

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA POLITÉCNICA
BACHAREL EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Emanoel Aurelio Vianna Fabiano

**Simulação epidemiológica da disseminação da febre amarela usando
sistemas multiagentes e técnicas de geoprocessamento**

Porto Alegre

2018

Emanoel Aurelio Vianna Fabiano

**Simulação epidemiológica da disseminação da febre amarela usando
sistemas multiagentes e técnicas de geoprocessamento**

Trabalho de Conclusão I apresentado como
requisito parcial à obtenção do grau de Bacha-
rel em Ciência da Computação na Pontifícia
Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Heitor Bordini

Porto Alegre

2018

Resumo

No Brasil, um dos principais desafios na área da saúde pública está relacionado ao controle de ocorrências frequentes de epidemias, compreender e entender essas ocorrências é essencial para analisar e executar medidas de prevenção e controle. Os modelos epidemiológicos matemáticos são bem conhecidos e utilizados para esse propósito, porém são de difícil implementação e falham na captura de questões como mobilidade e distribuição do agente transmissor, assim como em questões geográficas e meteorológicas, principal fator que influencia na disseminação da epidemia. Partindo-se desse pensamento, as simulações computacionais são importantes ferramentas de apoio.

Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de uma simulação do comportamento epidemiológico baseado em Sistemas Multiagentes, método que já demonstrou em trabalhos estudados ser capaz de gerar resultados satisfatórios em comparação com os modelos matemáticos. Mas no entanto, a representação do ambiente em muitos trabalhos relacionados é simples, o que acaba deixando uma carência em relação à análise também sobre o ambiente onde está ocorrendo o surto epidemiológico. Nestes termos, este trabalho procura utilizar técnicas de Geoprocessamento para desenvolver um ambiente mais rico, explorando a dinâmica espaço-tempo da disseminação da epidemia a ser estudada.

Palavras-chaves: Epidemiologia, Simulação Epidemiológica, Sistemas Multiagentes, Geoprocessamento, Geosimulações.

Abstract

In Brazil, the main challenges in the area of public health are related to the control of frequent occurrences of epidemics, to understand and to realize the occurrences is essential for the accomplishment of prevention and control actions. Mathematical epidemiological models are well known and used for the purpose, but are difficult to implement and fail to capture data such as the mobility and distribution of the agent, as well as geographic and meteorological issues, the main factor that influences the spread of the epidemic. Starting from the thought, the computational simulations are important tools of support.

This work aims to present the development of an epidemiological behavior based on Multiagent Systems, which has already demonstrated with positive results in relation to mathematical models. However, representation of the environment in many cases is simple, which does not allow for a critical analysis of the relationship between science and the environment. In these terms, the objective is to use geoprocessing techniques to develop a richer environment, exploring the space of the spread of the epidemic to be studied.

Key-words: Epidemiology, Epidemiological Simulation, Multiagent Systems, Geoprocessing, Geosimulations.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Diagrama geral do modelo SIR. Fonte: (ROCHA, 2012)	22
Figura 2 – Diagrama geral do modelo SEIR. Fonte: (ROCHA, 2012)	22
Figura 3 – Modelo geral de um Agente. Fonte: (RUSSELL; NORVIG, 2004)	23
Figura 4 – Etapas do processo de simulação. Fonte: (GRIGOLETTI, 2007)	25
Figura 5 – Infecção sobre o agente humano. Adaptada de (ZHAO et al., 2018) . .	38
Figura 6 – Infecção sobre o agente mosquito. Adaptada de (ZHAO et al., 2018) . .	42
Figura 7 – Ciclo da infecção sobre os agentes. Adaptada de (ZHAO et al., 2018) .	43
Figura 8 – Comportamento do agente humano	44
Figura 9 – Comportamento do agente mosquito. Adaptada de (JINDAL; RAO, 2017)	45
Figura 10 – Estimador de densidade Kernel da distribuição da abundância de fêmeas de <i>Aedes aegypti</i> capturadas pela MosquiTRAP em Porto Alegre (RS): a) 2012, b) 2013, c) 2014. Fonte: (FERREIRA, 2015)	48
Figura 11 – Representação do ambiente, trecho de um dos bairros escolhidos	49
Figura 12 – Representação do ambiente, identificação de pontos de interesse	50
Figura 13 – Representação dos agentes humanos sobre o ambiente	51
Figura 14 – Representação dos focos sobre o ambiente	52
Figura 15 – Temperaturas mínima, média, máxima, da umidade e da precipitação acumulada de Porto Alegre (RS). Adaptado de (FERREIRA, 2015) . .	53
Figura 16 – Captura média de fêmeas de <i>Aedes aegypti</i> pela MosquiTRAP por semana nos bairros monitorados pelo MI-Dengue em Porto Alegre (RS). (Outubro de 2012 a maio de 2014). Fonte: (FERREIRA, 2015)	56
Figura 17 – Estimador de densidade Kernel da distribuição da abundância de fêmeas de <i>Aedes aegypti</i> capturadas pela MosquiTRAP em Porto Alegre em 2013. Fonte: (FERREIRA, 2015)	56
Figura 18 – Cronograma previsto para as atividades no TCC I	60
Figura 19 – Cronograma previsto para as atividades no TCC II	61

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparativo dos trabalhos relacionados estudados	29
Tabela 2 – Parâmetros do agente humano. Adaptada de (JINDAL; RAO, 2017) . .	36
Tabela 3 – Parâmetros da infecção em agentes humanos. Adaptada de (ZHAO et al., 2018)	38
Tabela 4 – Parâmetros de comportamento do agente mosquito. Adaptada de (JINDAL; RAO, 2017)	41
Tabela 5 – Parâmetros da infecção em agentes mosquito. Adaptada de (ZHAO et al., 2018)	42
Tabela 6 – Parâmetros da infecção sobre os agentes. Adaptada de (ZHAO et al., 2018)	43

Lista de abreviaturas e siglas

AAS	Ácido acetilsalicílico
GIS	Sistemas de Informação Geográfica
OMS	Organização Mundial de Saúde
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
UTI	Unidade de Terapia Intensiva
SEIR	<i>Epidemiological Model Susceptible, Exposed, Infected and Recovered</i>
SIR	<i>Epidemiological Model Susceptible, Infected and Recovered</i>
SMA	Sistemas Multiagentes
SUS	Sistema Único de Saúde

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Motivação	17
1.2	Objetivos do trabalho	17
1.3	Descrição da estrutura do trabalho	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Epidemiologia	19
2.1.1	<i>O Aedes aegypti</i>	19
2.1.2	Febre amarela	20
2.1.2.1	Formas de transmissão	20
2.1.2.2	Principais sintomas	20
2.1.2.3	Tratamento	21
2.1.2.4	Meios para prevenção	21
2.2	Modelos epidemiológicos matemáticos	21
2.2.1	SIR Model	21
2.2.2	SEIR Model	22
2.3	Inteligência artificial	22
2.3.1	Agentes inteligentes	23
2.3.2	Agentes reativos	24
2.3.3	Agentes com aprendizagem	24
2.4	Sistemas Multiagentes	24
2.5	Simulações	24
2.5.1	Simulação em Sistemas Multiagentes	25
2.5.2	Simulações na área de Geoprocessamento	26
2.6	Ferramentas e Tecnologias de Desenvolvimento	26
2.6.1	<i>MASON</i>	26
2.6.2	<i>GeoMason</i>	26
3	TRABALHOS RELACIONADOS	29
4	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	31
4.1	Dificuldades na utilização dos modelos matemáticos	31
4.2	Identificação de oportunidade	31
5	PROPOSTA	33
5.1	Objetivo Geral	33

5.2	Objetivos Específicos	33
6	MODELO CONCEITUAL	35
6.1	Agente humano	35
6.1.1	Comportamento e características	36
6.1.1.1	Funcionamento da sociedade	36
6.1.1.2	Busca de recursos médicos	37
6.1.2	Disseminação da doença sobre o agente humano	37
6.2	Agente Mosquito	39
6.2.1	Comportamento e características	39
6.2.1.1	Processo de reprodução e ciclo de vida	40
6.2.2	Disseminação da doença sobre o agente mosquito	41
6.3	Formas de transmissão entre agentes	42
7	SIMULAÇÃO	47
7.1	Área de estudo	47
7.1.1	Monitoramento sobre o <i>Aedes aegypti</i>	47
7.2	Ambiente	48
7.2.1	Representação da região	48
7.2.1.1	Sobreposição com informações reais	49
7.2.2	Interação do agente humano com o ambiente	50
7.2.2.1	Locomoção dos agentes sobre o ambiente	50
7.2.3	Interação do agente mosquito com o ambiente	51
7.2.3.1	Focos de reprodução do mosquito	51
7.2.4	Representação do clima	52
7.2.5	Representação do período do tempo sobre o ambiente	53
8	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	55
8.1	Experimento de parametrização sobre o mosquito	55
8.1.1	Formas de avaliação dos resultados	55
8.2	Estudo de caso	57
8.2.1	Formas de avaliação dos resultados	57
9	PLANEJAMENTO	59
9.1	Atividades planejadas sobre o trabalho de conclusão I	59
9.1.1	Cronograma	60
9.2	Atividades planejadas sobre o trabalho de conclusão II	60
9.2.1	Cronograma	61
10	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
10.1	Dificuldades Encontradas	63

10.2	Solução desenvolvida	63
10.3	Conclusão	63
	REFERÊNCIAS	65

1 Introdução

Nos últimos anos, doenças epidemiológicas estão apresentando um papel agravante na saúde pública mundial. Doenças como dengue, AIDS, Ébola e também outras doenças consideradas erradicadas como a febre amarela estão voltando a aparecer em forma de surtos e epidemias (G1, 2018). O Brasil, como um país de clima tropical e em desenvolvimento acaba sofrendo frequentemente situações relacionadas, a dengue é um exemplo frequente de ocorrências no país, principalmente durante o período do verão, onde a proliferação do mosquito transmissor *Aedes aegypti* é maior (INSTITUTO OSWALDO CRUZ, 2018).

1.1 Motivação

Na atual situação brasileira, onde o controle para uma das principais doenças epidemiológicas como a febre amarela estão previstos custos de pelo menos US\$ 2,3 bilhões (R\$ 7,3 bilhões) ao longo de dez anos para a compra de vacinas, além dos gastos operacionais, segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS) (ESTADÃO, 2018). Os modelos e sistemas computacionais tornaram-se uma importante ferramenta para entender como ocorre o surto das doenças através de análises da propagação dessas em uma determinada população. A grande motivação para o trabalho proposto é a determinação da ocorrência desses surto epidemiológico na população, procurando por formas de intervenção e controle. Assim, por meio desses modelos, podemos elaborar e testar hipóteses que auxiliem o entendimento da disseminação dessas epidemias.

1.2 Objetivos do trabalho

Este trabalho se propõe a desenvolver uma simulação epidemiológica da disseminação da febre amarela. Utiliza técnicas de inteligência artificial, em específico um modelo Sistema Multiagente (SMA) baseado no modelo *Susceptible-Exposed-Infected-Recovered* (SEIR), um dos mais utilizados modelos matemáticos para análise e compreensão de epidemias e com auxílio de técnicas de Geoprocessamento, busca desenvolver um modelo realista para a representação do ambiente da simulação. Ao final, verifica a forma como a epidemia estudada age sobre o ambiente e, conseqüentemente, auxilia no processo de decisão em relação ao combate.

1.3 Descrição da estrutura do trabalho

Este artigo está organizado da seguinte forma: A seção 2 apresenta a fundamentação teórica. Aponta algumas características da representação do comportamento epidemiológico. Também apresenta o conceito dos agentes em inteligência artificial e ao final são apresentados conceitos sobre simulação e geoprocessamento, além de ferramentas utilizadas durante o desenvolvimento do trabalho proposto. A seção 3 traz trabalhos relacionados, apresentando um comparativo entre os trabalhos estudados. A seção 4 descreve a caracterização do problema. Na seção 5 são apresentados maiores detalhes sobre a proposta do trabalho, sua abrangência e cenários. Na seção 6 é descrito o modelo conceitual utilizado como base para o desenvolvimento. A seção 7 descreve medidas e critérios para o desenvolvimento da simulação. Na seção 8 é descrito os experimentos computacionais e as formas de avaliação dos resultados. Por fim na seção 9 destaca-se o cronograma cumprido durante o semestre de elaboração do trabalho de conclusão I, além do cronograma previsto para o desenvolvimento do trabalho de conclusão II.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Epidemiologia

Segundo (J. LAST, 1995): "*Epidemiologia é o estudo da frequência, da distribuição e dos determinantes dos estados ou eventos relacionados à saúde em específicas populações e a aplicação desses estudos no controle dos problemas de saúde.*" (GORDIS, 2010). Sendo bastante difícil definir a epidemiologia de forma única e precisa, em um modo geral podemos compreender como a ciência que estuda a distribuição das enfermidades e suas causas na população humana. Deste modo, um dos principais pilares da saúde pública.

Na epidemiologia são utilizadas 3 diferentes classificações de forma a entender a distribuição de uma doença em uma população (TIETZMANN, 2015):

- Endemia: Definida como a presença habitual de uma doença, dentro dos limites esperados, em uma determinada área geográfica, por um período de tempo ilimitado. Igualmente refere-se à ocorrência usual de uma determinada doença, dentro de uma área. O termo implica uma situação estável;
- Epidemia: Originalmente usado para descrever um súbito e imprevisível aumento no número de casos de uma doença infecciosa em uma população. No entanto, na Epidemiologia moderna, considera-se uma epidemia a ocorrência de uma doença, transmissível ou não, em patamares acima dos limites esperados para o período em questão, isto é, acima do nível endêmico;
- Pandemia: Em uma escala de gravidade, é o pior dos cenários. É a ocorrência de determinada epidemia que se estende a níveis mundiais, ou seja, se espalha por diversas regiões do planeta.

2.1.1 O *Aedes aegypti*

O principal vetor de transmissão na grande maioria de casos de epidemia no Brasil é o mosquito *Aedes aegypti*, de origem africana, foi reconhecido pela primeira vez na Egito. Chegou no Brasil através dos navios negreiros na época da colonização do país. Após o trabalho de erradicação da febre amarela realizada no início do século passado, o *Aedes aegypti* chegou a ser dado como erradicado durante a Era Vargas (MAGALHÃES, 2016). Mas com a chegada da industrialização e urbanização acelerada do país a erradicação não durou muito.

O mosquito foi reconhecido como transmissor da febre amarela em 1881, por Carlos J. Finlay. Em 1906, Brancroft publicou as primeiras evidências de que o mosquito também era o vetor de dengue, fato posteriormente confirmado por Agramonte, em 1906, e por Simmons, em 1931 (BRAGA; VALLE, 2007).

2.1.2 Febre amarela

A febre amarela é uma doença infecciosa não contagiosa que se mantém endêmica nas florestas tropicais da América do Sul e na África, sendo transmitida ao homem mediante a picada de insetos, em especial o *Aedes aegypti*. Sua mortalidade situa-se entre 5-10%, percentual elevado quando comparado a outras viroses. Além disso, não há medicamento específico para o tratamento da doença, por outro lado existem métodos de prevenção, sendo a vacinação o mais eficiente método até momento (VASCONCELOS, 2003). O Brasil, nos últimos meses, apresentou aumento significativo na taxa de incidência de casos suspeitos e confirmados de febre amarela (G1, 2018).

2.1.2.1 Formas de transmissão

O vírus da febre amarela é transmitido pela picada dos mosquitos transmissores infectados, a doença não é passada de pessoa a pessoa. Existem dois diferentes ciclos epidemiológicos de transmissão, o silvestre e o urbano. Em um modo geral a doença tem as mesmas características sob o ponto de vista etiológico, clínico, imunológico e fisiopatológico. No ciclo silvestre da febre amarela, os primatas não humanos (macacos) são os principais hospedeiros e amplificadores do vírus e os vetores são mosquitos com hábitos estritamente silvestres, sendo os gêneros *Haemagogus* e *Sabethes* os mais importantes na América Latina. Nesse ciclo, o homem participa como um hospedeiro acidental ao adentrar áreas de mata. No ciclo urbano, o homem é o único hospedeiro com importância epidemiológica e a transmissão ocorre a partir de vetores urbanos (*Aedes aegypti*) infectados (MAGALHÃES, 2016; MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2018).

2.1.2.2 Principais sintomas

Os sintomas iniciais da febre amarela incluem o início súbito de febre, calafrios, dor de cabeça intensa, dores nas costas, dores no corpo em geral, náuseas e vômitos, fadiga e fraqueza. A maioria das pessoas melhora após estes sintomas iniciais. No entanto, cerca de 15% apresentam um breve período de horas a um dia sem sintomas e, então, desenvolvem uma forma mais grave da doença.

Em casos graves, a pessoa pode desenvolver febre alta, icterícia (coloração amarelada da pele e do branco dos olhos), hemorragia (especialmente a partir do trato gastrointestinal) e, eventualmente, choque e insuficiência de múltiplos órgãos. Cerca de 20% a 50% das

peessoas que desenvolvem doença grave podem morrer. Sendo somente um médico é capaz de diagnosticar e tratar corretamente a doença (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2018).

2.1.2.3 Tratamento

O tratamento é apenas sintomático, com cuidadosa assistência ao paciente que deve permanecer em repouso, com reposição de líquidos e das perdas sanguíneas, quando indicado. Nas formas graves, o paciente normalmente é atendido em Unidade de Terapia Intensiva (UTI), para reduzir as complicações e o risco de óbito, onde medicamentos salicilatos devem ser evitados (AAS e Aspirina).

2.1.2.4 Meios para prevenção

A melhor forma de prevenção é por meio da vacinação, o Sistema Único de Saúde (SUS) oferta vacina contra febre amarela para a população durante todo o ano. No Brasil é adotado o esquema vacinal de apenas uma dose durante toda a vida, medida que está de acordo com as recomendações da Organização Mundial de Saúde (OMS).

2.2 Modelos epidemiológicos matemáticos

A modelagem matemática de epidemias apresenta grande relevância para a área de epidemiologia. Possibilita uma melhor compreensão do desenvolvimento da doença na população e permitir analisar o impacto de medidas de controle e erradicação (ROCHA, 2012). Com os modelos, podemos construir a dinâmica evolutiva da disseminação. Isso é feito através do conhecimento dos mecanismos de funcionamento dessas doenças, como o ciclo de transmissão, período de incubação, período infeccioso, transmissão da doença, entre outros.

Nos tópicos seguintes, são apresentados dois dos principais modelos matemáticos. No entanto, existem outros modelos matemáticos, cuja compreensão e uso foge do escopo deste trabalho.

2.2.1 SIR Model

O modelo *Epidemiological Model Susceptible, Infected and Recovered* (SIR) proposto por *Kermack* e *McKendrick*, é um modelo epidemiológico, bastante utilizado para a simulação de doenças, como rubéola, varicela entre outras. Neste modelo a população é dividida em situações que refletem o estado no qual o indivíduo se encontra em relação ao desenvolvimento da doença, como suscetíveis S , infectados I , e recuperados R (ROCHA, 2012).

O cálculo do número teórico de pessoas infectadas com uma doença contagiosa é em uma população fechada (número fixo de indivíduos) ao longo do tempo. O diagrama geral do modelo é apresentado na Figura 1.

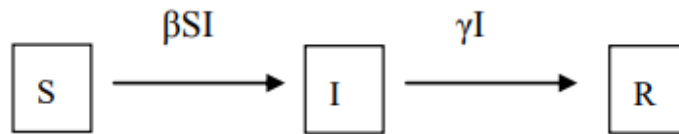


Figura 1 – Diagrama geral do modelo SIR. Fonte: (ROCHA, 2012)

2.2.2 SEIR Model

O modelo *Epidemiological Model Susceptible, Exposed, Infected and Recovered* (SEIR) é uma extensão do modelo SIR, neste modelo a população é dividida em 4 classes de indivíduos. Os suscetíveis, S , são os que podem contrair a doença. Os expostos, E , que são os que estão em contato com os infectados. Os infectados, I , que são os que estão doentes e podem propagar a doença, e os recuperados, R , que são os que já contraíram a doença e adquiriram imunidade. O diagrama geral do modelo é apresentado Figura 2.

Para que a transmissão da doença se dê, deve haver um contato entre um suscetível com um infectado. O suscetível entra, assim na classe dos expostos E , que estão no período de latência, mas não estão ainda infectados. O período de incubação é definido como o período de exposição inicial para o aparecimento de sintomas. Uma vez que uma pessoa se pode tornar infectada antes ou depois do aparecimento dos sintomas, o período de incubação é geralmente diferente do período latente, sendo o período de tempo que decorre até uma pessoa se tornar contagiante (ROCHA, 2012).

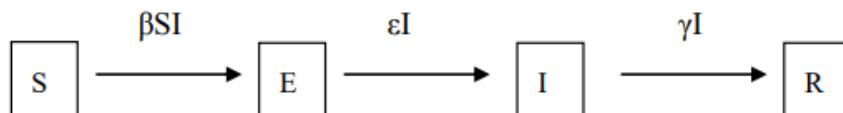


Figura 2 – Diagrama geral do modelo SEIR. Fonte: (ROCHA, 2012)

2.3 Inteligência artificial

Alan Turing no seu artigo "*Computing Machinery and Intelligence*" (1950). Levantou a questão da possibilidade de uma máquina pensar e imitar o comportamento humano,

com um grau de perfeição tão alto que de tal forma que um juiz humano pudesse ser confundido ao ter que decidir, com base nos resultados, se tais tarefas foram executadas por um homem ou por uma máquina. No ano de 1961 o artigo de A. Newell e H. Simon *"The Simulation of Human Thought"*, constituindo um dos primeiros trabalhos conhecido como Projeto de Simulação Cognitiva. Tal projeto enquadra-se em uma área de pesquisas mais ampla denominada Inteligência Artificial (RUSSELL; NORVIG, 2004). No geral, a inteligência artificial tenta buscar o desenvolvimento de sistemas que simulam a capacidade humana de raciocínio, percepção e tomada de decisões para a resolução de problemas, ou seja, sistemas que tenham capacidade de serem inteligentes. Conforme o desenvolvimento da área, percebe-se a necessidade de um modelo para a representação do que conhecemos como seres inteligentes, surgindo assim o conceito de agentes inteligentes.

2.3.1 Agentes inteligentes

Segundo (RUSSELL; NORVIG, 2004): *"Um agente é tudo que pode ser considerado capaz de perceber seu ambiente por meio de sensores e de agir sobre esse ambiente por intermédio de atuadores."*. Essa idéia poder ser vista de forma mais clara na Figura 3.

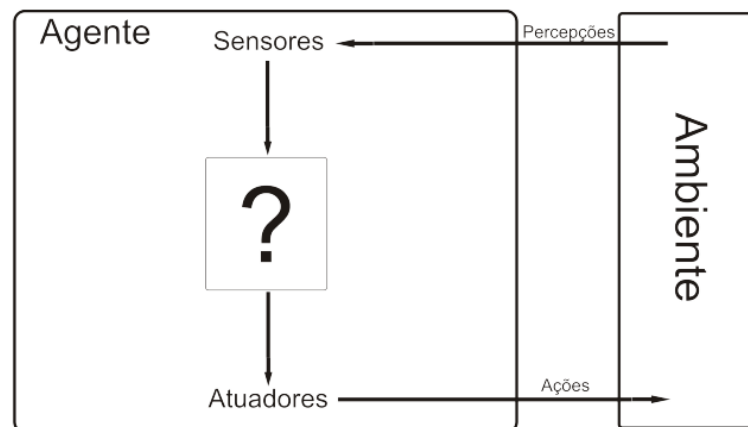


Figura 3 – Modelo geral de um Agente. Fonte: (RUSSELL; NORVIG, 2004)

Entenda-se sensores e atuadores como os meios através dos quais os agentes recebem suas percepções e agem sobre o ambiente, respectivamente. Desta forma, um exemplo de agente poderia ser um robô aspirador de pó, que perceberia seu ambiente através de sensores, e teria como atuador aspirar a sujeira.

Dentre as arquiteturas de agentes existentes, destacam-se duas que representam os extremos em relação a complexidade de implementação: agente reativos e agentes com aprendizagem

2.3.2 Agentes reativos

Os agentes reativos são a forma mais comum da representação de um agente, escolhem ações com base somente na percepção atual, desconsiderando o histórico das percepções anteriores. São caracterizados pela simplicidade, mas por serem simples, possuem pouca ou nenhuma inteligência. São os agentes mais utilizados no desenvolvimento de aplicações SMA, de modo a simplificar o modelo (RUSSELL; NORVIG, 2004).

2.3.3 Agentes com aprendizagem

São agentes com a capacidade de aprender, adaptar-se ao ambiente, tornando-o mais eficiente ao longo do tempo. Correspondem à ideia de máquina inteligente caracterizada por A. Turing. Segundo (RUSSELL; NORVIG, 2004) agentes inteligentes pode ser resumido como: *“Um processo de modificação de cada componente do agente, a fim de levar os componentes a um acordo mais íntimo com as informações de realimentação disponíveis, melhorando assim o desempenho global do agente”*.

2.4 Sistemas Multiagentes

Os Sistemas Multiagentes (SMA) formam uma sub-área da Inteligência Artificial caracterizada pela existência de agentes autônomos, heterogêneos e potencialmente independentes, interagindo de forma cooperada e coordenada para solucionar um determinado problema.

Duas categorias são conhecidas, os reativos e os cognitivos. Em um SMA reativo são utilizados grandes números de agentes simples para a resolução de um problema simples. Já em um SMA cognitivo são utilizados poucos agentes realizando tarefas mais complexas, agindo de acordo com o conhecimento adquirido e possibilitando realizar planejamento das ações futuras (RUSSELL; NORVIG, 2004).

2.5 Simulações

Existem diversas definições semelhantes para caracterizar o significado de uma simulação, em um modo geral, conseguimos entender que a simulação é como uma modelagem para entender aspectos do mundo real. Atualmente, simulações são ferramentas que auxiliam na tomada de decisão (GRIGOLETTI, 2007).

Segundo (STRACK, 1984), o processo de simulação pode ser dividido em três etapas principais:

1. Etapa de modelagem: Criar um modelo teórico para representar os fenômenos do sistema real que está sendo analisado;

2. Etapa de experimento: Simular o modelo teórico desenvolvido e aplicar variações sobre o mesmo, alterando parâmetros que possam influenciar no processo de resolução;
3. Etapa de validação: Comparar os dados experimentais obtidos utilizando o modelo teórico (depois da realização dos ajustes necessários) com os dados do sistema real em questão (análise dos resultados);

A relação entre as etapas de simulação descritas acima é observada na Figura 4 abaixo.

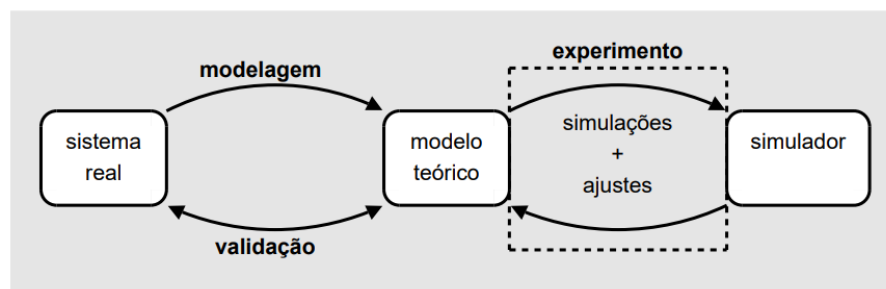


Figura 4 – Etapas do processo de simulação. Fonte: (GRIGOLETTI, 2007)

2.5.1 Simulação em Sistemas Multiagentes

Os Sistemas Multiagentes, como já mencionados anteriormente, possui características que facilitam a representação de um problema real em aspectos espaciais e temporais. A abordagem multiagente é utilizada em simulações para que se possam representar indivíduos com características próprias capazes de realizar ações em um determinado ambiente de simulação.

Os agentes na simulação encapsulam o comportamento dos diversos indivíduos que compõem o sistema real. A execução destes modelos de agentes consiste na emulação do comportamento de um indivíduo. O processo de modelagem de um sistema sob a perspectiva de SMAs podem ser organizados nas seguintes etapas (GRIGOLETTI, 2007):

1. Decompor o fenômeno real em um conjunto de elementos autônomos;
2. Modelar cada um dos elementos como um agente, definindo seus conhecimentos, funções, comportamentos e modelos de interação;
3. Definir o ambiente destes agentes;
4. Definir quais agentes possuem a capacidade de ações e comunicação.

2.5.2 Simulações na área de Geoprocessamento

As técnicas de Geoprocessamento são utilizadas em simulações que necessitam de um ambiente capaz de disponibilizar informações geográficas específicas de um determinado local. Uma das principais ferramentas computacionais utilizadas na área de geoprocessamento, o Sistemas de Informação Geográfica (GIS) permite a realização de análises complexas sobre o ambiente, mostrando ser atualmente um grande benefício para uma melhor visualização de situações como epidemias (GRIGOLETTI, 2007).

A estrutura do GIS possibilita realizar três grandes funções:

- Armazenamento, manejo e integração de grande quantidade de dados referenciados espacialmente. Dados espaciais referenciados podem ser dados atribuídos ou dados de localização;
- Prover meios de realizar análise relacionadas especificamente as componentes geográficas dos dados. Operações mais comuns são pesquisa e busca de informações de acordo com algum critério, como localização ou proximidade;
- A organização e manejo de grande quantidade de dados e a forma como estas informações pode ser facilmente acessadas.

2.6 Ferramentas e Tecnologias de Desenvolvimento

2.6.1 *MASON*

O *MASON* é uma biblioteca para o desenvolvimento de simulações de eventos discretos sobre o contexto de sistemas multiagentes, sendo projetado para suportar um grande número de agentes de forma eficiente, mesmo em execuções de uma única máquina. Suas aplicações mais comuns são em situações relacionadas a problemas que envolvem muitos agentes relativamente simples e problemas arbitrários, como biologia populacional, ciências sociais computacionais, ciência da complexidade, além de problemas relacionados a inteligência artificial (LUK, 2015).

2.6.2 *GeoMason*

Com a necessidade da utilização da representação do ambiente sobre os conceitos de geoprocessamento, infelizmente somente com a utilização da biblioteca *MASON*, não seria possível, visto que a ferramenta não possui suporte a dados geoespaciais. Deste modo, a utilização da extensão *GeoMason* acabou sendo necessária. Com ela, conseguimos exibir, obter e manipular dados relacionados a geolocalização (COLETTI, 2013), além de trabalhar

com formatos de arquivos como os *Shapefile* (formato popular de arquivo contendo dados geoespaciais em forma de vetor usado por Sistemas de Informações Geográficas).

3 Trabalhos Relacionados

Trabalho relacionado	Método	Características
An agent-based modeling approach applied to the spread of cholera (CROOKS; HALEGIORGIS, 2014).	<ul style="list-style-type: none"> - Modelagem baseada em agente - Utiliza como base para o desenvolvimento o modelo matemático SEIR 	<ul style="list-style-type: none"> - Explora a disseminação da cólera nos campos de refugiados em Dadaab - O modelo integra dados geográficos com as atividades diárias dos agentes - Modelo dos agentes com objetivos e ações heterogêneas - Plataforma Java, MASON e GeoMason
Modelagem e simulação de comportamento epidemiológico baseado em Sistemas Multiagentes (BIENCOURT, 2010).	- SMA baseado nos modelos matemáticos SEIR e SIR	<ul style="list-style-type: none"> - Objetivo principal avaliar a eficácia da utilização de modelos computacionais baseados em SMA - Modelo proposto para simular a propagação do vírus H1N1 - Obtém resultados satisfatórios sobre a simulação utilizando o SMA em comparação com modelos matemáticos - Ambiente do SMA criado no NetLogo
Simulação em Sistemas Multiagentes: Aplicação em Endemia (ANDRADE; FROZZA; BAGATINI, 2016).	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliza uma abordagem com SMA - Baseado no modelo matemático SEIR 	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliação do impacto proporcionado por diferentes medidas de combate e prevenção da tuberculose em presídios - Desenvolve diferentes cenários com o objetivo de validar a solução desenvolvida - Aplicação desenvolvida na plataforma .NET e linguagem C#
A Geosimulation Approach for Data Scarce Environments: Modeling Dynamics of Forest Insect Infestation across Different Landscapes (ANDERSON; DRAGICEVIC, 2016).	<ul style="list-style-type: none"> - Geosimulação - Utiliza Sistemas de informação geográfica (GIS) - Usa a técnica de análise multicritério 	<ul style="list-style-type: none"> - Tem como objetivo entender a infestação de uma espécie de besouro - Utiliza representação geográfica - Mostra resultados interessantes na utilização de geosimulações para entender o comportamento da infestação da espécie estudada

Tabela 1 – Comparativo dos trabalhos relacionados estudados

4 Caracterização do Problema

4.1 Dificuldades na utilização dos modelos matemáticos

Os modelos epidemiológicos matemáticos são bem conhecidos e utilizados para a análise e compreensão de epidemias. Porém são de difícil implementação e falham na captura de questões como mobilidade e distribuição do agente transmissor, assim como em questões geográficas e meteorológicas.

4.2 Identificação de oportunidade

Trabalhos anteriores (CROOKS; HAILEGIORGIS, 2014; BIENCOURT, 2010; ANDRADE; FROZZA; BAGATINI, 2016) mostram que a utilização de simulações SMA em comparação com modelos matemáticos são abordagens interessante, visto que existe uma maior facilidade de implementação e capacidade de simular a interação social entre indivíduos, além disso, não existe uma grande dependente de dados. Mas na grande maioria dos trabalhos relacionados estudados são utilizados ambientes simples, sem a utilização de recursos geógrafos, climáticos ou ambientais, que em muitos surtos epidemiológicos como o da febre amarela e da dengue, são os principais fatores que influenciam a velocidade na disseminação da doença.

Partindo-se desse pensamento, observou-se a carência de simulações onde o ambiente desenvolvido para a realização da simulação dispõe de características mais aproximadas de ambientes do mundo real. Além disso, em alguns dos trabalhos relacionados estudados não são aplicadas formas de intervenção sobre a disseminação da doença, mesmo sendo um dos mais interessantes recursos que uma simulação oferece para um melhor entendimento e compreensão de abordagens para diminuir a propagação de uma epidemia.

5 Proposta

5.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma simulação epidemiológica da febre amarela, com o objetivo de entender a disseminação e consequentemente, auxiliar no processo de decisão em relação ao combate.

5.2 Objetivos Específicos

- Construir um modelo computacional baseado em SMA para a caracterização do comportamento da febre amarela;
- Modelar o ambiente, explorando a dinâmica espaço-tempo da disseminação da doença a ser estudada;
- Caracterizar a utilização de técnicas de Geoprocessamento para a construção da simulação;
- Caracterizar e projetar agentes com ações heterogêneas, com o objetivo de obter diferentes perspectivas sobre a disseminação da doença;
- Caracterizar as principais estratégias de controle em uma epidemia;
- Consultar um especialista na área de epidemiologia com o objetivo de obter a principal validação e análise sobre o modelo computacional proposto para a solução;

6 Modelo Conceitual

O modelo conceitual descrevendo o mosquito é baseado em trabalhos anteriores (JINDAL; RAO, 2017; ALMEIDA, 2007), trabalhos que possuem um foco sobre simulações epidemiológicas onde o principal vetor da disseminação da doença é o mosquito *Aedes aegypti*, visto que o comportamento ou características podem variar entre espécies.

Como já mencionado anteriormente, os modelos matemáticos possuem problemas, no entanto, a sustentação para o desenvolvimento do modelo da infecção utilizando como base um modelo matemático ainda é atraente, levando em consideração a forma como é descrito os estados sobre a doença e os parâmetros que descrevem o seu comportamento. Deste modo, para o desenvolvimento do modelo conceitual descrevendo a infecção sobre os agentes, foi utilizado como base o trabalho de (ZHAO et al., 2018), que descreve o comportamento da febre amarela por meio da utilização de um modelo matemático.

Nos tópicos seguintes, são descritos os modelos que apresentam a forma como a infecção da febre amarela progride sobre o agente humano e o agente mosquito, assim como a característica e o comportamento que cada agente assume no ambiente.

6.1 Agente humano

O vírus da febre amarela é transmitido pela picada dos mosquitos transmissores infectados. A doença não é passada de pessoa a pessoa, no entanto ao contrair a doença, o indivíduo torna-se fonte de infecção para o mosquito. Sendo assim, o ser humano acaba colaborando diretamente para a disseminação da doença (VASCONCELOS, 2003).

Para a realização do modelo proposto como representação do ser humano, utilizamos diferentes atributos para contribuir para a sua heterogeneidade, suas características pessoais como sexo, idade e outras particularidades, assim como o seu comportamento, são individuais. No entanto, para simplificação do modelo os indivíduos com idade inferior a 10 anos, assim como também o comportamento de reprodução humana estão considerados fora do escopo desta simulação.

A Figura 8 ilustra a estrutura do comportamento que o agente humano assume no ambiente da simulação e na Tabela 2 é possível observar os parâmetros de entrada em relação ao seu comportamento.

Parâmetro	Descrição	Valor
Na	Número de agentes humanos na simulação	Def. no experimento
Np	Número de parentes e amigos	15
Pf	Probabilidade do indivíduo possuir família	0%-70%
Qv	Quantidade de vacinas definidas sobre o ambiente	Def. no experimento
Ea	Probabilidade de realização de uma atividade de lazer	0%-80%
Ta	Tempo aleatório para a volta da atividade	Aleatório

Tabela 2 – Parâmetros do agente humano. Adaptada de (JINDAL; RAO, 2017)

6.1.1 Comportamento e características

Cada agente instanciado sobre o ambiente, apresenta a característica de pertencer a um grupo de pessoas, possuindo como objetivo simbolizar membros de uma família. Essa característica é uma probabilidade, tendo com o objetivo representar indivíduos também sem nenhuma relação familiar. A definição de pertencer ou não a mesma família, é realizada no momento da inicialização da simulação. Para isso usamos como critério o número máximo de parentes igual 15, dividindo-os em grupos familiares com no máximo 4 indivíduos. Os grupos familiares moram em lugares distintos escolhidos aleatoriamente ao longo do ambiente também no momento da inicialização da simulação. Um indivíduo que pertence a um grupo familiar, acaba ficando no mesmo ambiente em determinadas horas do dia, especialmente no período da noite.

6.1.1.1 Funcionamento da sociedade

Os agentes desenvolvem atividades diárias, ou seja, possui objetivos conforme o dia da semana, levando em consideração sua idade, suas necessidades atuais e o horário sobre o ambiente. Estas atividades são a representação do funcionamento de uma sociedade simplificada. Neste modelo, consideramos as seguintes atividades possíveis: trabalhar, frequentar a escola e a realização de uma atividade de lazer durante o final de semana, sendo a representação sobre uma possível atividade religiosa, atividade de compras, visita a parentes ou amigos.

As possíveis atividades realizadas sobre o ambiente cumprem um tempo determinado, como é o caso das atividades relacionadas ao trabalho e a escola, as demais atividades como visitar amigos ou parentes e outras, seguem um tempo de realização calculado aleatoriamente. Quando o agente não está realizando nenhum tipo de atividade ele está em sua residência, neste período o agente esta no estado parado, sendo uma simplificação para todos os possíveis cenários em que o agente poderia estar realizando dentro de sua residências, incluindo o cenário de estar dormindo.

As atividades de lazer são selecionadas aleatoriamente, com a escolha de uma residência de um indivíduo com algum grau de parentesco ou algum lugar sobre o ambiente, representado uma possível atividade ao ar livre. Nestas atividades de visita a amigos ou

parentes, acaba existindo a possibilidade do agente selecionado como anfitrião não estar presente no momento da visita, neste caso para simplificação do modelo, consideramos este cenário aceitável.

6.1.1.2 Busca de recursos médicos

Quando o agente está sentindo algum tipo de sintomas que acabam sendo considerados como uma possível doença, ele então procura ajuda médica, independente do dia da semana ou horário. Dentro do modelo proposto os agentes só visitam os centros médicos quando não estão ativos para a realização das suas atividades.

Com o atendimento médico, o indivíduo que está doente acaba recebendo medicação, tornando-se um indivíduo recuperado. Além de orientações para prevenção de focos de reprodução do mosquito, com o objetivo de auxiliar no combate ao vetor da doença. No diagrama do comportamento do agente humano, o estado fim representa o indivíduo que acabou passando pelo atendimento médico e está considerado imune sobre a doença.

A forma como ocorre a prevenção por meio da vacinação sobre o modelo proposto foi simplificada. Os indivíduos que ainda estão no estado suscetível, são escolhidos aleatoriamente para simular a aplicação da vacina, tendo ela sido solicitada em algum cenário simulado. Esta intervenção leva em consideração a quantidade de vacinas disponibilizadas no centros de saúde, ou seja, a quantidade de doses da vacina é finita.

6.1.2 Disseminação da doença sobre o agente humano

A definição para a representação dos sintomas e estados da infecção sobre o agente humano, seguem como base o modelo matemático SEIR. Onde a representação do estado exposto é considerado como o período de incubação. Na Figura 5 é possível visualizar os estados da infecção sobre o agente humano, as transições e a aplicação das fórmulas de probabilidade sobre as mudanças de estado. As fórmulas utilizadas são com base nos parâmetros descritos na Tabela 3. É importante notar que a notação (h) utilizada junto aos estados e das fórmulas de probabilidade não representa um valor ao modelo, tendo por objetivo auxiliar na identificação.

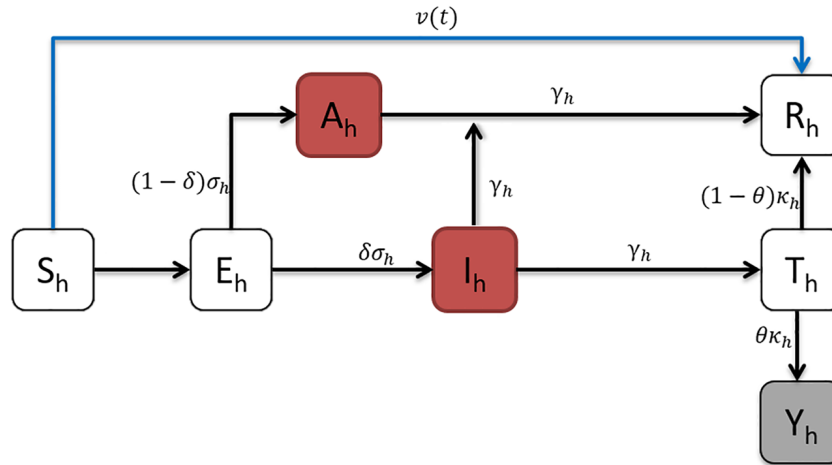


Figura 5 – Infecção sobre o agente humano. Adaptada de (ZHAO et al., 2018)

Parâmetro	Descrição	Valor
ν	Taxa de vacinação	0–0.043/dia
t	Tempo entre vacinação e imunidade	0.002-0.0045
δ	Proporção de casos graves	15%
σ	Período de incubação do hospedeiro	3-6/dia
γ	Período infeccioso do hospedeiro	3–4/dia
κ	Duração do caso tóxico	8/dia
θ	Letalidade	0%–50%

Tabela 3 – Parâmetros da infecção em agentes humanos. Adaptada de (ZHAO et al., 2018)

Os possíveis estados que o agente humano assume durante a infecção são descritos a seguir:

1. Suscetível (S_h) - O estado suscetível representa o indivíduo vulnerável à infecção pelo patógeno, ou seja, no contexto da febre amarela um indivíduo sem imunidade adquirida pela aplicação da vacina.
2. Exposto (E_h) - No contexto da simulação realizada neste trabalho, o estado exposto representa o estado de incubação do patógeno. Um indivíduo é dito estar no estado de incubação quando ele está carregando a infecção, mas ainda não está contagioso. O período de incubação médio da febre amarela é de três a seis dias, chegando em alguns casos até dez dias.
3. Infecção leve (A_h) - A forma leve da infecção também conhecida como infecção assintomática representa a maior probabilidade dos casos de febre amarela, em média 50% dos casos. Neste estado, o indivíduo começou a mostrar os sintomas da doença

e está pronto para infectar um mosquito, porém a probabilidade da transmissão do patógeno neste caso é baixa em relação aos outros estados clínicos (VASCONCELOS, 2003). Para simplificação do modelo proposto, o estado de infecção leve nesta representação também inclui a forma de infecção moderada, visto que em um modo geral os dois estados clínicos não são muito diferentes.

4. Infecção grave (Ih) - O estado de infecção grave, representa em média até 30% dos casos clínicos. Em determinadas situações o indivíduo apresenta uma recuperação completa, sem sequelas. Porém existem casos onde ocorre uma evolução do estado grave para o tóxico (VASCONCELOS, 2003).
5. Tóxico (Th) - O estado Tóxico da doença, também é conhecido como fase maligna. Sendo uma evolução da infecção para uma segunda fase mais complexa, neste estado da doença, a letalidade é alta, em torno de 50% dos indivíduo.
6. Óbito (Yh) - Representa o indivíduo que estava no estado maligno e acabou entrando em óbito, devido a complicações decorrentes da doença.
7. Recuperado (Rh) - O estado recuperado não representa somente indivíduos recuperados da infecção, mas também indivíduos que possuem imunidade adquirida pela aplicação da vacina. Sabe-se que a doença confere imunidade ativa natural, permanente, não se conhecendo recaídas. Já a vacina confere imunidade ativa artificial.

6.2 Agente Mosquito

O principal agente computacional da simulação são os mosquitos *Aedes aegypti*, os quais possuem características e comportamentos individuais. Nas próximas seções é descrito o comportamento, distribuição vetorial, capacidade de interação com o ambiente e a dependência de condições climáticas.

6.2.1 Comportamento e características

Os agentes mosquitos podem se locomover por todo o ambiente da simulação. O deslocamento do mosquito seguem como base os parâmetros que representam a velocidade do vôo (Fs) e distância máxima percorrida (Fr). O agente está se locomovendo, somente quando está ativo. O período ativo (As , Ae), segue como base o princípio que durante este intervalo o agente está em busca de alimentação ou locais para realização do processo de oviposição. No modelo proposto, o agente possui um nível de energia, assim como também um período de horas que influencia diretamente sobre o momento em que ele se encontra ativo no ambiente. Em um modo geral o mosquito está ativo durante o período matutino (7:00 am) e no período vespertino (18:00 pm) (JINDAL; RAO, 2017).

O processo de alimentação do agente mosquito segue uma taxa de alimentação (Mm), levando em consideração um número máximo de refeições realizadas em um dia. O processo considera ainda, a escolha do tipo de alimentação seguindo como base o estado atual do agente: transportando ovos alimentação sanguínea, demais casos alimentação a base de seiva ou néctar. Caso o agente atingir o seu limite máximo, o agente então passa ao estado de parado quando não estiver transportando ovos.

Durante a simulação existe a probabilidade do agente morrer (Mr). Essa probabilidade é aplicada quando ele ainda não está na fase adulta, onde o principal motivo é sua fonte de água secar e não se repor ou durante na fase adulta, onde a probabilidade representa a morte do agente por meio natural ou em uma casualidade durante o processo de alimentação. A fêmea do *Aedes aegypti* vive cerca de 30 a 45 dias.

O agente mosquito também possui uma amplitude sensorial (Sr), que tem como objetivo determinar o quanto o agente está ciente do seu entorno. Se um agente humano ou um possível local para expelir os ovos chega a um determinado raio de distância, só então o mosquito pode detectá-lo.

6.2.1.1 Processo de reprodução e ciclo de vida

Nesta representação os agentes são do gênero feminino com o intuito de simplificar o modelo proposto, visto que em um modo geral os mosquitos do gênero masculino são fatores que influenciam somente na reprodução da espécie e não possuem um papel direto na disseminação da doença. Deste modo a reprodução passa a ser por meio da utilização de uma probabilidade da fêmea se acasalar com sucesso (Pm) e então passar ao estado de estar transportando ovos.

O processo de oviposição (Oc) realizado quando a fêmea esta transportando ovos, segue o princípio do comportamento de expelir os ovos em um mais mais lugares distintos. Como o gênero masculino está considerado fora do escopo desta simulação, utilizamos uma probabilidade (Pf) para representar a possibilidade do ovo expelido ser fêmea, sendo que os demais ovos são desconsiderados.

Se o mosquito estiver carregando ovos, continua alimentando-se de agentes humanos até que seus ovos estejam maduros o suficiente para serem colocado. Um mosquito precisa de pelo menos uma refeição após o acasalamento para os seus ovos madurar, o período de maturação do ovo sendo carregado (τ) é determinado em função da temperatura (θ) em graus Celsius. Três dias é o tempo necessário para amadurecer os ovos na temperatura ideal de 21°C (JINDAL; RAO, 2017). A equação 6.1 rege o período de maturação.

$$\tau = 3 + |\theta - 21|/5 \quad (6.1)$$

O ciclo de vida inicial aquático, antes da fase adulta do mosquito também foi simplificado, as fases sobre o período ovo, larva e pupa são representados como o período de maturação (μ) (JINDAL; RAO, 2017). Uma vez que um lote de ovo é colocado sobre uma fonte de água, o tempo que cada ovo vai gastar no estado aquático antes de evoluir para mosquito adulto é definido pela equação 6.2.

$$\begin{aligned}\mu &= \mu_{Ovo} + \mu_{Larva} + \mu_{Pupa} \\ &= (2 + |(\theta - 25)|/2) + (2) + (4 + |(\theta - 25)|/2) \\ &= 8 + |(\theta - 25)|\end{aligned}\tag{6.2}$$

A Figura 9 apresenta um fluxograma do modelo considerando a conexão entre as características, comportamento e dos parâmetro descritos na Tabela 4. Os parâmetro representam os valores de probabilidade do mosquito assumir um outro comportamento durante a simulação.

Parâmetro	Descrição	Valor
Fs	Velocidade de vôo	0.0...1.0 km/hr
Fr	Distância máxima percorrida	350m
As, Ae	Período ativo	7:00 a.m., 6:00 p.m
Mm	Número máximo de refeições em um dia	1
Mr	Taxa de mortalidade	0.05/dia
Pm	Probabilidade de sucesso sobre o acasalamento	0.2
Oc	Comportamento de oviposição (único (0) ou espalhados por vários locais (1))	1
Pf	Probabilidade de que o ovo seja fêmea	0.5
Sr	Amplitude sensorial	3m

Tabela 4 – Parâmetros de comportamento do agente mosquito. Adaptada de (JINDAL; RAO, 2017)

6.2.2 Disseminação da doença sobre o agente mosquito

O ciclo de transmissão de doença sobre o agente mosquito é apresentado na Figura 6. A notação (v) utilizada junto aos estados e das fórmulas de probabilidade, não representa um valor ao modelo, tendo por objetivo auxiliar na identificação. Os parâmetros utilizados no desenvolvimento das fórmulas de probabilidade sobre infecção no agente mosquito estão descritos na Tabela 5.



Figura 6 – Infecção sobre o agente mosquito. Adaptada de (ZHAO et al., 2018)

Parâmetro	Descrição	Valor
a	Taxa de picada de mosquito	0.3–1.0/dia
b	Probabilidade de transmissão vetor para humano	0.10–0.75/por picada
c	Probabilidade de transmissão humano para vetor	0.30–0.75/por picada
ψ	Infecção não grave	0.1–0.5

Tabela 5 – Parâmetros da infecção em agentes mosquito. Adaptada de (ZHAO et al., 2018)

Os possíveis estados que o agente mosquito assumi durante a infecção são descritos a seguir:

1. Suscetível (S_v) - O estado suscetível representa um agente mosquito sem à infecção pelo patógeno.
2. Exposto (E_v) - O estado exposto, assim como no agente humano, representação o estado de incubação da infecção.
3. Infecção (I_v) - Representa o estado em que o mosquito está infectado pelo patógeno e está pronto para ser um vetor de transmissão da doença.

O mosquito possui um período de incubação para se tornar um vetor de transmissão, este período é chamado de incubação extrínseca (σ_v). Varia de 8 a 12 dias e é tanto menor quanto maior for a temperatura. Em um modo geral 12 dias para 18°C, até 2 dias para 30°C, sendo que abaixo de 18°C a transmissão é muito reduzida. Uma vez infectado, o mosquito assim permanece durante toda a vida (VASCONCELOS, 2003).

6.3 Formas de transmissão entre agentes

Um agente mosquito é criado em uma das fontes de água definidas no ambiente. Se o agente encontra-se no período ativo, ele começa a se mover aleatoriamente até um agente humano ou um local para oviposição adentrar em sua faixa sensorial (S_r). No momento da identificação de um agente humano, rege o parâmetro sobre a quantidade máxima de refeições que o mosquito pode realizar em um dia (M_m), caso o valor atual seja menor

do que o valor estipulado o agente mosquito segue o alvo humano com o objetivo de se alimentar. Se um mosquito picar um ser humano infectado, em seguida, ele se infecta com uma probabilidade $ab\frac{I_v}{N_h}$, e quando tal mosquito infectado picar um humano suscetível, infecta o humano com probabilidade $ab\frac{\psi A_h + I_h}{N_h}$.

Na Figura 7, conseguimos observar a forma como a infecção age sobre o agente humano e o agente mosquito, assim como a sua relação na transmissão da doença entre os agentes. Os parâmetros reunidos sobre o cálculo da probabilidade da transmissão são descritos na Tabela 6.

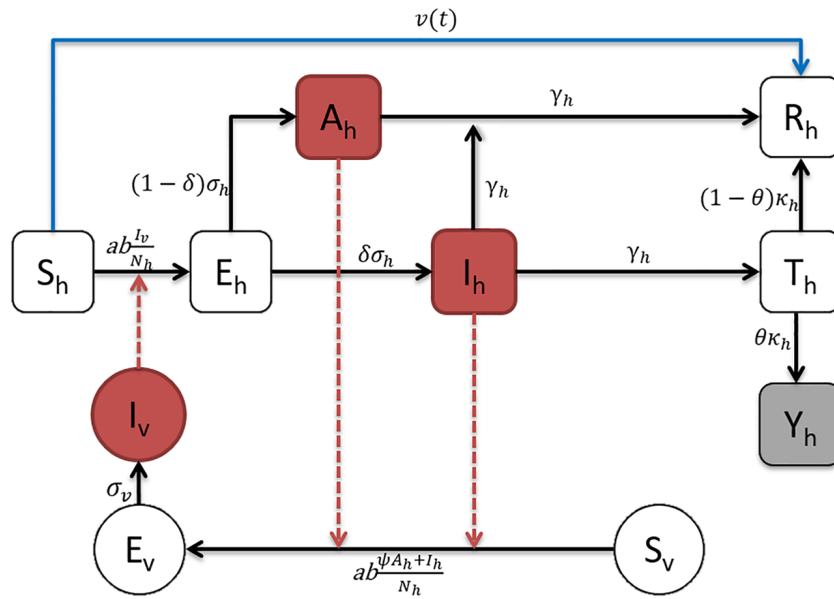


Figura 7 – Ciclo da infecção sobre os agentes. Adaptada de (ZHAO et al., 2018)

Parâmetro	Descrição	Valor
N_a	Número de agentes humanos na simulação	-
ν	Taxa de vacinação	0–0.043/dia
t	Tempo entre vacinação e imunidade	0.002–0.0045
δ	Proporção de casos graves	15%
σ	Período de incubação do hospedeiro	3–6/dia
γ	Período infeccioso do hospedeiro	3–4/dia
κ	Duração do caso tóxico	8/dia
θ	Letalidade	0%–50%
a	Taxa de picada de mosquito	0.3–1.0/dia
b	Probabilidade de transmissão vetor para humano	0.10–0.75/por picada
c	Probabilidade de transmissão humano para vetor	0.30–0.75/por picada
ψ	Infecção não grave	0.1–0.5

Tabela 6 – Parâmetros da infecção sobre os agentes. Adaptada de (ZHAO et al., 2018)

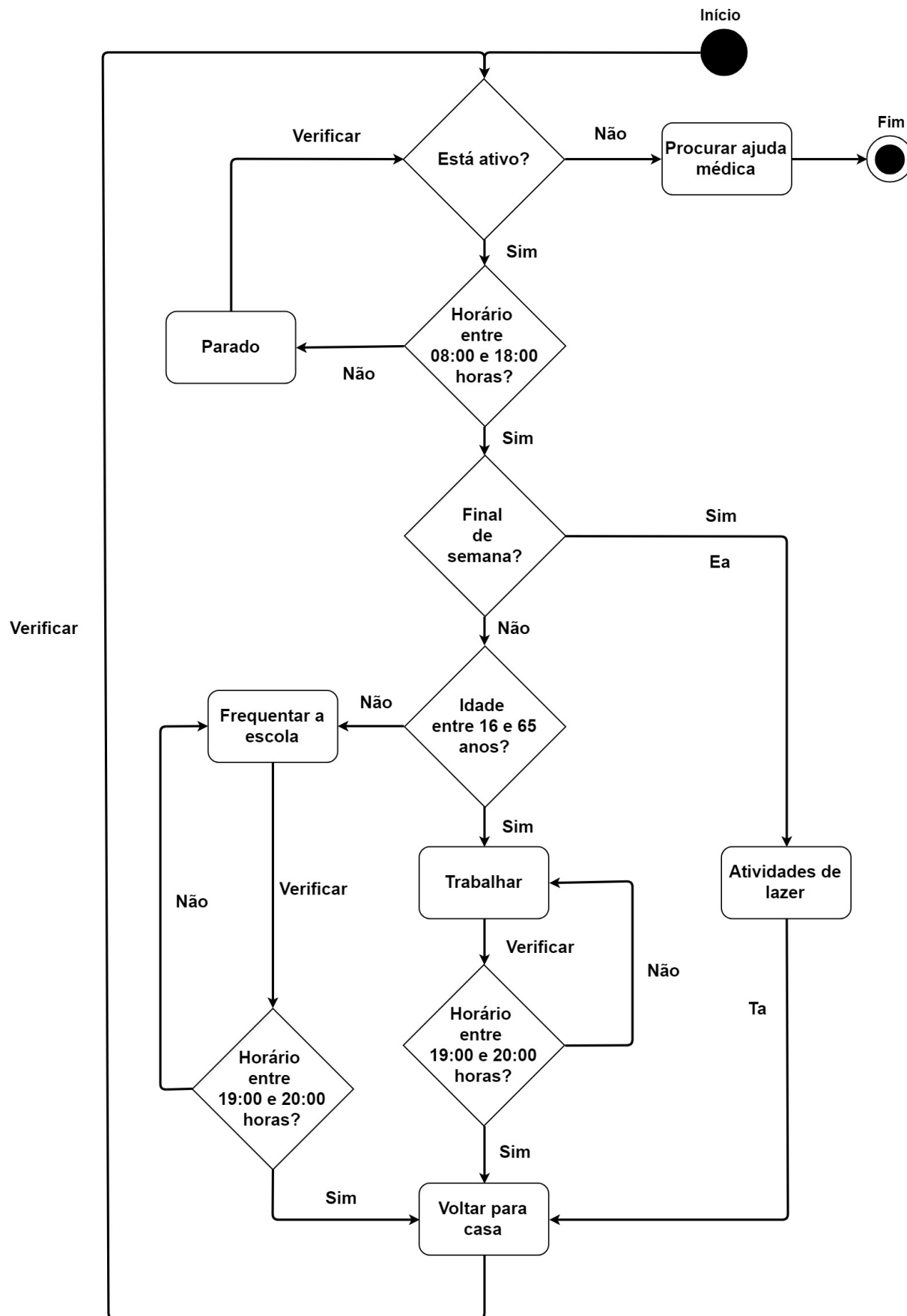


Figura 8 – Comportamento do agente humano

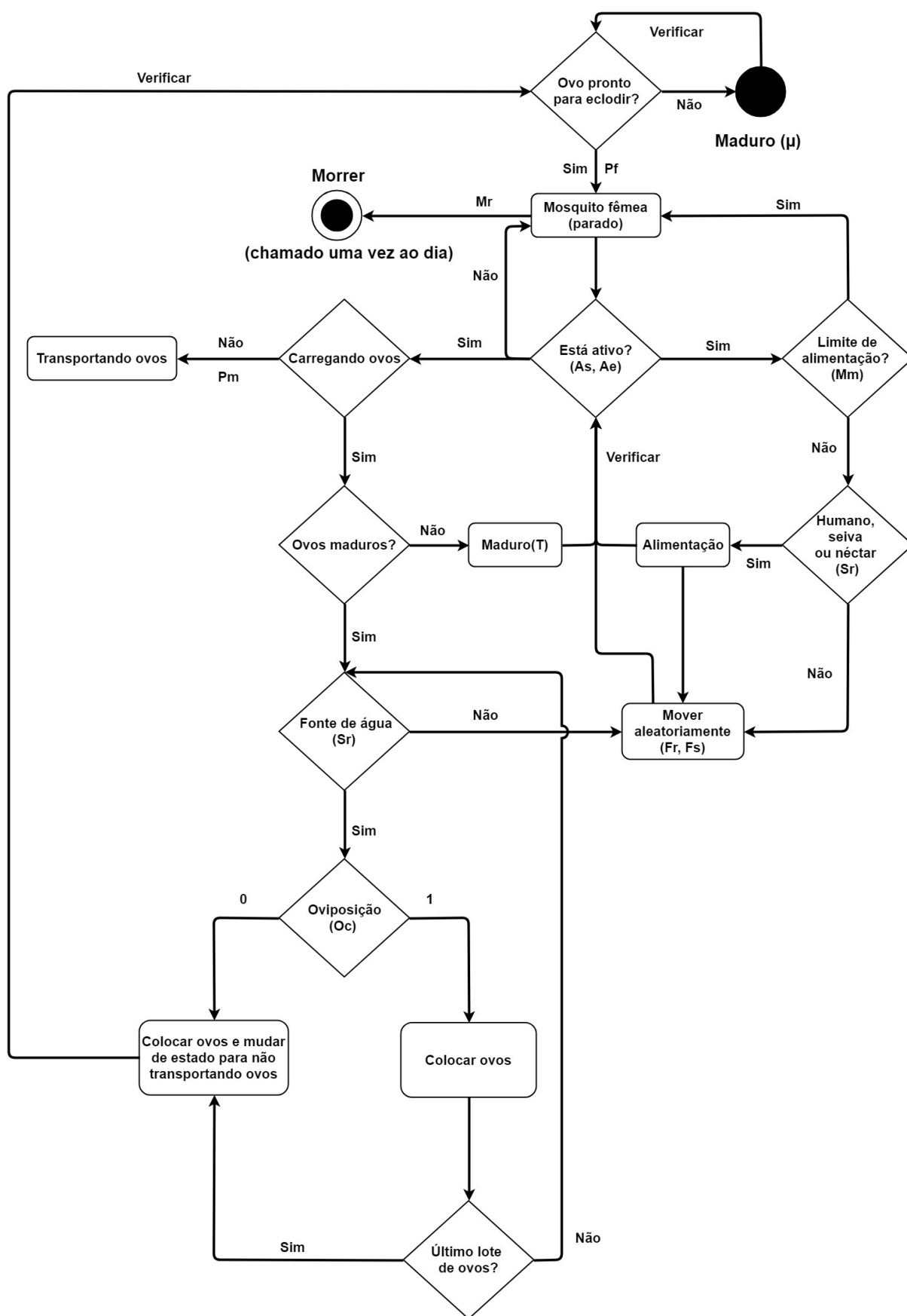


Figura 9 – Comportamento do agente mosquito. Adaptada de (JINDAL; RAO, 2017)

7 Simulação

7.1 Área de estudo

A cidade de Porto Alegre (RS) com latitude 30°01'40" sul e longitude 51°13'43" oeste, está localizada em uma planície circundada por morros, limitada pela orla fluvial do lago Guaíba. A área territorial do município é de 496,68 km^2 , onde 69,06% equivale ao ambiente natural e 30,94% ao construído. A população estimada é de 1.484.941 habitantes para 2017, apresentando densidade demográfica de 2.837,53 hab/ km^2 . Sendo 93% de domicílios com esgotamento sanitário adequado, 82.7% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização e 69.4% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada (IBGE, 2018). O clima é subtropical úmido, caracterizado por temperatura média anual de 19,5°C e precipitação média anual de 1.300 mm, sendo que a temperatura mínima durante o período do verão geralmente é 25°C, com máxima de 35°C e no inverno, a mínima fica em 2°C com máxima de 20°C (PREFEITURA DE PORTO ALEGRE, 2018; FERREIRA, 2015).

7.1.1 Monitoramento sobre o *Aedes aegypti*

Desde 2012 a cidade possui um monitoramento sobre a distribuição espaço-temporal do *Aedes aegypti*. Este monitoramento ocorre em 42 bairros da cidade, sendo eles: (1) Aparício Borges, (2) Azenha, (3) Boa Vista, (4) Bom Jesus, (5) Cavallhada, (6) Chácara das Pedras, (7) Cidade Baixa, (8) Costa e Silva, (9) Cristo Redentor, (10) Farrapos, (11) Farroupilha, (12) Glória, (13) Higienópolis, (14) Ipanema, (15) Jardim Botânico, (16) Jardim Carvalho, (17) Jardim do Salso, (18) Jardim Itu, (19) Jardim Leopoldina, (20) Jardim Sabará, (21) Mário Quintana, (22) Medianeira, (23) Menino Deus, (24) Nonoai, (25) Parque Santa Fé, (26) Partenon, (27) Passo d'Areia, (28) Passo das Pedras, (29) Petrópolis, (30) Restinga, (31) Rubem Berta, (32) Santa Teresa, (33) Santana, (34) Santo Antônio, (35) São José, (36) Sarandi, (37) Teresópolis, (38) Três Figueiras, (39) Vila Ipiranga, (40) Vila Jardim, (41) Vila João Pessoa, (42) Vila Nova.

A realização deste monitoramento é feita com a utilização de 1.218 armadilhas (MosquiTRAP) instaladas nos bairros para captura de mosquitos adultos. As armadilhas são posicionadas em área externa de residências e estabelecimentos comerciais, com a distância aproximada de 250 metros entre uma e outra. São confeccionadas em plástico preto e têm em torno de 30 centímetros de altura, sendo vistoriadas semanalmente pelos agentes de controle de endemias (ONDE ESTÁ O AEDES - PREFEITURA DE PORTO ALEGRE, 2018b).

Os dados obtidos destas análises dos últimos anos mostram que a região de Porto Alegre mesmo apresentando um clima úmido e com temperaturas baixas durante o inverno, expressa uma grande densidade de fêmeas do *Aedes aegypti*, como mostra a Figura 10.

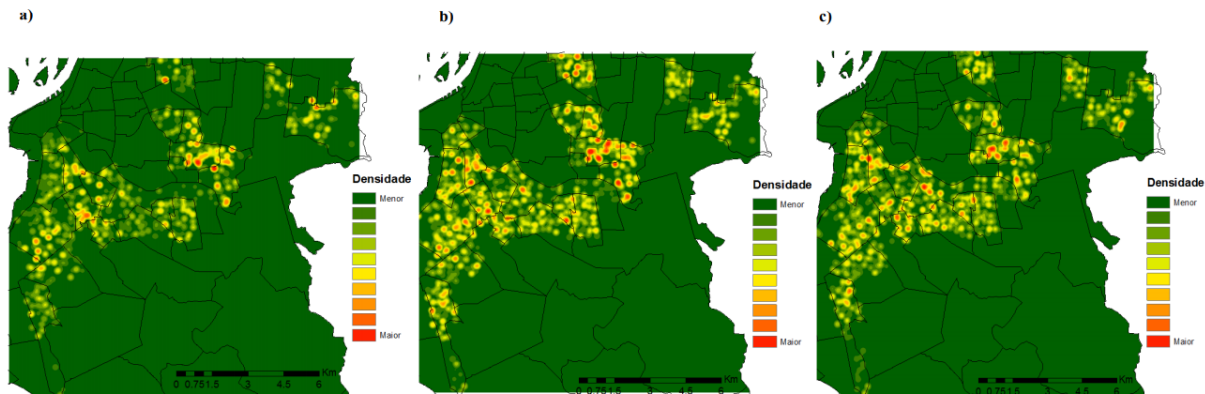


Figura 10 – Estimador de densidade Kernel da distribuição da abundância de fêmeas de *Aedes aegypti* capturadas pela MosquiTRAP em Porto Alegre (RS): a) 2012, b) 2013, c) 2014. Fonte: (FERREIRA, 2015)

Diante dos resultados obtidos sobre a análise da densidade de distribuição das fêmeas no período de outubro do ano de 2012 a maio de 2014, junto aos dados de casos confirmados do ano de 2016 (ONDE ESTÁ O AEDES - PREFEITURA DE PORTO ALEGRE, 2018a). Definimos os bairros Bom Jesus (bairro com maior número de focos do mosquito), Chácara das Pedras (bairro com maior número de casos confirmados) e suas proximidades como o ambiente para a realização da simulação.

7.2 Ambiente

A expansão geográfica da população dos mosquitos *Aedes aegypti*, sofre influência de fatores ambientais e sociais, entre os quais o clima, a densidade demográfica e a atividade econômica. Em muitos trabalhos relacionados a simulação utiliza a representação do ambiente em uma matriz, o que torna os fatores de influência acima citados sobre o ambiente difíceis de implementar. Na sua grande maioria, esta representação matricial também acaba restringindo a sobreposição em situações reais, onde o ambiente acaba possuindo uma distinção muito grande, deixando então, espaços para ocorrências de situações não previstas.

7.2.1 Representação da região

Uma das formas mais conhecidas e utilizadas na área de Geoprocessamento para a representação de dados geoespaciais é o formato *Shapefile*, com este formato, conseguimos detalhar informações como fronteiras entre bairros e cidades, trajetos trafegáveis, distinguir

localidades urbanas e rurais. Além de representações de edifícios, residências, rios, lagos e outros. Um exemplo de uma porção da área escolhida com a utilização do padrão *Shapefile* é possível visualizar na Figura 11.



Figura 11 – Representação do ambiente, trecho de um dos bairros escolhidos

Os edifícios e residências na figura acima, são representados através da utilização de representações geométricas e os trajetos trafegáveis existentes na região com segmentos de linhas.

7.2.1.1 Sobreposição com informações reais

Dentro dos bairros escolhidos para realização do experimento em Porto Alegre, existem em sua grande maioria residências, mas também alguns edifícios e prédios que representam pontos de interesse sobre o ambiente, sendo eles: centros médicos, possíveis locais de trabalho e locais de comércio. Com a utilização de recursos de Geoprocessamento, todos os pontos de interesse serão identificados sobre o ambiente, tendo como objetivo buscar um realismo maior para a representação do funcionamento da região local.

Assim como em ambientes reais, os centros de saúde espalhados pelo ambiente da simulação também irão dispor de recursos limitados em relação a quantidade de vacinas, leitos e atendimentos diários. A identificação de todos os pontos de interesse será utilizando ícones sobre os locais, como mostra a Figura 12 identificando um centro de saúde e outros locais de interesse.



Figura 12 – Representação do ambiente, identificação de pontos de interesse

7.2.2 Interação do agente humano com o ambiente

Os agentes humanos são a representação da população de habitantes do local, sendo as construções presentes, os locais nos quais residem ou realizam suas atividades diárias. Essa definição de residência é aleatória, atribuída no momento da instanciação junto aos possíveis membros do grupo que acabam dando origem a uma família.

A principal relação entre o agente humano com o ambiente são as representações de suas residências, onde na grande maioria dos casos ocorre as picadas dos mosquitos. Além disso, existem os trajetos trafegáveis, representados como linhas interligadas na figura 11. Estes trajetos são as ruas em que os agentes acabam trafegando para alcançar seus objetivos. No contexto da simulação realizada, os objetivos são sair da sua residência e ir a locais determinados no mapa.

7.2.2.1 Locomoção dos agentes sobre o ambiente

Para simplificação do modelo desenvolvido, presume-se que os indivíduos independente da idade conhecem todas as possíveis trajetórias da cidade, assim como os lugares que se encontram os centros médicos, casas de amigos ou parentes, centro de compras, escolas e locais de trabalho. Essa simplificação ocasionou a escolha de uma região pequena, com o objetivo de existir a possibilidade de locomoção dos agentes sem a existência da representação do transporte público ou privado.

A simulação não tem como objetivo mostrar a locomoção dos agentes sobre os possíveis trajetos do ambiente, visto que em um modo geral, são poucos os casos onde ocorre uma forma de transmissão da doença durante este tipo de percurso. Sendo assim, a forma como ocorre a locomoção do agente na direção do seu objetivo é simplificada, a

cada passo de tempo sobre a simulação o agente esta realizando o percurso na direção do seu objetivo. Esta movimentação é realizada utilizando como base o algoritmo A* (HART; NILSSON; RAPHAEL, 1968).

A forma como os agentes humanos são visualizados sobre o ambiente é apresentado na Figura 13. Sendo uma representação pontual, onde a coloração determina o estado atual do agente em relação a doença, preto para suscetível, amarelo para exposto, vermelho para infectado e azul para recuperado.



Figura 13 – Representação dos agentes humanos sobre o ambiente

7.2.3 Interação do agente mosquito com o ambiente

Com o objetivo de deixar a visualização da simulação limpa e performática, optamos em não acrescentar uma representação visual do mosquito sobre o ambiente, mas guardar suas informações de referência sobre a sua localização. Deste modo, estas informações de localização ainda podem ser utilizadas para auxiliar no processo de análise e validação dos resultados em um segundo momento.

Ainda para simplificação do modelo, o agente mosquito, assim como o agente humano conseguem transpassar as representações de residência junto ao ambiente. Com isso, foi possível remover do escopo deste trabalho comportamentos relacionados a interações com janelas, portas entre outros.

7.2.3.1 Focos de reprodução do mosquito

Sabe-se que o principal fator da disseminação dos mosquitos *Aedes aegypti* em um ambiente urbano são acúmulos de resíduos sólido, embora a espécie também reproduza em um habitat natural (BRAGA; VALLE, 2007). No modelo proposto, para simplificação

utilizamos os principais focos conhecidos da reprodução do mosquito com a mesma forma de representação.

Todos os focos existente sobre o ambiente, resíduos sólidos ou vegetação, são sinalizados com a utilização da forma geométrica de um triângulo verde, como é apresentado na Figura 14. Esta representação também é adota para desempenhar o papel de alimentação secundária do mosquito (seiva ou néctar).



Figura 14 – Representação dos focos sobre o ambiente

7.2.4 Representação do clima

As mudanças climáticas que estão ocorrendo no planeta nos últimos anos estão aumentando a incidência e a expansão de doenças transmitidas por vetores como os mosquitos (VASCONCELOS, 2002). Dentre os fatores que estão relacionados à incidência do aumento vetorial do *Aedes aegypti*, a temperatura é considerada o fator climático mais crítico sobre o seu desenvolvimento, sendo ela responsável também na replicação do patógeno da febre amarela.

O clima sobre o modelo do ambiente proposto tem como objetivo simular o clima conhecido da região de Porto Alegre, para isso, seguimos como base para a definição da temperatura os dados obtidos durante o período de outubro de 2012 a maio de 2014, apresentados na Figura 15.

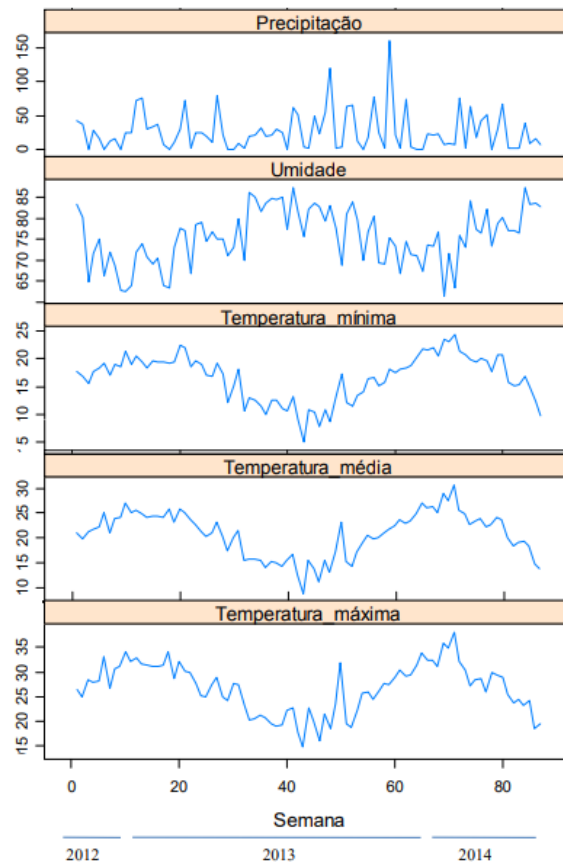


Figura 15 – Temperaturas mínima, média, máxima, da umidade e da precipitação acumulada de Porto Alegre (RS). Adaptado de (FERREIRA, 2015)

Com a utilização de bairros próximos, conseguimos definir que durante o período da chuva, assim como em outras mudanças climáticas, todo o ambiente da simulação irá ser afetado.

7.2.5 Representação do período do tempo sobre o ambiente

A forma como a representação do tempo ocorre sobre o ambiente, tem como objetivo simplificar e remover períodos onde consta como horários em que os mosquito não está ativo. Assim, optamos em cada passo do tempo dentro do ambiente assumir quatro horas e cada inicialização do modelo, o relógio começar em meia-noite (0 min, 0 h, 0 dia, 0 semana).

Com isso conseguimos observar os períodos nos quais ocorreu a disseminação da doença, mas também verificar outros cenários, como a localização de indivíduos que podem estar atuando diretamente sobre a propagação.

8 Experimentos computacionais

Os experimentos computacionais a serem realizados tem o propósito de validar o modelo desenvolvido, como também entender a disseminação do vetor e do patógeno sobre os bairros escolhidos.

Com o monitoramento ocorrendo na cidade de Porto Alegre, tanto dos mosquitos *Aedes aegypti*, como também de casos confirmados de Febre amarela, Dengue, Chikungunya e outras doenças transmitidas pelo vetor, conseguimos obter dados da realidade para a parametrização inicial sobre o ambiente da simulação.

8.1 Experimento de parametrização sobre o mosquito

O experimento tem como objetivo calibrar os parâmetros sobre o modelo do agente mosquito. As seguintes características são consideradas:

1. Os números e a localização das fêmeas do mosquito, seguem como base a captura realizada durante as primeiras semanas do ano de 2013 sobre a cidade de Porto Alegre (FERREIRA, 2015).
2. Supomos que para cada mosquito capturado, exista um foco de reprodução próximo.
3. Também estão presentes junto ao ambiente do experimento a vegetação utilizada para o consumo de seiva (alimentação secundária ao sangue).
4. O clima presente sobre o ambiente segue como base os números durante o mesmo período de captura dos mosquitos.
5. Optamos em não adicionar neste experimento agentes humanos, considerando que o objetivo nesta etapa é calibrar somente o modelo do agente mosquito.

8.1.1 Formas de avaliação dos resultados

Definida as condições iniciais sobre quantidade e as características presentes sobre o ambiente, a simulação é inicializada. Espera-se que com o ambiente próprio, o desenvolvimento do vetor na região siga como base os números encontrados durante o ano de 2013. Para isto, utilizamos como avaliação dos resultados a comparação com os números de fêmeas capturados ao longo das semanas seguintes, Figura 16.

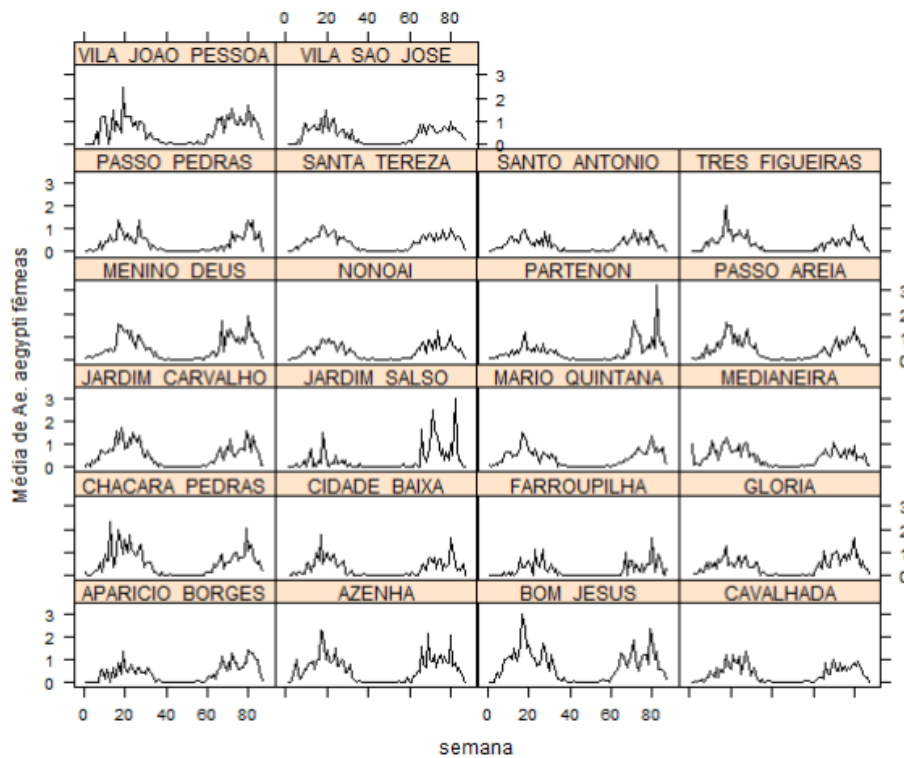


Figura 16 – Captura média de fêmeas de *Aedes aegypti* pela MosquiTRAP por semana nos bairros monitorados pelo MI-Dengue em Porto Alegre (RS). (Outubro de 2012 a maio de 2014). Fonte: (FERREIRA, 2015)

Como uma segunda avaliação para o experimento, poderíamos ainda chegar a executar a simulação com o objetivo de alcançar uma densidade populacional próxima ao capturada no ano de 2013. Esta avaliação levaria em consideração somente os bairros de interesse presentes na Figura 17.

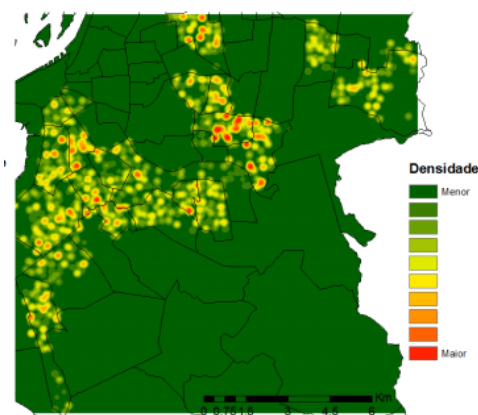


Figura 17 – Estimador de densidade Kernel da distribuição da abundância de fêmeas de *Aedes aegypti* capturadas pela MosquiTRAP em Porto Alegre em 2013. Fonte: (FERREIRA, 2015)

8.2 Estudo de caso

Após a realização do experimento para calibração sobre o modelo do mosquito, o segundo experimento irá realizar um estudo de caso sobre a forma como ocorre a disseminação da doença sobre o ambiente e o agente humano. Neste sentido, as seguintes características são consideradas:

1. Todas as características utilizadas sobre o experimento anterior referentes a quantidade de mosquito, temperatura do ambiente, focos de reprodução e a vegetação são mantidas.
2. Nesta etapa está presente o agente humano. A quantidade leva em consideração uma média de números de habitantes das regiões escolhidas: Bom Jesus 28.738 habitantes, Chácara das Pedras 6.668 habitantes e suas proximidades 12.782 habitantes (OBSERVAPOA, 2018). Totalizando uma média aproximada de 40 mil habitantes sobre o ambiente da simulação.
3. A disposição dos agentes sobre o ambiente leva em consideração a máxima de quatro pessoas sobre a representação da residência. Instanciadas aleatoriamente sobre o ambiente.
4. Para cada indivíduo no momento de instanciamento são definidos informações como: localização da sua residência, local de trabalho, locais de atendimento médico e outras informações relacionadas ao ambiente.
5. Considerando que a febre amarela atualmente não possui um grande volume de casos documentados sobre a região escolhida, optamos em utilizar a hipótese que os dados de confirmação do ano de 2016 de doenças relacionadas ao *Aedes aegypti*, são possíveis casos de febre amarela (ONDE ESTÁ O AEDES - PREFEITURA DE PORTO ALEGRE, 2018a).
6. Neste momento ainda optamos em não considerar a vacinação, levando em consideração que todos os habitantes estão suscetíveis a infecção e a vacina é uma decisão de gestão pública.

8.2.1 Formas de avaliação dos resultados

Mesmo o ano dos dados obtidos de confirmação serem diferentes em relação a captura dos mosquitos, a região com maiores números da disseminação do mosquito combina com a região com casos de confirmação. Deste modo a avaliação leva em consideração os resultados obtidos sobre o experimento considerando o avanço esperado sobre os agentes mosquitos comparando com os dados obtidos durante as semanas de monitoramento do ano de 2013 (FERREIRA, 2015), assim como também o avanço esperado da doença sobre uma

população sem imunidade. Esperando números próximos ou maiores as dados obtidos de confirmação de casos de dengue no ano de 2016 (ONDE ESTÁ O AEDES - PREFEITURA DE PORTO ALEGRE, 2018a).

9 Planejamento

Neste capítulo é apresentado o cronograma de atividades referentes ao desenvolvimento do trabalho de conclusão.

9.1 Atividades planejadas sobre o trabalho de conclusão I

1. Estudar as principais técnicas sobre geoprocessamento aplicadas em simulações: O objetivo é entender como são aplicadas as técnicas e quais das técnicas existentes contribuem ao trabalho proposto.
2. Estudar modelos computacionais já existentes sobre simulações epidemiológicas: O estudo tem como objetivo auxiliar no futuro desenvolvimento de um modelo para a representação do problema.
3. Estudar as principais formas intervenções sobre epidemias: O estudo tem como objetivo entender como é realizada uma intervenção sobre a ocorrência de uma epidemia, sendo ela, quarentena, vacinação e outros meios. Estas serão utilizadas no desenvolvimento da simulação.
4. Estudar ferramentas de apoio ao desenvolvimento de SMAs: O estudo irá contribuir para uma possível escolha de ferramenta para o processo de desenvolvimento.
5. Estudar as possíveis formas de modelagem do agente: Será realizada a modelagem de um agente com diferentes atributos que contribuem para a sua heterogeneidade, deixando assim a simulação mais rica em realismo.
6. Definir a modelagem de um ambiente com a aplicação de técnicas de geoprocessamento e fenômenos naturais e sociais.
7. Definir qual das arquiteturas existentes para a representação do agente será escolhida para a realização da simulação.
8. Definir cenários sobre a simulação: O objetivo é entender como a disseminação da doença ocorre em diferentes cenários na situações do ambiente. Esse entendimento também será utilizado para a validação do modelo proposto.

9.1.1 Cronograma

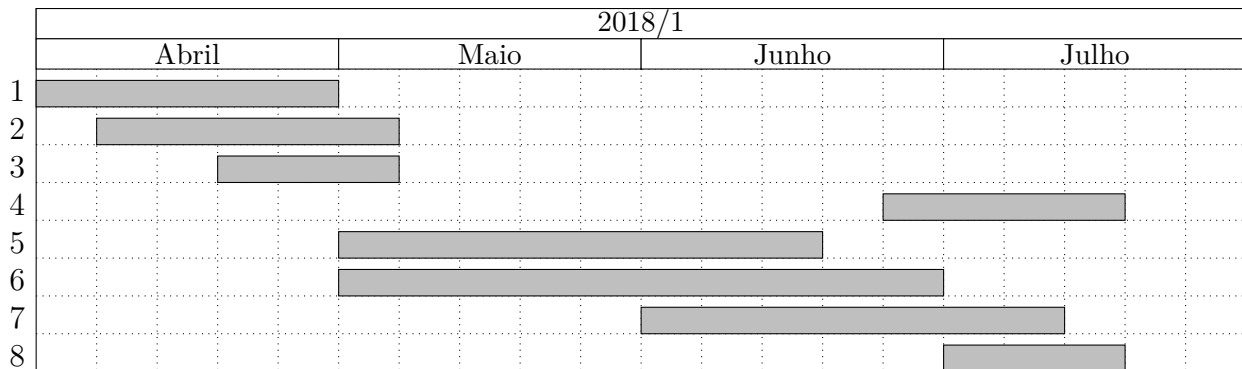


Figura 18 – Cronograma previsto para as atividades no TCC I

9.2 Atividades planejadas sobre o trabalho de conclusão II

1. Reunião com a especialista: Obter sugestões de outros cenários interessantes para mostrar a aplicabilidade da simulação desenvolvida.
2. Preparação do ambiente de desenvolvimento: Definir a estrutura de implementação projeto, adicionar os *frameworks MASON* e *GeoMason* ao ambiente de desenvolvimento, realizar a leitura dos arquivos *Shapefiles* da região escolhida e definir a base de dados escolhida para coletar os resultados.
3. Desenvolvimento do modelo: Transcrever os modelos desenvolvidos dos agentes, assim como o da infecção.
4. Desenvolvimento do ambiente: Aplicar junto ao ambiente a forma como ocorre a interação entre os agentes, a representação dos focos de reprodução do mosquito, informações de sobreposição da região e o comportamento do clima e do período de tempo da simulação.
5. Desenvolvimento e organização da base de dados: Modelar a estrutura sobre a base de dados escolhida para guardar os resultados obtidos durante os experimentos computacionais.
6. Experimentos computacionais: Realizar os experimentos computacionais desenvolvidos para calibrar o modelo. Desenvolver os experimentos sugeridos pela a especialista para apresentação da funcionalidade da simulação como ferramenta de apoio a decisão de combate a doença.
7. Avaliação dos resultados: Analisar e avaliar os resultados obtidos dos experimentos, seguindo como base os valores e o comportamento esperado definidos sobre os cenários.

8. Ajustes de modelos e comportamentos do ambiente: A partir dos resultados obtidos sobre os experimentos, realizar caso necessários, ajustes sobre o modelo dos agentes e da infecção, assim como a representação do comportamento do ambiente da simulação.
9. Apresentação dos resultados: Descrever os resultados obtidos sobre a realização dos experimentos computacionais, após os ajustes sobre o modelo e o comportamento do ambiente.
10. Retorno sobre os resultados: Obter junto a especialista um retorno sobre os resultados dos experimentos desenvolvidos. O objetivo é conseguir uma segunda opinião, além das comparações com os dados reais.

9.2.1 Cronograma

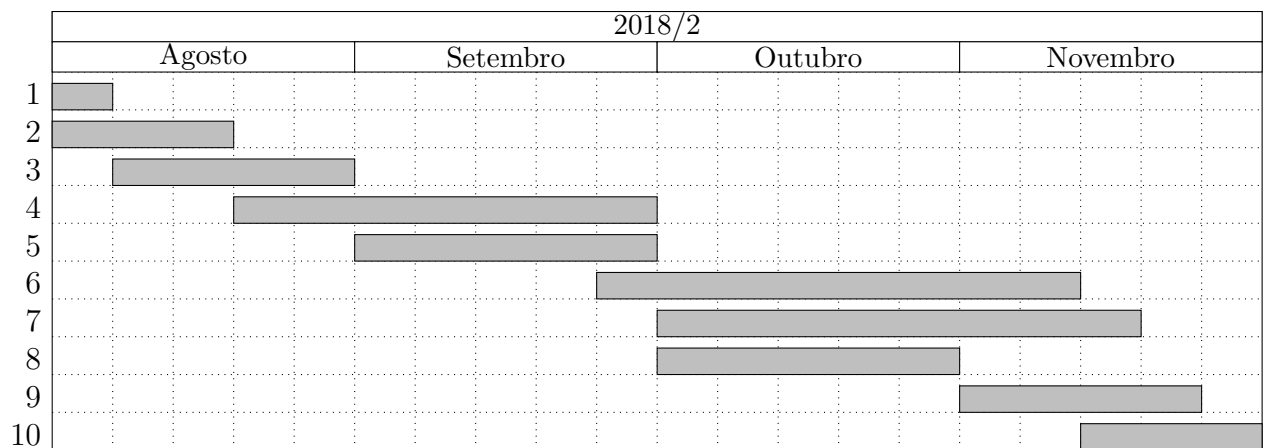


Figura 19 – Cronograma previsto para as atividades no TCC II

10 Considerações Finais

10.1 Dificuldades Encontradas

Durante a realização do trabalho foram encontradas algumas dificuldades, dentre as quais a que causou maior impacto foi referente a elaboração do modelo conceitual para a representação da infecção e do agente mosquito. Uma vez que foi necessário informações que não estão presente na formação acadêmica dos autores do trabalho proposto.

Outras dificuldades encontradas durante o desenvolvimento do trabalho são referente a aquisição de dados para a realização dos ajustes previsto sobre o ambiente da simulação, assim como para realização da parametrização e para o auxílio sobre a avaliação dos resultados dos experimentos futuros.

10.2 Solução desenvolvida

A solução para as dificuldades encontradas relacionadas a área do conhecimento não familiar para os autores, foi a busca de material bibliográfico, como também artigos científicos relacionados ao tema. Material que embasou as decisões tomadas durante o desenvolvimento do trabalho. Outras medidas de auxílio também tomadas, foram obter durante conversas realizadas com profissionais da área de epidemiologia um retorno sobre as decisões tomadas ao longo do desenvolvimento.

Já para as dificuldades encontradas para obter os dados para a realização dos ajustes sobre o ambiente e outras necessidades futuras, foram sanadas com trabalhos relacionados, assim como em órgãos de monitoramento que disponibilizam boletins de vigilância.

10.3 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo apresentar o desenvolvimento de um modelo conceitual para o comportamento epidemiológico da febre amarela, considerando as formas de transmissão e os agentes relacionadas a disseminação em situações urbanas. Entender a ocorrência desses surtos epidemiológicos sobre a população é uma importante ferramenta para o desenvolvimento de medidas de prevenção, assim como também decisões relacionadas a intervenção e controle.

Referências

- ALMEIDA, S. J. de. Modelo e simulação multiagente de uma população de mosquitos *aedes aegypti*. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2007. Citado na página 35.
- ANDERSON, T.; DRAGICEVIC, S. A geosimulation approach for data scarce environments: Modeling dynamics of forest insect infestation across different landscapes. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Spatial and Modeling Laboratory, Department of Geography, British Columbia, Canadá, 2016. Citado na página 29.
- ANDRADE, B. de; FROZZA, R.; BAGATINI, D. Simulação em sistemas multiagentes: Aplicação em endemia. *SBC ENIAC*, XIII Encontro Nacional de Inteligência Artificial e Computacional, Recife, Brasil, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 31.
- BIENCOURT, G. K. da S. Modelagem e simulação de comportamento epidemiológico baseado em sistemas multiagentes. *Universidade Federal de Santa Catarina*, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 31.
- BRAGA, I. A.; VALLE, D. *Aedes aegypti*: inseticidas, mecanismos de ação e resistência. *Epidemiol Serv Saúde*, Epidemiol. Serv. Saúde, Brasília, Brasil, v. 1, n. 1, p. 279–280, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 51.
- COLETTI, M. *The GeoMason Cookbook*. São Paulo, Brasil: [s.n.], 2013. Citado na página 26.
- CROOKS, A. T.; HAILEGIORGIS, A. B. An agent-based modeling approach applied to the spread of cholera. *Elsevier*, Elsevier, Virginia, Estados Unidos, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 31.
- ESTADÃO. 'A febre amarela está aqui para ficar', diz representante da OMS. [S.l.], 2018. Disponível em: <<http://saude.estadao.com.br/noticias/geral,a-febre-amarela-esta-aqui-para-ficar-diz-representante-da-oms,70002156590>>. Acesso em: Mar. 2018. Citado na página 17.
- FERREIRA, D. A. da C. Distribuição espaço-temporal do *aedes (stegomyia) aegypti* (diptera: Culicidae) e casos de dengue e avaliação de variáveis climáticas em porto alegre(rs). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2015. Citado 7 vezes nas páginas 7, 47, 48, 53, 55, 56 e 57.
- G1. *Febre amarela matou 154 pessoas desde julho no Brasil, diz ministério*. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/bemestar/febre-amarela/noticia/febre-amarela-matou-154-pessoas-desde-julho-no-brasil-diz-ministerio.ghtml>>. Acesso em: Mar. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 20.
- GORDIS, L. *Epidemiologia*. London, UK: Revinter, 2010. 5ª. Citado na página 19.
- GRIGOLETTI, P. S. Uma arquitetura baseada em sistemas multiagentes para simulações em geoprocessamento. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, Brasil, p. 45–49, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 7, 24, 25 e 26.

HART, P. E.; NILSSON, N. J.; RAPHAEL, B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 1968. Citado na página 51.

IBGE. *Porto Alegre*. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/porto-alegre/panorama>>. Acesso em: Jun. 2018. Citado na página 47.

INSTITUTO OSWALDO CRUZ. *Conheça o comportamento do mosquito Aedes aegypti e entenda a razão que leva este pequeno inseto a ser taxado desta forma*. [S.l.], 2018. Disponível em: <<http://www.ioc.fiocruz.br/dengue/textos/oportunista.html>>. Acesso em: Mar. 2018. Citado na página 17.

JINDAL, A.; RAO, S. Agent-based modeling and simulation of mosquito-borne disease transmission. *Proc. da 16ª Conferência Internacional sobre Agentes Autônomos e Sistemas Multiagentes*, São Paulo, Brasil, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 9, 35, 39, 40 e 41.

LUK, S. *Multiagent Simulation And the MASON Library*. Department of Computer Science George Mason University: [s.n.], 2015. Citado na página 26.

MAGALHÃES, R. C. da S. *A erradicação do Aedes aegypti: febre amarela, Fred Soper e saúde pública nas Américas (1918-1968)*. Rio de Janeiro, Brasil: FIOCRUZ, 2016. 5ª. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. *Febre Amarela*. [S.l.], 2018. Disponível em: <<http://portalms.saude.gov.br/saude-de-a-z/febre-amarela-sintomas-transmissao-e-prevencao>>. Acesso em: Mar. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

OBSERVAPOA. *Cidade de Porto Alegre*. [S.l.], 2018. Disponível em: <http://portoalegremanalise.procempa.com.br/?regiao=1_10_0>. Acesso em: Mar. 2018. Citado na página 57.

ONDE ESTÁ O AEDES - PREFEITURA DE PORTO ALEGRE. *Casos confirmados - 2016 - Porto Alegre/RS*. [S.l.], 2018. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/d/u/0/viewer?ll=-30.071427622258508%2C-51.15883560348783&z=12&mid=1TyCP58aNAloRD02VfgQ8qCr810E>>. Acesso em: Mar. 2018. Citado 3 vezes nas páginas 48, 57 e 58.

ONDE ESTÁ O AEDES - PREFEITURA DE PORTO ALEGRE. *MI Aedes - Monitoramento Inteligente do Aedes aegypti*. [S.l.], 2018. Disponível em: <http://www.ondeestaoaedes.com.br/default.php?p_secao=9>. Acesso em: Jun. 2018. Citado na página 47.

PREFEITURA DE PORTO ALEGRE. *Clima*. [S.l.], 2018. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/turismo/default.php?p_secao=260>. Acesso em: Jun. 2018. Citado na página 47.

ROCHA, D. I. C. Modelos matemáticos aplicados à epidemiologia. *Faculdade de Economia da Universidade do Porto*, Porto, Portugal, v. 1, n. 1, p. 8–31, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 7, 21 e 22.

RUSSELL, S.; NORVIG, P. *Inteligência Artificial*. Rio de Janeiro, Brasil: NORVIG, 2004. 3ª. Citado 3 vezes nas páginas 7, 23 e 24.

- TIETZMANN, D. *Epidemiologia*. São Paulo, Brasil: [s.n.], 2015. Citado na página 19.
- VASCONCELOS, P. Febre amarela. *Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*, Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical, Belém, Brasil, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 42.
- VASCONCELOS, P. F. da C. Febre amarela: reflexões sobre a doença, as perspectivas para o século xxi e o risco da reurbanização. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, Belém, Brasil, 2002. Citado na página 52.
- VASCONCELOS, P. F. da C. Febre amarela. *Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*, Belém, Brasil, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 39.
- ZHAO, S. et al. Modelling the large-scale yellow fever outbreak in luanda, angola, and the impact of vaccination. University of California San Francisco, San Francisco, United States of America, 2018. Citado 6 vezes nas páginas 7, 9, 35, 38, 42 e 43.