairros: Manguinhos, Bonsucesso, Ramos, Olaria); Região XI - Penha (Bairros: Penha, Penha Circular, Brás de Pina, Cordovil, Parada de Lucas, Vigário Geral e Jardim América); Região XX - Ilha do Governador (Bairros: Ribeira, Zumbi, Cacuia, Pitangueiras, Praia da Bandeira, Cocotá, Bancários, Freguesia, Jardim Guanabara, Jardim Carioca, Tauá, Moneró, Portuguesa, Galeão e Cidade Universitária); Região XXIX - Complexo do Alemão (Bairro: Complexo do Alemão) e Região XXX - Maré (Bairro: Maré);

Área de Planejamento 3.2: Região XII - Inhaúma (Bairros: Higienópolis, Maria da Graça, Del Castilho, Inhaúma, Engenho da Rainha, Tomas Coelho); Região XIII - Méier (Bairros: São Francisco Xavier, Rocha, Riachuelo, Sampaio, Engenho Novo, Jacaré, Lins de Vasconcelos, Méier, Todos os Santos, Cachambi, Engenho de Dentro, Água Santa, Encantado, Piedade, Abolição e Pilares) e Região XXVIII - Jacarezinho (Bairros: Jacarezinho);

Área de Planejamento 3.3: Região XIV - Irajá (Bairros: Vila Kosmos, Vicente de Carvalho, Vila da Penha, Vista Alegre, Irajá e Colégio); Região XV - Madureira (Bairros: Campinho, Quintino Bocaiuva, Cavalcanti, Engenheiro Leal, Cascadura, Madureira, Vaz Lobo, Turiaçu, Rocha Miranda, Honório Gurgel, Oswaldo Cruz, Bento Ribeiro e Marechal Hermes); Região XXII - Anchieta (Bairros: Guadalupe, Anchieta, Parque Anchieta e Ricardo de Albuquerque) e Bairro XXV - Pavuna (Bairros: Coelho Neto, Acari, Barros Filho, Costa Barros, Pavuna e Parque Colúmbia);

Área de Planejamento 4: Região XVI - Jacarepaguá (Bairros: Jacarepaguá, Anil, Gardênia Azul, Curicica, Freguesia, Pechincha, Taquara, Tanque, Praça Seca e Vila Valqueire); Região XXXIV - Cidade de Deus (Bairro: Cidade de Deus) e Região XXIV - Barra da Tijuca (Bairros: Joá, Ita-

nhangá, Barra da Tijuca, Camorim, Vargem Pequena, Vargem Grande, Recreio dos Bandeirantes e Grumari);

Área de Planejamento 5.1: Região XXXIII - Realengo (Bairros: Deodoro, Vila Militar, Campo dos Afonsos, Jardim Sulacap, Magalhães Bastos e Realengo) e Região XVII - Bangu (Bairros: Padre Miguel; Bangu e Senador Camará);

Área de Planejamento 5.2; Região XVIII - Campo Grande (Bairros: Santíssimo, Campo Grande, Senador Vasconcelos, Inhoaíba e Cosmos) e Região XXVI - Guaratiba (Bairros: Guaratiba, Barra de Guaratiba e Pedra de Guaratiba); e

Área de Planejamento 5.3: Região XIX - Santa Cruz (Bairros: Paciência, Santa Cruz e Sepetiba).

# Referências Bibliográficas

- [1] CHRISTOPHERS, S. R. *Aedes aegypti (L.) The Yellow Fever Mosquito: Its Life History, Bionomics and Structure*. New York: , 1960. Fig. 49-I. xvii, 2, 3, 4, 15, 31
- [2] GATHANY, J. Center for Disease Control and Prevention. *Public Health Image Library (PHIL 8923)*. , 2006. xvii, 4
- [3] CDC. Center for Disease Control and Prevention, 1964. xvii, 5
- [4] NASA. EOS, Project Science Office, NASA Goddard Space Flight Center, 2008. xvii, 12
- [5] NASA. SRTM - The Shuttle Radar Topography Mission, 2008. xviii, 13
- [6] MARQUES FILHO, E. P.; SA, L. D. A.; KARAM, H. A.; MIRANDA, A. G.; DE A. FRANÇA, J. R. Rio de Janeiro Tropical Urban Climate. *Urban Climate News - Quarterly Newsletter of the International Association for Urban Climate*, v. 32, n. 6, p. 5–9, Jun. 2009. xviii, 15, 16
- [7] VINNYCKY, E.; WHITE, R. G. *An Introduction to Infectious Disease Modelling*. 2010. xviii, 16, 17, 18, 49, 50
- [8] WHITE, R. G.; MANDL, J. N.; GOMES, M. G.; ET AL. Understanding the transmission dynamics of respirator syncytial virus using multiple time series and nested models. *Math Biosci*, v. 209, n. 1, p. 222–239, 2007. xix, 18, 19
- [9] OKE, T. R. *Boundary Layer Climates*. 2. ed. 1987. xix, 14, 28, 29, 30, 37, 39
- [10] BRUTSAERT, W. H. *Hydrology An Introduction*. 2005. xix, 29, 32, 37
- [11] BEVEN, K. J. *Rainfall-Runo Modelling: the Primer*. 2001. xix, 33, 34
- [12] YANG, H. M.; DE LOURDES DA GRAÇA MACORIS, M.; GALVANI, K. C.; ANDRI-GUETTI, M. T. M.; WANDERLEY, D. M. V. Assessing the effects of temperature on the population of *Aedes aegypti*, the vector of dengue. *Epidemiol Infect.*, v. 137, n. 8, p. 1188–1202, Fev. 2009. xix, 21, 43, 44, 45, 46, 61, 74
- [13] LYAPUNOV, A. M. *The general problem of the stability of motion*. 1892. Tese (Doutorado em Física) - Doctoral dissertation, Univ. Kharkov. Translated by A. T. Fuller, London, 1992: Taylor & Francis, 1892. xix, 51, 52
- [14] BRAGA, I. A.; VALLE, D. *Aedes aegypti: histórico do controle no Brasil*. Technical Report 2, Epidemiologia e Serviços de Saúde. Programa Nacional de Controle da Dengue - SVS/MS, Brasília, DF, Jun. 2007. 1, 2
- [15] BRASIL. *Guia de Vigilância Epidemiológica*. Departamento de Vigilância Epidemiológica, Secretaria de Vigilância em Saúde-Ministério da Saúde (SVS-MS), Brasília, DF, 6. ed., 2005. versão ampl. 1, 2
- [16] BRASIL. *Portaria n.º 5*. Departamento de Vigilância Epidemiológica, Secretaria de Vigilância em Saúde-Ministério da Saúde (SVS-MS), Brasília, DF, Fev. 2006. Diário Oficial da União - DOU, Seção 1, n.º 38. 2, 5



- [17] FERREIRA, C. P.; YANG, H. M. Estudo da Transmissão da Dengue entre os Indivíduos em Interação com a População de Mosquitos *Aedes aegypti*. *TEMA, Tend. Mat. Apl. Comput.*, v. 4, n. 3, p. 323–332, 2003. 2, 4, 20, 21, 39
- [18] OTERO, M.; SOLARI, H. G.; SCHWEIGMANN, N. A Stochastic Population Dynamics Model for *Aedes Aegypti*: Formulation and Application to a City with Temperate Climate. *Bulletin of Mathematical Biology*, v. 68, n. 8, p. 1945–1974, Jul. 2006. 2, 20, 21, 43
- [19] LIMA-CAMARA, T. N.; BRUNO, R. V.; LUZ, P. M.; CASTRO, M. G.; LOURENÇO-DE OLIVEIRA, R.; SORGINE, M. H. F.; PEIXOTO, A. A. Dengue Infection Increases the Locomotor Activity of *Aedes aegypti* Females. *PLoS ONE*, v. 6, n. 3, p. 15, 2011. 2
- [20] AGUIAR, R. Notícias do IOC. *Instituto Oswaldo Cruz (IOC-FIOCRUZ)*, Jan. 2006. 5
- [21] CODEÇO, C. T.; LELE, S.; PASCUAL, M.; BOUMA, M.; KO, A. I. A Stochastic model for ecological systems with strong nonlinear response to environmental drivers: application to two water-borne diseases. *Journal of The Royal Society Interface*, v. 5, n. 19, p. 247–252, Fev. 2008. 5, 20, 21
- [22] LIMA, C. P. *Resistência de bactérias lácticas a bacteriógrafos isolados na produção de queijos de coalho no Ceará*. 2010. p. 64. Dissertação (Mestrado em Física) - M.S. thesis, Departamento de Tecnologia de Alimentos, UFCE, 2010. 5
- [23] CANCHAYA, C.; PROUX, C.; FOURNOUS, G.; BRUTTIN, A.; BRÜSSOW, H. Prophage Genomics. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.*, v. 67, n. 2, p. 64, June 2003. 5
- [24] BARRETO, M. L.; G. TEIXEIRA, M. Dengue no Brasil: situação epidemiológica e contribuições para uma agenda de pesquisa. *Estudos avançados*, v. 22, n. 64, p. 53–72, 2008. 6
- [25] BRASIL. Séries Estatísticas e Séries Históricas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE. *IBGE*, 2012. 7
- [26] BRASIL. Indicadores Demográficos do Brasil. *Ministério da Saúde-MS*, 2006. 7
- [27] BRASIL. Ranking decrescente do IDH-M das regiões metropolitanas do Brasil. *Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD)*, 2000. 7
- [28] MORAES, L. E. S.; GHERARDI, D. F. M.; FONSECA, L. M. G. Análise multi-temporal da cobertura vegetal do tipo manguezal da APA de Guapimirim (RJ) através do processamento de imagens TM-LANDSAT. *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, INPE*, p. 4615–4622, Abr. 2009. 7
- [29] MARQUES, V.; WASHINGTON, D. G.; SUCHAROV, E. C. Caracterização climática do Estado do Rio de Janeiro: relatório COPPE. *Relatório COPPE. Rio de Janeiro*, p. 65, 1988. 12
- [30] DEREZYNSKI, C. P.; DE OLIVEIRA, J. S.; MACHADO, C. O. Climatologia da Precipitação no Município do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 1, p. 24–38, 2009. 12
- [31] MARQUES, V.; WASHINGTON, D. G.; SUCHAROV, E. C. Anomalias de precipitação no Estado do Rio de Janeiro. In: *Anais do CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA. Belo Horizonte*, , n. 8, p. 157–60, 1994. 12
- [32] BRIGDMAN, H. A.; OLIVER, J. E. *The Global Climate System Patterns, Processes, and Teleconnections*. 2006. 12, 14, 29
- [33] TALJAARD, J. J. Physical Features of the southern Hemisphere. *Meteorological Monographs - AMS*, v. 13, n. 35, p. 1–8, 1972. 14

- [34] CARDOSO, R. M. M.; KARAM, H. A.; AZEVEDO, J. P. S. Kinematics of wind field metropolitan area of Rio de Janeiro and its relationships with thunderstorms development in the afternoon. *A ser submetido a Revista Brasileira de Meteorologia RBMET em 2012*, 2012. 15
- [35] SHARPE, P. J. H.; DEMICHELE, D. W. Reaction kinetics of poikilotherm development. *Original Research Article Journal of Theoretical Biology, Issue 4*, v. 64, p. 649–670, Fev. 1977. 21
- [36] BIRD, R.; HLSTROM, R. L. A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces. 1981. 25
- [37] IQBAL, M. *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, 1983. 25, 26
- [38] BOLTON, D. The computation of equivalent potential temperature. *Monthly Weather Review*, v. 108, p. 1046–1053, 1980. 26
- [39] ALLISON, P. D. *Missing Data (Quantitative Applications in the Social Sciences)*. 1. ed. Sage Publications, Inc, Ago. 2001. 27
- [40] TUCCI, C. E. M.; DA SILVEIRA, A. L. L.; ET AL. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 4. ed. Porto Alegre, RS: , 2009. v. 4. 28
- [41] NASH, J. E. Systematic Determination of Unit Hydrograph Parameters. *Journal of Geophysical Research*, Washinton, v. 64, n. 1, p. 111–115, 1959. 33, 35, 36
- [42] PIOVEZAN, R. *Levantamento de Larvas de Culicidae (Diptera) em diferentes criadouros no Município de Santa Bárbara D'oeste, SP*. Set. 2009. Dissertação (Mestrado em Física) - Dissertação de Mestrado em Zoologia-UNESP. Rio Claro, SP, Set. 2009. 33
- [43] WILKS, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2. ed. International Geophysics Series, 2006. 36
- [44] PRESS, W. H.; FLANNERY, B. P.; TEUKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T. *Numerical Recipes - The Art of Scientific Computing (FORTRAN Version)*. 1989. 36
- [45] PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Royal Society of London*, v. 193, p. 120–145, 1948. 36, 37, 38
- [46] THOM, A. S.; OLIVER, H. R. On Penman's Equation for Estimating regional Evaporation. *Quart. J. R. Met. Soc.*, v. 103, p. 345–357, 1977. 36
- [47] MONTEITH, J.; UNSWORTH, M. *Principles of Environmental Physics*. 3. ed. Nov. 2007. 36, 37, 39
- [48] KARAM, H. A.; FILHO, A. J. P. Revisão dos métodos de Penman e Penman-Monteith e sua aplicação a cânions urbanos. *Revista Brasileira de Meteorologia, RBMET, ISSN: 0102-7786*, v. 21, n. 1, p. 86–106, 2006. 37, 39
- [49] BORGES, A. C.; MEDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga, SP. *XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos-João Pessoa, PB*, Nov. 2005. 37
- [50] VEPRASKAS, M. J.; HUFFMAN, R. L.; KREISER, G. S. Hidrologic models for altered landscapes. *GEODERMA*, v. 131, n. 3, p. 287–298, 2006. 37
- [51] MARQUES FILHO, E. P.; SA, L. D. A.; KARAM, H. A.; ALVARA, R. C. S.; SOUZA, A.; PEREIRA, M. M. R. Formulation of a tropical town energy budget (t-TEB) scheme. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 101, n. 1-2, p. 109–120, 2008. 37

- [52] ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. *Guidelines for Computing crop water requirements. Irrigation and Drainage paper 56*. FAO56 - FAORome, Roma, 1. ed., 1998. 37
- [53] GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. *Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS)*. 2002. v. 41. 37
- [54] MALTHUS, T. R. *An essay on the principle of population*. 1798. v. 25, Chapter VII. 40
- [55] VERHULST, P.-F. Recherches mathématiques sur la loi d'accroissement de la population. *Nouv. mém. de l'Academie Royale des Sci. et Belles-Lettres de Bruxelles*, , n. 18, p. 1–41, 1845. 40, 41
- [56] PINGLE, M. Introducing Dynamic Analysis Using Malthus's Principle of Population. *Journal of Economic. Education, winter.Bulle spéculative*, p. 3–20, 2003. 40
- [57] SODRÉ, U. Crescimento Populacional. *Matemática-UEL*, p. 15, Jun. 2007. 40, 41
- [58] YANG, H. M.; DE LOURDES DA GRAÇA MACORIS, M.; GALVANI, K. C.; ANDRIGUETTI, M. T. M. Dinâmica da Transmissão da Dengue com dados Entomológicos Temperatura-dependentes. *TEMA, Tend. Mat. Aplic. e Comput.*, v. 8, n. 1, p. 159–168, 2007. 48
- [59] DA SILVA, M. B.; LUCIO, P. S.; DO NASCIMENTO, K. J. S.; DA SILVA MATOS, K. C. Modelando o Risco de Transmissão da Dengue via Equações Diferenciais Estocásticas. *XIX SINAPE*, Jul. 2010. 48
- [60] DIEKMANN, O.; HEESTERBEEK, J. A. *Mathematical Epidemiology of infectious diseases: model building analysis and interpretation*. Chischester: John Wiley, 2000. 50
- [61] BECKER, N. *Analysis of infectious disease data*. Chapman and Hall, 1989. 50
- [62] CASTRUCCI, P. B. L.; CURTI, R. Sistemas não-lineares (série controle automático de sistemas dinâmicos). *Ed. Edgard Blucher LTDA. São Paulo - SP*, v. 2, p. 1–156, 1981. 51
- [63] KISTER, R. E. *A study of data assimilation techniques in an autobarotropic primitive equation channel model*. 1974. p. 84. Dissertação (Mestrado em Física) - M.S. thesis, Dept. of Meteorology, The Penn. State University, 1974. 53
- [64] HALTINER, G. J.; WILLIAMS, R. T. *Numerical Prediction and Dynamic Meteorology*. 2. ed. 1980. 53
- [65] GUIMARÃES, R.; SARFIELD CABRAL, J. *Estatística Segunda Edição*. 2. ed. 2007. 54, 56
- [66] SINGH, J.; KNAPP, H. V.; DEMISSIE, M. *Hydrologic modelling of the Iroquois River watershed using HPSF and SWAT*. Champaign, Ill.: Illinois State Water Survey: , 2004. 57
- [67] CHU, T. W.; SHIRMOHAMMADI, A. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. *Trans ASAE*, v. 47, n. 4, p. 1057–1073, 2004. 57
- [68] VAZQUEZ–AMÁBILE, G. G.; ENGEL, B. A. Use of SWAT to compute groundwater table depth and streamflow in the Muscatatuck River watershed. *Trans. ASAE*, v. 48, n. 3, p. 991–1003, 2005. 57
- [69] KALNAY, E. *Atmospheric modeling, data assimilation and predictability*. Cambridge University Press; 1st. edition (December 16, 2002), 2002. ISBN-10: 0521796296, ISBN-13: 978-0521796293. 57

- [70] NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970. 58
- [71] KENDALL, M.; STUART, A. *The Advanced Theory of Statistics*. 4. ed. London, 1977. v. 2. 58
- [72] ATLAN, H. *Entre o cristal e a fumaça: Ensaio sobre a organização do ser vivo*. 1992. 59
- [73] MURPHY, M. P.; O'NEILL, L. A. J. Organizadores. Trad: Laura C. B. de Oliveira. O que é vida? 50 anos depois. Especulações sobre o futuro da Biologia. *São Paulo: Fundação Editora da UNESP*, 1997. 59
- [74] BRUNINI, O.; LISBÃO, R. S.; BERNARDI, J. B.; FORNASIER, J. B.; JÚNIOR, M. J. P. Temperatura-base para alface cultivar "White Boston", em um sistema de unidades térmicas. *Bragantia, Campinas, SP*, v. 3, n. 19, p. 213–219, 1976. 59
- [75] ROPELEWSKI, C. F.; JONES, P. D. An estension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation index. *Monthly Weather Review*, , n. 115, p. 2161–2165, 1987. 73

# Índice Remissivo

- Áreas de Planejamento na RMRJ, 91
- Índice de Oscilação Sul, 73
- Ajuste linear de precipitação, 66
- Análise das notificações
  - Variáveis de Saúde
    - Agravos por dengue, 68
- Análise de dupla massa, 28
- Análise de variância (ANOVA), 54
- Análise dos dados
  - observações atmosféricas, 61
- ANOVA para precipitação, 68
- apêndice, 91
- Assimilação de dados
  - Relaxação newtoniana (nudging)
    - Ciclo de assimilação, 52
- Balanco de água, 29
- Balanco de energia, 28
- Breve Histórico
  - Dengue no Brasil, 5
  - Modelos matemáticos para a Dengue, 16
- Caracterização da RMRJ
  - Clima na RMRJ, 6
- CD, *veja* Desenvolvimento Cumulativo Diário
- coeficiente de correlação
  - Pearson, 58
- COMAER, *veja* Comando da Aeronáutica
- Considerações Preliminares, 20
- Contribuições ao problema, 22
- Criadouros, 31, 36
  - Solução numérica, 36
- Eficiência de Nash-Sutcliffe, 82
- entropia
  - Graus-dia, 59
- Estação
  - de Superfície, 26
- Estabilidade do sistema de equações diferenciais parciais
  - Teorema de Lyapunov, 51
- Estrutura do trabalho, 23
- Evapotranspiração
  - Método de Penman-Monteith, 38
- Evapotranspiração potencial, 36
  - Método de Penman, 36
- FD, *veja* Febre do Dengue
- FHD, *veja* Febre Hemorrágica do Dengue
- fontes de dados, 25
- FUNASA, *veja* Fundação Nacional de Saúde
- Graus dia, 59
- Introdução, 1
- Modelagem de doença infecciosa
  - Dinâmica da população
    - Modelo de Malthus, 40
    - Modelo de Verhulst, 40
  - Dinâmica da população de vírus, 40
  - Dinâmica da população de vírus da Dengue
    - Modelo de Verhulst, 41
  - Dinâmica da população do mosquito *Aedes aegypti*, 41
  - Dinâmica da população humana, 44
  - Dinâmica de populações, 39
- modelos estudados, 20
- MS, *veja* Ministério da Saúde
- Objetivos, 22
- OMM, *veja* Organização Meteorológica Mundial
- Parâmetros entomológicos, 43
  - Função da temperatura, 43
- PH, *veja* Potencial Hidrogeniônico
- Posto Telepluviométrico (Fundação Geo-Rio), 26
- preparação de dados, 27
- Relaxação newtoniana
  - Assimilação tipo *Nudging*, 53
- Reprodutividade basal
  - Saldo líquido de reprodução, 48
- Reservatório linear superficial
  - Teoria, 31
- Retrospectiva dos modelos para a Dengue, 20
- RSV, *veja* 97

- SCD, *veja* Síndrome do Choque da Dengue
- Simulações, 74
- Sincronização das observações, 28
- SUS, *veja* Sistema Único de Saúde
- SVS, *veja* Serviço de Vigilância Epidemiológica
  
- Temperatura média nas EMS, 63
- Teorema de Lyapunov
  - Função de Lyapunov, 51
  
- UHI, *veja* Ilhas de Calor Urbanas
- Uma perspectiva pessoal
  - de paciente à pesquisador, 22
- Umidade relativa média nas EMS, 64
  
- Variáveis Atmosféricas
  - Precipitação, 66
  - Temperatura, 61
  - Umidade Relativa, 64
- Variáveis atmosféricas à superfície, 61
- Varição da entropia, 59
- Verificação das incertezas da simulação
  - Eficiência de Nash-Sutcliffe, 56
  - Inovação, 56
  - Raiz do erro quadrático médio, 56