



INSTITUTO
UNIVERSITÁRIO
DE LISBOA

Modelação Baseada em Agentes da Evacuação da Praia da Figueirinha

Eduardo Encarnação Cândido

Mestrado em Engenharia Informática

Orientador:

Doutor Nuno Manuel Mendes Cruz David, Professor associado,
ISCTE-IUL

Co-Orientador:

Doutor Nelson Ricardo Perdigão Pereira, Professor auxiliar convidado,
ISCTE-IUL

Novembro, 2022

Departamento de Ciências e Tecnologias da Informação

Modelação Baseada em Agentes da Evacuação da Praia da Figueirinha

Eduardo Encarnação Cândido

Mestrado em Engenharia Informática

Orientador:

Doutor Nuno Manuel Mendes Cruz David, Professor associado,
ISCTE-IUL

Co-Orientador:

Doutor Nelson Ricardo Perdigão Pereira, Professor auxiliar convidado,
ISCTE-IUL

Novembro, 2022

Agradecimento

Quero agradecer aos meus pais por terem me dado a oportunidade de continuar a estudar e seguir os meus sonhos.

Quero também agradecer ao meu orientador, Nuno David, coorientador, Nelson Perdigão e professora Ângela Santos por todos os conselhos, ajuda e orientação fornecida durante a elaboração desta dissertação. Quero ainda agradecer ao Serviço Municipal de Bombeiros e Proteção de Setúbal civil pela cedência de dados, fundamentais para a realização da presente tese.

Por fim quero agradecer aos meus colegas e amigos que sempre me ajudaram e apoiaram quando mais precisei.

Resumo

A falta de informação e de medidas de evacuação no caso de tsunamis ou de qualquer outro fenómeno natural é um problema que deveria ser mitigado o mais rápido possível. Uma solução acessível é recorrer a modelações baseadas em agentes que permitem criar um mundo virtual onde é possível simular situações da vida real sem ser preciso adquirir ferramentas de custo elevado ou mesmo ajuda de terceiros.

Neste trabalho será elaborada uma modelação baseada em agentes para poder simular a evacuação da praia da Figueirinha em Setúbal e aplicar a diferentes cenários de modo a conseguirmos estudar o comportamento das pessoas, poder implementar novas medidas de segurança ou mesmo contribuir com novas sugestões de evacuação. Esta modelação será feita recorrendo à linguagem Python utilizando também a biblioteca mesa-geo com o seu sistema de informação geográfico de modo a poder usar o território da praia com todas as suas características mapeadas na simulação.

Os resultados mostram que na maior parte dos casos a evacuação de emergência não é bem-sucedida. Segundo as experiências efetuadas, quando a praia se encontra sobrelotada, cerca de 45% dos utentes da praia da Figueirinha não conseguem alcançar a zona de segurança antes da chegada da primeira onda, i.e., aproximadamente 35 minutos.

Palavras-chave: Evacuação, Modelação Baseada em Agentes, Sistema de informação geográfico, Simulação, Tsunami, Python.

Abstract

The lack of information and evacuation measures both in the case of tsunamis and in the case of any other natural phenomenon is a problem that should be mitigated as soon as possible. An affordable solution is to use agent-based model that allows us to create a virtual world where it is possible to simulate real-life situations without having to use expensive tools or even help from third parties.

In this project an agent-based model will be developed to be able to simulate the evacuation of Figueirinha beach in Setúbal and apply it to different scenarios to study the behaviour of the people, implement new security measures or even contribute with new suggestions for evacuation. This model will be developed using the Python language, the mesa-geo library and the geographic information system built into it, in order to be able to use the beach territory with all its characteristics in the simulation.

Results show that no matter how accessible the beach is, in most cases the evacuation is not successful. That said, according to the experiments, when the beach is overcrowded, we have about 45% of Figueirinha beach users who are unable to evacuate out of the flood zone before the arrival of the first wave, which is in 35 minutes of simulation.

Keywords: Evacuation, Agent-Based Modeling, Geographic information systems, Simulation, Tsunami, Python.

Índice

Agradecimento	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Capítulo 1. Introdução	1
1.1. Motivação	1
1.2. Área de Estudo	3
1.3. Questões de Investigação	4
1.4. Objetivos	4
1.5. Método de Investigação	5
1.6. Organização do Documento	5
Capítulo 2. Conceitos Gerais e Revisão da Literatura	8
2.1. Simulação Computacional	8
2.1.1. Simulação Baseada em Agentes	9
2.1.2. Modelação de Evacuação de um Tsunami	10
2.1.3. Sistemas de Informação Geográficos	11
2.2. Software Usado	13
2.2.1. Python	13
2.2.2. Mesa	14
2.3. GeoSpace	15
2.3.1. O que são dados Geoespaciais	16
2.3.2. O que é tecnologia Geoespacial	16
2.3.3. GeoJSON	16
2.3.4. QGIS	17
2.4. Mesa-geo	17
2.5. Algoritmos de Navegação	18
2.5.1. Colisões	19
2.6. Trabalhos Relacionados	20

2.6.1.	An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: Decision-making and life safety	20
2.6.2.	Implementation of Tsunami Evacuation Maps at Setubal Municipality	21
2.6.3.	Agent-based simulaton of alternative classroom evacuation scenarios	21
2.6.4.	Agent-based models of human response to natural hazards: systematic review of tsunami evacuation	22
2.6.5.	Recent advances in agent-based tsunami evacuation simulations: case studies in Indonesia, Thailand, Japan and Peru	23
Capítulo 3. Modelo e Algoritmo de evacuação baseado em pontos de referência		25
3.1.	Modelo e relação espaço/tempo na simulação	25
3.2.	Agentes	26
3.2.1.	Descrição do Algoritmo	27
3.2.2.	Algoritmo de deslocamento dos agentes	33
3.3.	Ambiente	35
3.3.1.	Interações com o Ambiente	35
3.4.	Tratamento de Colisões	36
3.5.	Algoritmo de Evacuação de Grupo	37
3.5.	Parâmetros Importantes das Experiências	40
Capítulo 4. Implementação em Python		44
4.1.	Agentes do Modelo	44
4.1.1.	Pessoas da Praia	44
4.1.2.	Pontos de Referência na praia	46
4.1.3.	Pontos de Referência na estrada	46
4.1.4.	Mapa	47
4.2.	Modelo	47
4.3.	Servidor	48
4.3.	Diagrama UML das Classes	49
Capítulo 5. Simulações e Resultados		52
5.1.	Experiência 1, Variação do Número de Agentes e Modo de Organização	52
5.2.	Experiência 2, Variação da Distribuição dos Agentes na Praia	56
5.3.	Experiência3, Simulações com Dados do SMPCB	56
5.3.1.	Junho	58
5.3.2.	Julho	59

5.3.3. Agosto	60
5.3.4. Setembro	60
5.4. Resumo das Experiências	62
Capítulo 6. Conclusão	64
Referências Bibliográficas	68

Índice de Imagens

Figura 1. Fotografia tirada por utilizador rsimoes via dronestagr	4
Figura 2. Topografia e área inundada da praia da Figueirinha, com área visível da figura 1 assinalada a verde (Santos et al., 2017).	4
Figura 3. Método de investigação “ <i>Design Research Method</i> ” (Brocke et al. 2020)	5
Figura 4. Diagrama de representação de um SIG	13
Figura 5. Exemplo de um jogo feito com a biblioteca <i>pygame</i>	14
Figura 6. Visualização da interface e funcionalidade da biblioteca MESA	15
Figura 7. Exemplo de um ficheiro geoJSON	17
Figura 8. Exemplo de pontos de referência para a decisão navegacional na praia da Figueirinha	19
Figura 9. Representação do tipo de colisão “ <i>Toward Colision</i> ”	19
Figura 10. Representação do tipo de colisão “ <i>Away Colision</i> ”	20
Figura 11. Representação do tipo de colisão “ <i>Glancing Colision</i> ”	20
Figura 12. Imagem das áreas de segurança, assinaladas a vermelho, da praia da Figueirinha	27
Figura 13. Imagem das áreas de segurança, assinaladas a vermelho, ampliadas da praia da Figueirinha	28
Figura 14. Fluxograma da procura da zona segura mais próxima de cada ponto de referência	28
Figura 15. Atribuição da zona segura aos pontos de referência da zona arenosa da praia	29
Figura 16. Atribuição da zona segura aos pontos de referência fora da zona arenosa da praia	29
Figura 17. Fluxograma da procura do ponto de referência mais próximo	30
Figura 18. Interligação dos pontos de referência	31
Figura 19. Fluxograma da movimentação do agente	32
Figura 20. Ilustração da movimentação do agente	33
Figura 21. Ilustração da área de procura do líder no algoritmo de evacuação em grupo	38
Figura 22. Fluxograma da movimentação do adulto em grupo	39
Figura 23. Ilustração do erro de navegação das colónias escolares	39
Figura 24. Ilustração da navegação das colónias escolares.	40
Figura 25. Imagem das diferentes partes da praia.	47
Figura 26. Representação visual do modelo baseado em agentes	49
Figura 27. Diagrama das classes do Agente	50

Figura 29. Resultados das experiências com 500 agentes	53
Figura 30. Resultados das experiências com 1000 agentes	54
Figura 31. Resultados das experiências com 1500 agentes	54
Figura 32. Caso onde uma criança atrasa a evacuação de outros agentes	55

Índice de Tabelas

Tabela 1. Principais atributos do agente do tipo Pessoa	45
Tabela 2. Principais atributos do agente do tipo <i>MarkerAgent</i> .	46
Tabela 3. Principais atributos do agente do tipo <i>MarkerRoadAgent</i>	46
Tabela 4. Atributos da classe <i>MapAgent</i>	47
Tabela 5. Principais atributos do modelo	48
Tabela 6. Elementos da interface gráfica, representados na figura 26 e a sua descrição	49
Tabela 7. Resultados da experiência 1	52
Tabela 8. Taxa de mortalidade da experiência 1	53
Tabela 9. Resultados das simulações usando a parte ocidental da praia	56
Tabela 10. Resultados das simulações usando a parte oriental da praia	56
Tabela 11. Dados do SMPCB com o número da população da praia da Figueirinha nos meses de época balnear	57
Tabela 12. Resultados do mês de junho da parte da manhã	58
Tabela 13. Resultados do mês de junho da parte da tarde	58
Tabela 14. Resultados do mês de junho da parte da noturna	59
Tabela 15. Resultados do mês de julho da parte da manhã	59
Tabela 16. Resultados do mês de julho da parte da tarde	59
Tabela 17. Resultados do mês de julho da parte noturna	60
Tabela 18. Resultados do mês de agosto	60
Tabela 19. Resultados do mês de setembro	61
Tabela 20. Taxa de mortalidade da experiência 5.3 do mês de junho e julho	61
Tabela 21. Taxa de mortalidade da experiência 5.3 do mês de agosto e setembro	61
Tabela 22. Percentagens dos adultos e crianças que não completaram a evacuação, durante o período da tarde, nos meses considerados da experiência 3	61

CAPÍTULO 1

Introdução

Este capítulo tem como objetivo explicar a importância da realização desta dissertação. Para tal finalidade, será importante referir o que motivou o estudo do tema em questão e qual será o seu propósito.

A introdução desta dissertação está estruturada da seguinte forma: motivação, área de estudo, questões de investigação, objetivos e métodos de investigação.

1.1. Motivação

Os desastres naturais sempre foram, e serão, fenómenos fora do controlo humano, que provoca danos ao património e ocasionalmente um grande número de vítimas (Klein, 2018) sendo alguns destes fenómenos registados ao longo da história da humanidade. Porém, isto não impede que nós não consigamos encontrar formas alternativas de nos protegermos destas catástrofes naturais.

Dentro da categoria dos desastres naturais, os sismos e tsunamis são alguns dos fenómenos que mais mortes e feridos registam (Klein, 2018). Segundo Emídio (2014), os tsunamis são, em geral, desencadeados por sismos de elevada magnitude com epicentro no oceano, erupções vulcânicas submarinas ou pelo deslocamento e imersão de grandes massas sólidas que provocam um súbito deslocamento vertical de uma coluna de água do oceano. As ondas de tsunami propagam-se a uma velocidade de 500 a 1000 km/h em oceano aberto; mas ao aproximar-se de zonas costeiras, o facto do nível da água diminuir resulta numa diminuição da velocidade e conseqüente aumento da altura das ondas (IOC. 2013).

Por exemplo, o sismo de Lisboa de 1755, de magnitude 8.5 a 9.5, causou cerca de noventa mil vítimas, das quais cerca de 2000 localizadas na zona de Setúbal (Santos et al. 2017). Passados 30 minutos, este desastre foi procedido por um tsunami que trazia ondas de 30 metros, causando graves danos a todo o sul de Portugal e inundando grande parte da zona costeira de Setúbal (Santos et al. 2017). Devido a nunca ter acontecido uma catástrofe desta dimensão na história de Portugal, i.e., o país não tinha memória e, portanto, não estava preparado, aconteceu o pior cenário, com milhares de mortos.

Outra ocorrência foi registada em 28 de fevereiro de 1969 quando um sismo conhecido como o último grande sismo de Portugal (Quintino, 1970), de magnitude 8, atingiu o país durante uma noite de inverno. Este sismo também foi registado em Marrocos, em Bordéus e nas Canárias; em Portugal a zona mais próxima do epicentro foi a zona do Algarve (Marques, 2017). Contudo, segundo Santos et al. (2017), caso tivesse acontecido no verão e durante o dia, poderia ter resultado numa tragédia de grande dimensão.

Segundo Emídio (2014), áreas suscetíveis a este tipo de ocorrências continuam a ser ocupadas sem que exista uma avaliação adequada das suas condições de risco. Queirós (2009) argumenta que é a concentração das pessoas e atividades em áreas críticas que criam vulnerabilidades na comunidade. De acordo com a pesquisa de Santos et al (2018), deveriam ser implementadas mais atividades educativas de forma a sensibilizar a população para os riscos subjacentes, a prevenção e a implementação de medidas adequadas.

Algumas medidas de mitigação de risco têm sido, contudo, adotadas, ainda que pontuais. No trabalho de Santos et al (2017), é relatado que o Serviço Municipal de Proteção Civil e Bombeiros de Setúbal (SMPCB) instalou painéis eletrónicos, equipados com colunas de som, com indicações de segurança e pontos de interesse para residentes e turistas. Os autores informam também que este tipo de painéis é único no país e providenciam uma forma diferente de fornecimento de informação.

Para ajudar na prevenção de catástrofes temos o quadro de Sendai para a redução de risco de desastres, elaborado na terceira conferencia mundial das Nações Unidas, que, segundo Santos et al. (2020), salienta as seguintes prioridades:

- Perceber o risco de desastre.
- Fortalecer organizações para gestão do risco de desastre.
- Investir na redução do risco de desastre.
- Fortalecer a preparação de resposta eficaz.

Ainda segundo Santos et al. (2020), o Gabinete das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR) publicou diretrizes práticas, tendo em vista que diversas partes interessadas de todo o mundo as possam implementar no seu território.

Todavia, é necessário um investimento de capital e de tempo para testar uma medida de prevenção, e logo a falta desses recursos resulta na falha da sua implementação. Por outras palavras, uma vez que não é possível provocar voluntariamente um sismo ou um tsunami, a alternativa seria a execução de simulacros, que por norma são atividades que requerem recursos monetários, voluntários e tempo de preparação. Fatores que são difíceis de reunir e podem impossibilitar a execução dos simulacros.

Uma das formas de estudar a implementação de medidas de evacuação e mitigar a dificuldade da realização de testes, consiste em realizar simulações por computador onde são tomados em conta características relevantes sobre a zona de risco de uma catástrofe natural. As simulações computacionais quando comparadas com simulacros (e.g. exercícios de evacuação) são geralmente mais fáceis de aplicar e menos dispendiosas, sendo possível analisar diversos cenários de forma prática com uma quantidade de informação necessária e suficiente sobre a área de risco. São assim, uma opção capaz de contribuir para o estudo de zonas de risco e desta forma contribuir para prevenir tragédias e evitar mortes (Bateman et al. 2013).

Apesar do uso de simulação computacional ter as suas limitações, é uma ferramenta importante na medida em que fornece informação útil para a implementação de estratégias de evacuação para os casos em estudo. Muitas simulações, além de auxiliarem na fase de testes, ajudam também no desenvolvimento de novas técnicas de evacuação (Champion et al. 1999). Os benefícios desta técnica devem-se à velocidade do processamento da informação e à possibilidade de considerar diferentes níveis de detalhe de cenários de forma exploratória sobre os comportamentos dos seres humanos e das características das zonas de risco. Por outro lado, através das simulações computacionais podem ser identificadas novas áreas seguras e estratégias, que dificilmente seriam possíveis de identificar com outras técnicas (Bateman et al. 2013).

1.2. Área de Estudo

Como já foi referido, a área a ser estudada nesta dissertação é a praia da Figueirinha em Setúbal. É uma das praias com bandeira azul mais movimentadas e mais acessível, com uma média de mil e quinhentas pessoas por dia durante a época balnear. Esta praia, ilustrada pela figura 1, é considerada uma referência quanto às soluções adotadas para prevenir a discriminação dos cidadãos com mobilidade reduzida. Contém zonas de estadia nos areais, edifícios de apoio, painéis informativos, chuveiros e bebedouros (Setúbal Município Participado, 2021).



Figura 1. Foto tirada por utilizador rsimoes publicada no site <https://www.dronestaqr.am/>.

A figura 2, retirada do trabalho de Santos et al. (2017), representa a área inundada da praia da Figueirinha na possível eventualidade de um tsunami.

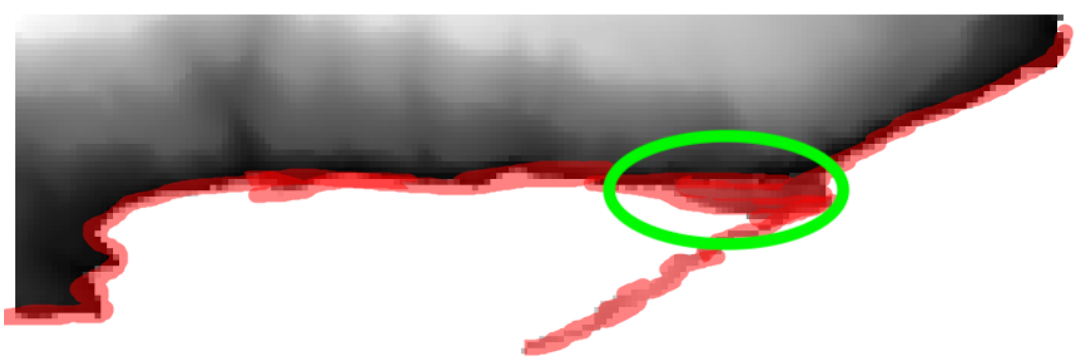


Figura 2. Topografia e área inundada da praia da Figueirinha, com área visível da figura 1 assinalada a verde (Santos et al., 2017).

1.3. Questões de Investigação

As questões a serem respondidas com esta dissertação são as seguintes:

- Qual a possibilidade de evacuação, em caso de tsunami, a partir do momento em que se sente um sismo na praia da Figueirinha, considerando determinados cenários?
- Quais as taxas de mortalidade na praia da Figueirinha nos cenários simulados?
- Quais medidas e os melhores trajetos de evacuação, tendo em conta a topologia do terreno da praia e a segurança das pessoas até chegar a um ponto seguro?

1.4. Objetivos

Com esta dissertação, pretende-se desenvolver um modelo baseado em agentes para simulação utilizando a *framework* Mesa do *Python* e a informação geográfica digital da praia da Figueirinha. O

modelo pretende simular a evacuação de agentes que escapam para sítios específicos designados como zonas de concentração ou segurança. O sismo marca o início da simulação, considerando o cenário de 1755 (Santos et al. 2017), e pretende-se que os agentes evacuem as áreas inundadas em menos de 35 minutos, uma vez que esse é o tempo médio de chegada da primeira onda de um tsunami (Santos et al. 2017).

Com estas simulações pretende-se obter dados e informações de uma catástrofe natural, perceber qual a melhor forma de agir e qual o melhor caminho a percorrer, de modo a garantir que todos os agentes conseguem chegar em segurança aos pontos seguros da praia. Será também observado os comportamentos dos agentes tanto a nível individual como a nível coletivo, com o objetivo de diagnosticar possíveis problemas que dificultam o processo de evacuação, podendo ser o caminho para possíveis soluções. Como por exemplo auxiliar a SMPCB a melhorar e implementar os planos de emergência.

1.5. Método de Investigação

O método de investigação escolhido para a elaboração desta dissertação é designado por “*Design Research Method*”, ilustrado na figura 3 (Brocke et al. 2020). Este é um método iterativo que garante que não existem incompatibilidades no sistema e que todas as fases propostas sejam concluídas. Assim sendo, este método estará dividido em cinco pontos:

- 1- Definição de objetivos: averiguar e estabelecer quais os recursos necessários para a elaboração deste trabalho de modo a realizar os objetivos propostos.
- 2- Design da simulação: elaborar a parte prática da dissertação, usando as técnicas que foram estabelecidas no primeiro ponto.
- 3- Implementação da simulação: Implementar a simulação criada no segundo ponto, de modo que não existam incompatibilidades entre as tecnologias usadas.
- 4- Testes ao sistema: neste ponto serão feitos vários testes ao sistema, tendo em vista corrigir possíveis erros.
- 5- Análise de resultados: Concluído o ponto quatro, analisar os resultados obtidos.

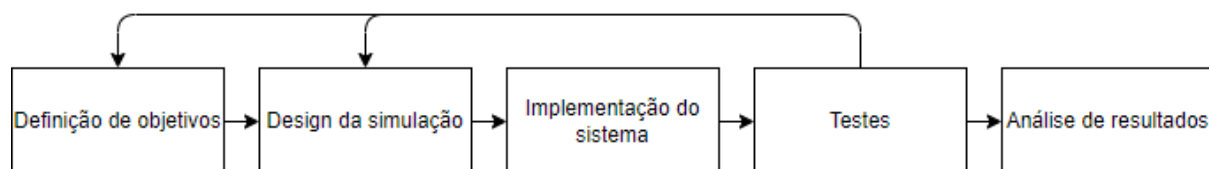


Figura 3 . Método de investigação “*Design Research Method*” (Brocke et al. 2020).

1.6. Organização do Documento

O presente documento está dividido nos seguintes capítulos:

Capítulo dos Conceitos Gerais e Revisão da Literatura (Capítulo 2), onde serão abordados os temas conceptuais que estão envolvidos neste trabalho e quais a suas vantagens. De seguida, será indicado que software foi utilizado com a respetiva justificação, de modo a clarificar a utilização dos mesmos. Serão discutidos também alguns algoritmos de navegação e a sua importância. Por fim, são apresentados alguns trabalhos relacionados com este tema.

Segue-se o Capítulo 3, que se refere ao Modelo e Algoritmo de evacuação baseado em pontos de referência desenvolvido para esta dissertação, no qual será providenciada uma explicação detalhada do mesmo, as suas vantagens e o porquê da sua escolha. De seguida, apresentamos uma descrição das características dos agentes, do ambiente e do modelo criado. Descrevemos também a navegação dos agentes e o tratamento das colisões entre os mesmos. A terminar este capítulo, é apresentada uma descrição do algoritmo sobre evacuação baseada em grupos.

No capítulo sobre Implementação (Capítulo 4), são abordadas as implementações técnicas em Python dos elementos do modelo construído para a elaboração das simulações. São apresentadas as classes mais relevantes, bem como os seus atributos. Por fim, apresentamos a interface gráfica desenvolvida.

No capítulo 5 (Simulações e Resultados), são apresentadas as simulações efetuadas e os diferentes cenários que foram considerados. Serão também elaboradas algumas conclusões a partir de algumas constatações observadas durante as simulações.

Por último, no capítulo Conclusão (Capítulo 6), são apresentadas as conclusões sobre as questões de investigação definidas tendo em consideração os objetivos. Ainda neste capítulo, são apresentadas algumas sugestões de evacuação com o objetivo de melhorar os resultados obtidos e algumas experiências a realizar como trabalho futuro.

Conceitos Gerais e Revisão da Literatura

Este capítulo tem como objetivo abordar os temas que contextualizam os principais conceitos que foram utilizados ao longo deste trabalho.

Primeiro, apresentam-se alguns termos conceptuais como Simulação computacional, simulação baseada em agentes, sistemas de informação geográficos e modelação de evacuação de um tsunami. Depois serão apresentados os *softwares* que foram utilizados e alguns algoritmos relacionados com a navegação. Por fim, é introduzida uma secção final com alguns dos trabalhos relacionados com o tema em questão.

2.1. Simulação Computacional

O tema de simulação computacional tem sofrido um notável avanço tecnológico que por sua vez tem contribuído para a solução de problemas complexos em diversas áreas como sejam as engenharias, a biologia, a economia, ciências, entre outras. Como consequência da sua utilidade, tem vindo a ser exigido um foco cada vez maior da comunidade científica de modo a responder a problemas cada vez mais complexos (Varela, 2011).

Segundo Naylor et al. (1966), o método científico tem quatro principais etapas:

- A observação de factos.
- Formulação de hipóteses.
- Previsão do comportamento do Sistema.
- Experimentação/ validação.

De acordo com os autores, este tipo de simulação ajuda a ultrapassar obstáculos relativos ao método científico.

Para Champion et al. (1999) a simulação é uma ferramenta útil e eficaz para reproduzir e analisar uma vasta gama de problemas complexos que seriam difíceis de estudar através de outros meios que poderiam ter como consequência custos elevados ou mesmo riscos para a saúde.

Ainda segundo Varela (2011), a simulação pode ser representada através de vários tipos de modelos, não mutuamente exclusivos, que podem ser classificados com os seguintes tipos:

- Modelos estocásticos: são modelos que para os mesmos dados de *input* podem produzir diversos resultados de *output* e a sua distribuição de soluções está associada a uma distribuição de probabilidades.

- Modelos determinísticos: este tipo de modelo produz os mesmos resultados de saída para os mesmos resultados de dados de entrada, ou seja, independentemente de quantas vezes a experiência for repetida, a solução será sempre igual.
- Modelo estático: é um modelo que não se deixa influenciar pela variável tempo.
- Modelo dinâmico: ao contrário do modelo estático, neste modelo o resultado da simulação é influenciado pelo tempo.

Harrell et al. (2000) argumentam que a simulação é uma replicação de uma situação de um mundo real criada num mundo virtual e que serve para avaliar as suas características. Por outras palavras, simulação; no caso presente, será a criação de um cenário virtual de evacuação de um tsunami que pode ser estudado e controlado pelo utilizador sem grandes custos associados.

2.1.1. Simulação baseada em agentes

Uma simulação baseada em agentes é um método utilizado para simular o comportamento e interações, tanto de indivíduos como de multidões, envolvendo ainda o meio ambiente onde se encontram. Com este tipo de abordagem, obtemos interações tanto a nível macro como a nível micro dos agentes.

Este tipo de modelagem concretiza a ideia de que o mundo pode ser modelado por meio de múltiplos agentes distribuídos em que cada um deles segue um conjunto de regras simples (Lima et al. 2009). É através das suas interações e comportamentos que conseguimos ter uma melhor noção do que pode acontecer numa situação real. Poderemos observar determinados padrões e detalhes que sem este tipo de abordagem seriam mais difíceis de identificar.

Embora distintos nas suas aplicações, estes modelos tentam criar pequenos ecossistemas num computador com o objetivo de determinar como as interações e comportamentos dos vários agentes individuais produzem estruturas e padrões (Lima et al. 2009).

Contudo, um modelo baseado em agentes requer um conhecimento detalhado dos mecanismos da capacidade de tomada de decisão das pessoas para transformá-los em código de uma linguagem de programação (Liu et al. 2016).

Neste trabalho será implementado um modelo baseado em agentes, de modo a poder simular a evacuação da praia da Figueirinha em Setúbal no caso de ocorrência de um tsunami. Será vantajoso este tipo de modelação pois, como referido acima, é apropriado para analisar interações entre agentes, os seus comportamentos e também as suas interações com o seu meio ambiente (Liu et al. 2016). Com este modelo, será possível tomar em consideração diversos comportamentos característicos de várias faixas etárias, tanto a nível individual como a nível coletivo.

Segundo Bonabeau (2002), chefe científico na *Telepathy Labs*, a modelação baseada em agentes (*agent-based modeling*) apresenta alguns benefícios em relação a outras técnicas de modelação e pode ser descrita em três frases: fornecer uma descrição natural do sistema; permitir capturar fenómenos decorrentes; e ser um tipo de modelagem flexível, visto que pode ser adaptada a vários sistemas com diferentes características.

Bonabeau (2002) salienta ainda que este conceito consegue abordar outros tipos de situações como: quando os agentes possuem um comportamento complexo, incluindo aprendizagem e adaptação; quando as interações entre os agentes são complexas, não-lineares, descontínuas; quando a topologia das interações é heterogénea e complexa; quando o sistema é descrito de forma mais natural através de atividades ao invés de processos.

No entanto, este tipo de modelação também apresenta obstáculos. Primeiramente, é um modelo que deve ser construído de modo a ter uma correta descrição dos fenómenos envolventes e os detalhes necessários e suficientes para servir o seu propósito, o que em alguns casos pode ser visto como um desafio, i.e., capacidade de abstração. Outro obstáculo na utilização deste método, é o facto de os seres humanos possuírem muitas vezes comportamentos imprevisíveis, irracionais, com escolhas subjetivas e de psicologia complexa, tornando-se em alguns casos difíceis de parametrizar e quantificar tais características e integrá-las no algoritmo. A capacidade computacional também deve ser levada em consideração quando se opta por este tipo de modelagem. Em algumas simulações são necessárias máquinas com boas características computacionais para seja possível uma simulação viável (Lima et al., 2009).

De acordo com o trabalho de Siyam et al. (2019), existem vários tipos de abordagens para este tipo de modelação, como por exemplo, modelos macroscópicos, usados para cenários de grande escala e modelos microscópicos que são usados para cenários de pequena escala. Neste estudo, o modelo é macroscópico onde os agentes representam as pessoas que estão distribuídas pela praia e o ambiente é a própria praia.

2.1.2. Modelação de Evacuação de um Tsunami

No passado as abordagens a este tipo de problema consistiam em: métodos estatísticos como o *shortest path*, *minimum cost network flow* e *quickest path* e redes dinâmicas (Wang et al. 2015), que são denominados como métodos tradicionais. Porém estes métodos têm falhas que impedem que sejam implementadas algumas características do mundo real. Por exemplo, a solução do caminho mais curto não considera os efeitos de congestionamento de veículos, e no geral, também não tomam em consideração elementos como pânico e medo (Lammel et al. 2011).

Métodos tradicionais não têm a expressividade para descrever o poder de decisão do ser humano nem perceber as interações que os mesmos têm entre si (Mas et al. 2012). O comportamento humano é muito complexo e por consequência é o aspecto mais difícil de implementar no processo de evacuação com fórmulas matemáticas. Colocado de outra forma, estes métodos tornam-se demasiado simplistas quando se trata de descrever sentimentos e atitudes imprevisíveis num momento de aflição, devido ao facto destes não serem modeláveis na sua totalidade, ou ficarem aquém da realidade.

A melhor abordagem para o problema da evacuação é a utilização de um método de aprendizagem iterativa, como por exemplo a modelação baseada em agentes. Este tipo de modelação já demonstrou que consegue fornecer informação que não é possível com outros métodos e também consegue capturar melhor a dinâmica de sistemas humanos e de sistemas naturais como é reportado por Wang et al. (2015).

Como é demonstrado no trabalho de Galhardi et al. (2019), a simulação de um tsunami ofereceu suporte para geração de informação importante relativamente ao planeamento de ações. Vários estudos na área das ciências sociais também adotaram a modelação baseada em agentes como: o trabalho de Chen et al. (2014) para a modelação de fluxos de tráfego; o trabalho de Uno et al. (2008) que é um sistema baseado em agentes evacuação de desastres considerando informação geográfica, no qual conseguiram quantificar os danos causados pelos agentes que representam os seres humanos; e o trabalho de Liu et al. (2008), no qual foi elaborado um modelo de evacuação multiagente de escolha dinâmica de rotas considerando a evacuação de grupo, familiaridade com o local de fuga e pontos de referência. Os dois últimos trabalhos estão na área de investigação do projeto implementado que suporta esta dissertação.

2.1.3. Sistemas de Informação Geográficos

Neste projeto será utilizada informação de Sistemas de Informação Geográficos (SIG) na simulação tais como a localização dos agentes. É com o auxílio deste tipo de informação que vai ser realizada a simulação da praia da Figueirinha.

Sistemas de informação geográficos são sistemas (*hardware* e *software*) que contêm dados geográficos e permitem gerir, analisar e criar o mesmo tipo de dados, bem como, conectar os mesmos a um mapa fornecendo-lhes detalhes completos e características. Estes dados têm a particularidade de serem georreferenciados; com efeito, é uma característica que permite ao utilizador obter informação da localização geográfica dos mesmos (Esteves et al. 2020). É uma ferramenta que é vantajosa quando se trabalha com mapas, porquanto fornece uma base para o mapeamento e para a análise, podendo ser usada em diversas indústrias. A ferramenta também ajuda a compreender padrões, relações e o contexto geográfico.

A componente de software contempla também a conversão de formatos, mudança de projeção, conversão de vetores *raster*, ferramentas de visualização, renderização, análise de resultados e avaliação de incertezas nos *inputs* e nos *outputs* (Mas et al. 2012).

O utilizador destes sistemas é quem decide que atributos são importantes para serem estudados. Por exemplo, numa floresta, que é indispensável ao ser humano, preocupamo-nos com o estado da madeira, o nível de poluição, ou ainda se o solo está bem fertilizado. O SIG ajuda-nos a analisar estas interligações e a apresentar resultados dos dados relacionados com o seu meio ambiente (Bolstad, 2016).

Este tipo de sistema pode ser classificado como uma “caixa de ferramentas” que nos permite estudar dados espaciais quando utilizados num computador; efetivamente, existem autores que consideram o SIG como um sistema informático, pois, comparam-no a uma biblioteca que, em conjunto com o computador, fornece as ferramentas necessárias para a análise de dados espaciais (Clarke, 1999).

Segundo Johnston (1998), os SIG são hardware e software para gerir, armazenar, extrair, medir, organizar e exibir dados espaciais que foram digitalizados e registados num sistema de coordenadas comum.

Varela (2011) considera que os SIG são uma combinação de hardware e software em sistemas de informação que permitem gerir e analisar acontecimentos espaciais, como mostrado na figura 4.

É de notar que embora existam diversas ferramentas para integrar a modelação baseada em agentes, este ainda é um processo difícil onde é necessário tomar em consideração vários aspetos como: o tipo de dados que precisamos, como deve ser utilizada a nossa base de dados e ainda como devem os agentes interagir com os dados (Mas et al. 2012).

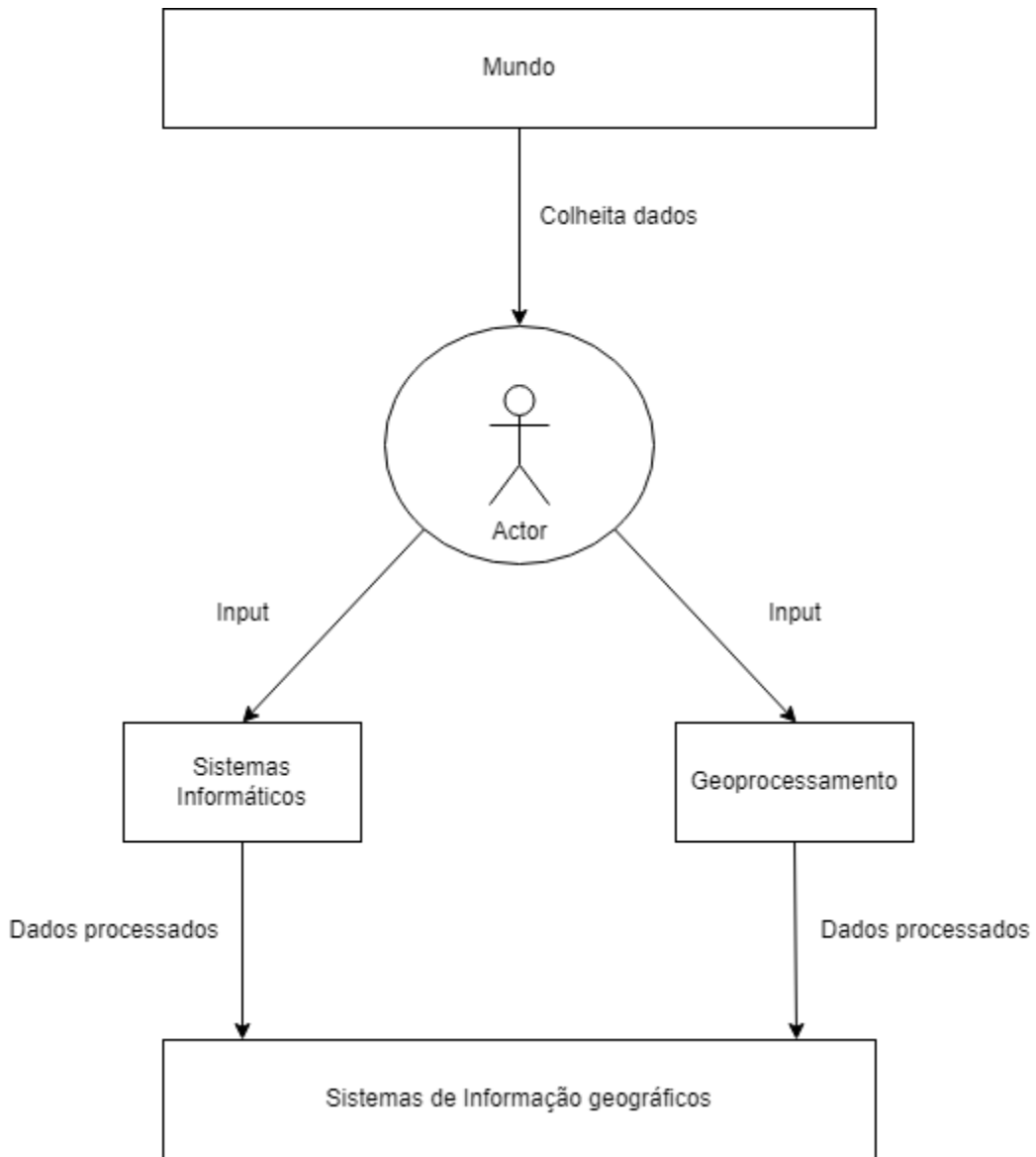


Figura 4. Diagrama de representação de um SIG.

2.2. Software Usado

Para a realização do projeto que suporta esta dissertação, foi feita a investigação sobre várias tecnologias relativamente à sua utilização e aplicabilidade.

2.2.1. Python

Python foi a linguagem de programação escolhida para a realização do projeto que suporta esta dissertação. A linguagem Python é uma linguagem de alto nível e orientada a objetos sendo normalmente usada para desenvolver sites e software, automação de tarefas, bem como análise e visualização de dados. Como é relativamente fácil de aprender, o Python foi adotado não só por

programadores, mas também por muitos não programadores, para uma variedade de tarefas quotidianas (Taft, 2007).

Esta foi a linguagem escolhida também devido a ser uma linguagem versátil, não se limitando apenas a uma finalidade. Por exemplo, é usada no âmbito da inteligência artificial, para treinar redes neuronais com ajuda da biblioteca *TensorFlow*; no âmbito da aprendizagem automática, para gerir grandes bases de dados com ajuda da biblioteca *Scikit-learn*; no âmbito de aplicações web pois é uma linguagem de scripting com diversas bibliotecas para ajudar os próprios programadores; no âmbito de computação científica com as suas bibliotecas de álgebra e de gráficos matemáticos, tais como o *NumPy*, *SciPy* e *Matplotlib*, que tornam o uso desta linguagem apropriada para operações algébricas complexas; também no âmbito de jogos, uma vez que Python é uma linguagem capaz de produzir jogos em 2D graças à sua biblioteca chamada *Pygame* (exemplo ilustrado na figura 5).

A linguagem Python também integra atualmente muitos programas de software como uma linguagem de scripting. Alguns sistemas operativos integram-na como um componente *standard*, bem como a indústria de segurança de informação, que a utiliza de forma extensa (Taft 2007).

Neste trabalho, a linguagem Python será usada para modelar a simulação recorrendo à biblioteca *Mesa* para modelação baseada em agentes, descrita na próxima subsecção.

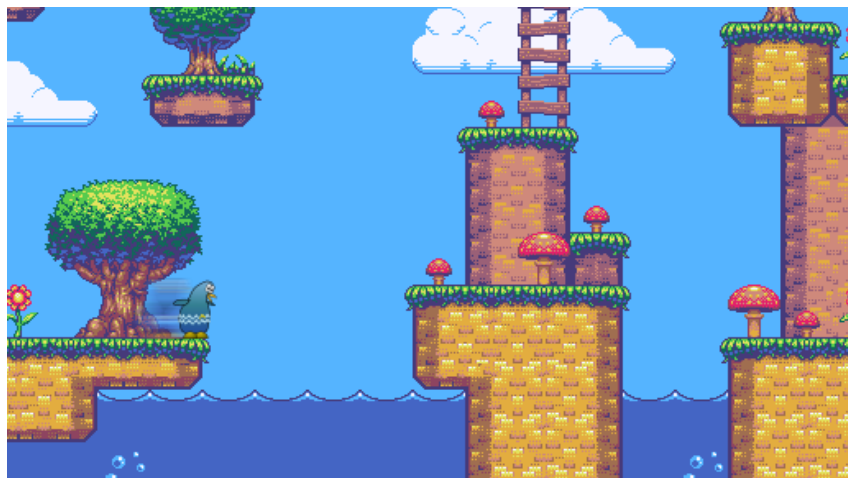


Figura 5. Exemplo de um jogo feito com a biblioteca *Pygame* retirado do site <https://www.pygame.org>.

2.2.2. Mesa

Mesa (Kazil et al. 2020) foi a biblioteca escolhida da linguagem Python para implementar a modelagem baseada em agentes no projeto que suporta esta dissertação.

Esta biblioteca permite criar modelos baseados em agentes usando componentes *core* já embutidos ou implementações customizadas, visualizá-los utilizando uma interface *web*, como está representado na figura 6, e analisar os seus resultados.

A biblioteca providencia três tipos de definições de ambientes de simulação: grelha, contínuo e rede. No ambiente em grelha os agentes estão posicionados em índices do tipo *integer* (figura 6) e no ambiente contínuo os agentes estão posicionados em índices do tipo *float*. O ambiente rede é utilizado para representar redes sociais (Wang, 2022).

A literatura descreve testes básicos relativos aos benefícios esta biblioteca (Kazil et al. 2020), onde se salienta a facilidade de implementação.

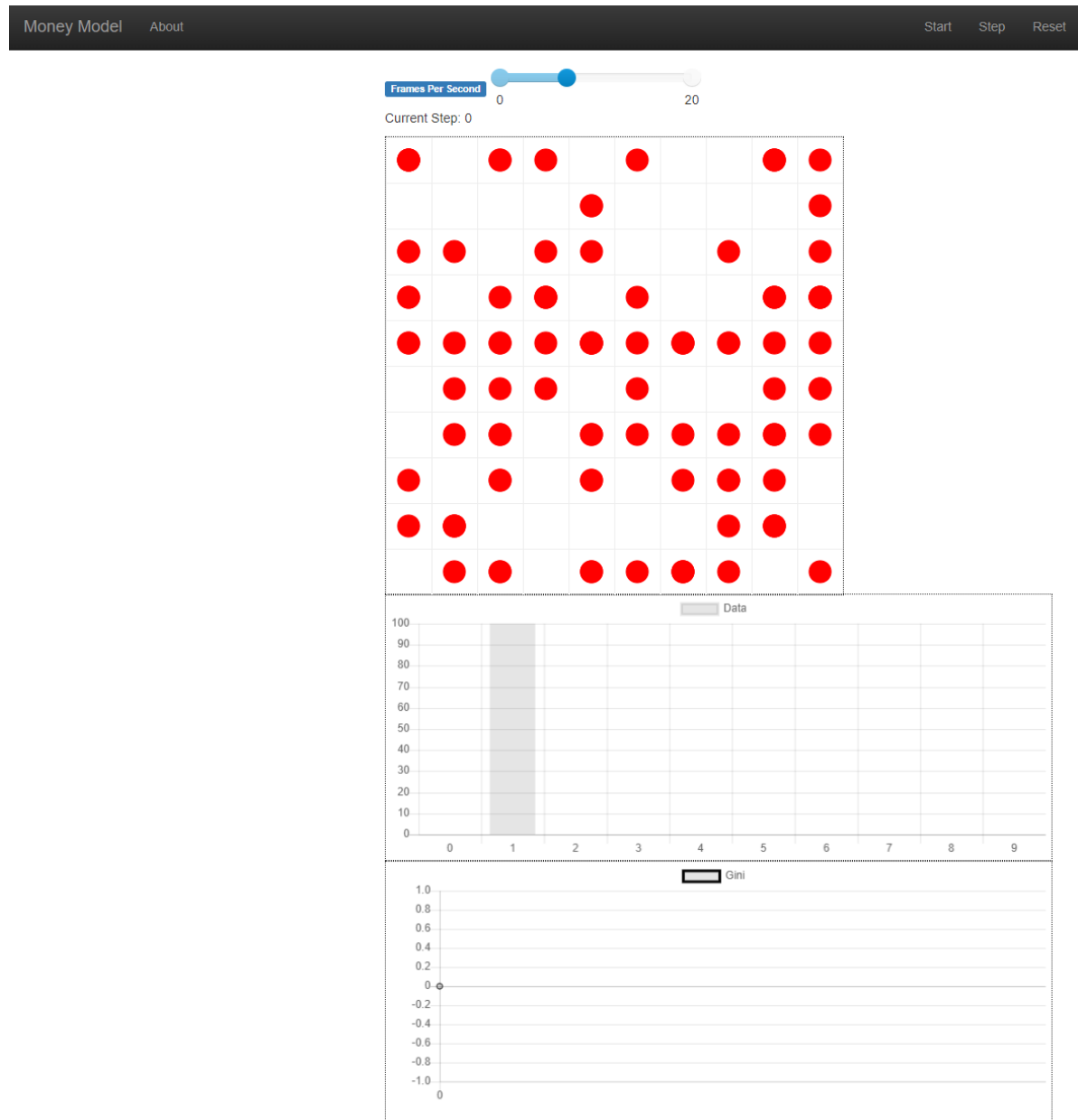


Figura 6. Visualização da interface e funcionalidade da biblioteca MESA.

2.3. GeoSpace

Para um melhor entendimento das próximas secções, é necessário perceber o conceito de *GeoSpace* e o que o mesmo engloba. O significado da palavra *GeoSpace* ou Geoespaço refere-se a dados específicos de localização. Essa informação geoespacial relaciona características da superfície da

terra com a sua localização geográfica, ou seja, é um conceito diretamente relacionado a uma localização (GeoSLAM, 2022).

2.3.1. O que são dados Geoespaciais?

Dados geoespaciais são quaisquer dados que contenham qualquer tipo de componente geográfica. Podem descrever propriedades, objetos e eventos que possuam uma localização específica. Estes dados combinam informação da localização com os atributos de um objeto. Este tipo de tecnologia pode colecionar vários tipos de dados como:

- Nuvens de pontos.
- Vetores.
- Imagem de Satélite.
- Dados do Censos.

2.3.2. O que é tecnologia Geoespacial?

Tecnologia Geoespacial é usada para coletar e analisar dados geoespaciais. É um termo que engloba várias ferramentas e sistemas no auxílio do mapeamento da superfície da terra, perceber comportamentos de sociedades e interpretar padrões espaciais. Este tipo de tecnologia permite obter dados referenciados ao planeta e usá-lo para análise, modelações, simulações e visualização. Permite ainda formular decisões baseadas na prioridade e importância de recursos (Bronx Community College, 2018). Um exemplo desta tecnologia são os SIG, que são sistemas que combinam mapas com bases de dados contendo informação descritiva, como por exemplo, os ficheiros geoJSON.

2.3.3. GeoJSON

Ficheiros geoJSON são ficheiros que contêm dados geoespaciais *standard* que representam atributos geográficos e não geográficos sendo baseados em JSON¹, contendo um formato que visa à codificação de várias estruturas de dados geográficos e capaz de criar qualquer tipo de objeto geométrico georreferenciado. A figura 7 exemplifica um ficheiro geoJSON.

Nesta dissertação todas as estruturas de ambiente da simulação foram carregadas a partir de ficheiros GeoJSON que por sua vez foram criados a partir da aplicação QGIS.

¹ Um formatação utilizada para estruturar dados em formato de texto e transmiti-los de um sistema para o outro (Crockford, 2018)

```
{
  "type": "Feature",
  "geometry": {
    "type": "Point",
    "coordinates": [125.6, 10.1]
  },
  "properties": {
    "name": "Dinagat Islands"
  }
}
```

Figura 7. Exemplo de um ficheiro geoJSON.

2.3.4. QGIS

QGIS é uma aplicação SIG *open source* de fácil usabilidade, tendo sido utilizada na criação do ambiente da simulação e também na criação das suas propriedades, por outras palavras, o nosso *GeoSpace* ou Geoespaço (QGIS, 2022). Esta aplicação permite criar estruturas georreferenciadas, dando opção ao utilizador de escolher o sistema de coordenadas de referência que preferir, com todos os seus atributos e características. O QGIS foi a aplicação utilizada para desenhar o mapa e estruturas com o respetivo sistema de coordenadas, tendo sido mais tarde introduzido no modelo baseado em agentes para efeitos de simulação.

2.4. Mesa-geo

Para a realização desta dissertação foi utilizada a extensão da biblioteca *Mesa* chamada *Mesa-geo*, que permite a utilização de informação SIG no *Mesa*.

Esta extensão implementa um ambiente chamado *Geospace* que por sua vez contém agentes baseados em SIG, resumindo, os *GeoAgents*. Este tipo de agentes possuem um atributo chamado *geometry* que é um objeto *shapely*, mais precisamente, um objeto de um pacote *Python* que realiza análises teóricas e manipula atributos planares usando funções da biblioteca *GEOS* (*GEOS contributors* (2021)), e ainda um atributo *crs* que indica o seu sistema de referência de coordenadas. Esta extensão permite criar geometrias diretamente com o *shapely*, porém também permite que o utilizador importe os seus *GeoAgents* a partir de qualquer ficheiro de vetores, como por exemplo ficheiros GeoJSON (Wang, 2022).

O *Mesa-geo* oferece como visualização o mapa *Leaflet* que é uma biblioteca JavaScript *open-source* para mapas interativos (Wang, 2022).

2.5. Algoritmos de Navegação

Um dos desafios deste trabalho foi a elaboração de um algoritmo de navegação para os agentes nesta área de investigação, e para tal foi necessário averiguar e comparar vários algoritmos.

Algoritmos como a versão base do A*, *Dijkstra*, *depth-first search*, *breadth-first search*, *Recursive Flood Fill* e *Priority Queue Flood Fill* calculam rotas do caminho mais próximo para cada agente, o que resulta num nível de complexidade que aumenta consoante o número de agentes (Roan, 2014). Stern (2019), mostra a dificuldade que algoritmos como o A* enfrentam para a resolução de problemas de caminhos mais próximos, considerando o tamanho do espaço de procura e o seu fator de ramificação, que no caso deste trabalho serão as possíveis posições dos agentes. Dito isto, este autor conclui que, no pior dos casos, o tamanho do espaço de procura seria exponencialmente variável com o tamanho dos agentes. Roan (2014) argumenta ainda que, os algoritmos que fornecem sempre o caminho ótimo como solução, resultam num comportamento irrealista e não apropriado para navegação em massa.

Visto que algoritmos de cálculo do caminho mais curto serão pouco eficazes neste projeto, que usa um modelo baseado em agentes onde cada agente irá realizar um conjunto de ações de forma autónoma, foi necessário encontrar outra alternativa. Assim sendo uma das alternativas encontradas foi um algoritmo baseado no conceito de pontos de referência, por outras palavras, um algoritmo baseado em *landmarks*.

O conceito de pontos de referência pode ser usado e aplicado em várias situações e ser retratado como um objeto com diferentes significados. Para este projeto, baseado no trabalho de Sohn et al. (2018), pontos de referência consistem em objetos selecionados manualmente no ambiente virtual bem como em pontos gerados dentro do ambiente onde são feitas as decisões de navegação, como ilustra a figura 8. Por exemplo, sobre qual o melhor trajeto a percorrer quer em situações no interior quer em situações no exterior, Ullmann et al. (2016) utilizam o conceito de pontos de referência para providenciar instruções de roteamento mais apropriadas à navegação humana do que outras abordagens tradicionais otimizadas em torno do caminho mais curto ou do caminho mais rápido.

Krisp (2016) relata que apesar de pontos de referência não serem necessários numa perspetiva funcional, estes continuam a ter um papel importante, como por exemplo servir de pontos de encontro ou mesmo melhorar o nível e personalização do modelo.

Abordagem esta que pode ainda ser utilizada para estudar a visibilidade, a saliência estrutural e visual e a sua interação no modelo (Röser, 2017).

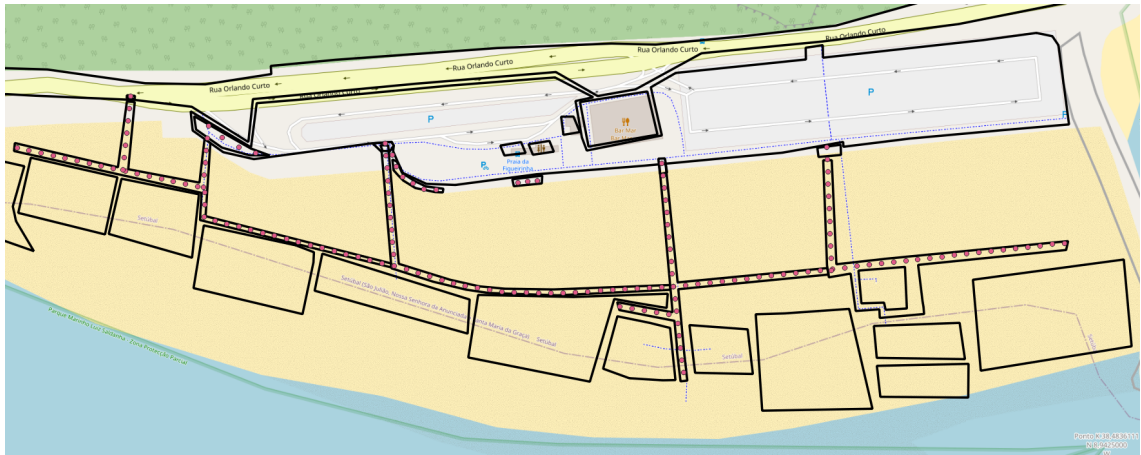


Figura 8. Exemplo de pontos de referência para a decisão navegacional na praia da Figueirinha.

2.5.1. Colisões

Ainda no âmbito da navegação um problema que surge numa fase primordial é o problema da deteção de colisões. Como já foi referido, o planeamento de movimentação para uma população é um problema que se tem vindo a provar ser notavelmente complexo nos ambientes virtuais (Foudil et al. 2009).

A autonomia de um agente é definida pela capacidade de perceber, agir e decidir sobre as suas ações. Grande parte da sua autonomia recai sobre a sua capacidade de detetar colisões (Foudil et al. 2009). Quando se trata de uma população grande, a complexidade do sistema cresce e isso pode comprometer a autonomia individual dos agentes. Por consequência, a simulação poderá requerer maior capacidade computacional.

De acordo com Foudil et al. (2009), podemos considerar três tipos de colisões que são ilustradas pelas figuras 9, 10 e 11:

- *Toward collision*: este tipo de colisão refere-se à situação de quando dois agentes se movimentam na direção de um do outro.
- *Glancing collision*: este tipo de colisão acontece quando dois agentes se movimentam para o mesmo sítio.
- *Away collision*: este tipo de colisão acontece quando um agente colide por trás de outro agente.

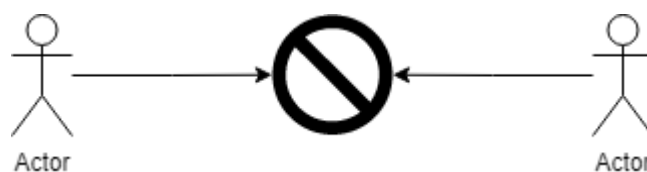


Figura 9. Representação do tipo de colisão Toward collision.

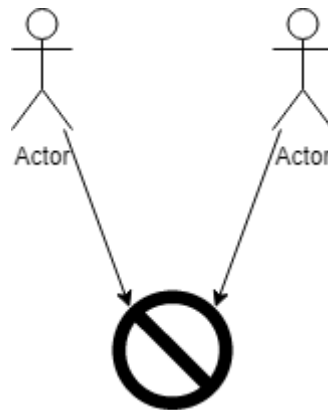


Figura 10. Representação do tipo de colisão Glancing collision.



Figura 11. Representação do tipo de colisão Away collision.

Segundo os autores, esta parte da modelação pode envolver diversos problemas quando é utilizado um grande número de agentes, pois o método de evitar colisões pode ser ineficiente, uma vez que em alguns algoritmos o número de cálculos aumenta significativamente com o número de colisões.

2.6. Trabalhos Relacionados

Nesta secção, serão abordados alguns trabalhos relacionados com o tema desta dissertação, que foi consultado numa fase de pesquisa e que ajudam a perceber e a aprofundar diversas temáticas relacionadas com o mesmo.

2.6.1. An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: Decision-making and life safety

O trabalho de Wang et al. (2015), trata de uma simulação de um caso de tsunami na costa de Oregon nos Estados Unidos da América e tem como objetivo perceber como a variação do tempo de decisão afeta a taxa de mortalidade e como a escolha dos diferentes meios de transporte e a existência de meios de evacuação verticais têm influência no número de mortes. Neste trabalho são utilizadas tecnologias como modelagem baseada em agentes, sistemas de informação geográficos e a plataforma *NETLOGO* (Wilensky, 1999).

Neste artigo são tidos em consideração fatores como a modelação da evacuação de catástrofes naturais onde são referidos diferentes tipos de modelação, embora focando-se e retratando com detalhe o caso dos tsunamis. Wang et al. (2015) afirmam que para este tipo de desastres a modelação mais aconselhável é a modelação baseada em agentes.

De acordo com o mesmo artigo retiramos várias conclusões, designadamente: é importante tomar em consideração as condições especiais das pessoas; veículos que aceleram mais com o pânico criam congestionamento mais facilmente; quantas mais pessoas decidem ir de carro maior é a taxa de mortalidade; o tempo de decisão e as variantes no tempo de decisão estão fortemente correlacionadas com a taxa de mortalidade; os meios de evacuação vertical são estruturas eficazes para reduzir a taxa de mortalidade; e a velocidade a que as pessoas se deslocam também está fortemente relacionada com a taxa de mortalidade.

É de destacar também que Wang et al. (2015) referem que o modelo ao tomar em consideração detalhes como sexo e idade dos agentes (que são os fatores que tornam grupos sociais vulneráveis), será muito mais precisos que aqueles que não o fazem.

2.6.2. Implementation of Tsunami Evacuation Maps at Setubal Municipality

O trabalho elaborado por Santos et al. (2017) incide sobre a implementação de mapas de evacuação em Portugal.

Apesar da atividade sísmica em Portugal ser moderada, é uma zona costeira de alta densidade populacional que não está muito bem preparada caso surja um tsunami. Em suma, o trabalho de Santos et al. (2017) tem como objetivo melhorar a segurança do município de Setúbal, tendo sido elaborado um modelo numérico sobre tsunamis. Com a elaboração deste modelo o objetivo é alertar e educar os habitantes para os perigos que os tsunamis potencialmente apresentam para a cidade de Setúbal.

O artigo explica que numa escala local o modelo numérico é muito eficaz para a avaliação de desastres e que possivelmente ajudará no futuro a criar regras de segurança de modo a reduzir o número de fatalidades.

Foram retirados como referência dados dos acontecimentos de 1755 e de 1969 que mostram que, caso ocorra uma catástrofe destas, as pessoas dessa zona terão de evacuar para sítios mais seguros, Santos et al. (2017) remetem também para o perigo das instalações que se localizam nessa zona, pois, são instalações industriais que contêm materiais tóxicos e que podem causar explosões.

2.6.3. Agent-based simulation of alternative classroom evacuation scenarios

Este trabalho realizado por Liu et al. (2016) vem abordar a temática de evacuação em salas de aula.

De acordo com Liu et al. (2016), as evacuações de estudantes têm sido um problema constante, tornando-se importante encontrar soluções quer para docentes quer para arquitetos. Seguir apenas normas e códigos de segurança não garante que a arquitetura de edifício seja favorável, pelo que são utilizadas simulações baseadas em agentes recorrendo ao software *Netlogo* para averiguar relações entre o espaço da sala e a eficiência de evacuação.

Foi usado como ambiente de evacuação uma sala de aula pois é onde tem maior probabilidade de os alunos se encontrarem na eventualidade de ocorrer um sismo. Os cenários de evacuação foram realizados de duas formas: com um grupo de alunos que não seguia as regras e só queria chegar à saída da sala de forma independente; e outro grupo de alunos que seguia todas as regras de evacuação de uma sala de aula. Ambos os grupos tinham os seus próprios padrões de movimento de forma a tornar-se o mais realista possível.

Liu et al. (2016) chegam à conclusão que foi na evacuação com regras que os alunos conseguiram sair da sala mais rápido e ainda obter algumas vantagens em assegurar a sua própria segurança.

2.6.4. Agent-based models of human response to natural hazards: systematic review of tsunami evacuation

O trabalho de Mls et al. (2022), providencia uma análise sistemática de modelos de evacuação de tsunamis. Foca-se em estudos relativamente ao período de 2012 até 2021, específicos para modelos que usam modelação baseada em agentes.

Este trabalho está dividido em duas partes:

- Uma análise descritiva dos modelos apresentados, focando as propriedades técnicas das ferramentas, tais como: ferramentas de modelação, validação, softwares, etc.
- Análise de modelos, focando-se numa análise detalhada dos modelos utilizados nos diversos trabalhos revistos: propósito, tipos de agentes, dados de entrada e de saída e área modelada.

Mls et al. (2022) indicam que as variáveis de entrada mais comuns em modelos baseados em agentes são as seguintes: a magnitude e a distribuição espacial de abrigos, distâncias, tamanho da população e grupos (e.g., crianças, adultos). Quanto às variáveis de saída são as seguintes: tempo de evacuação, número de casualidades ou sobreviventes e melhores rotas de evacuação.

Os autores relatam que, nos artigos analisados a aplicação de metodologias, protocolos e paradigmas organizacionais específicos de agentes é escassa e que os métodos de verificação e validação não foram aplicados sistematicamente. Devido a não ter sido providenciada a documentação dos mesmos, seria impossível replicar as experiências analisadas.

Os modelos deste artigo, ilustram o problema típico quando se usa apenas um algoritmo específico para o cenário em questão, como por exemplo, o algoritmo Dijkstra, sendo este o mais utilizado para encontrar caminhos para abrigos. Além disso, poucos são os modelos que tratam de situações específicas, tratando eles de situações mais genéricas.

MIs et al (2022) concluem então que estes modelos, apesar de ilustrarem o potencial da abordagem da modelação baseada em agentes, revelam ser insuficientes quanto aos seus resultados. Assim, os autores alertam para a necessidade de especificar modelos de larga escala, usando modelação baseada em agentes na área de tsunamis.

2.6.5. Recent advances in agent-based tsunami evacuation simulations: case studies in Indonesia, Thailand, Japan and Peru

Neste trabalho realizado por Mas et al. (2015), são inicialmente relatados os acontecimentos dos tsunamis mais catastróficos a nível mundial, bem como a importância da planificação na evacuação.

Os autores abordam também a temática da modelação da evacuação de um tsunami baseada em agentes. Para estes autores, um modelo baseado em agentes consiste numa abordagem onde cada agente é modelado como uma entidade autónoma capaz de realizar decisões, cujo comportamento coletivo permite uma descrição do sistema ao nível do sistema. Referem vários modelos que foram utilizados no desenvolvimento da temática em questão, desde os modelos iniciais, que usam uma abordagem de modelação baseada em redes, até aos modelos que implementam uma modelação em grelha.

Mas et al. (2015) abordam quatro casos de estudo:

- Os casos de Arahama, Japão e Pandanga, e Indonésia: com o objetivo de estimar mortes e engarrafamentos.
- O caso de Pakarang Cape, Tailândia: como o objetivo de analisar veículos na evacuação.
- O caso de Natori, Japão: com o objetivo de estudar o comportamento humano.
- O caso de La Punta, Peru: como o objetivo de estudar a demanda de abrigos.

De acordo com os casos de estudo, os modelos baseados em agentes beneficiam a mitigação dos efeitos dos tsunamis e promovem o planeamento de evacuação, descrevendo a individualidade dos evacuados e permitindo assim a observação dos seus comportamentos. Os autores concluem que os resultados dos modelos como a estimativa de mortes e identificação de engarrafamentos, estão associados ao planeamento das evacuações, uma vez que não podem ser observados através de simulacros ou questionários, remetendo desta forma para a importância da modelação baseada em agentes.

Modelo e Algoritmo de evacuação baseado em *pontos de referência*

Este capítulo destina-se à explicação do modelo implementado e do algoritmo de navegação dos agentes que foi utilizado. Para este projeto, o algoritmo implementado é um algoritmo baseado em pontos de referência.

Este capítulo aborda primeiramente a relação dos conceitos espaço e tempo no modelo. Depois é abordado conceitos sobre os agentes, incluindo uma descrição teórica bem como a implementação do algoritmo de navegação. Seguidamente é dada uma descrição do ambiente e ainda o tratamento de colisões. Por fim, será descrito o algoritmo da evacuação em grupos e os parâmetros importantes das experiências a serem realizadas.

3.1. Modelo e relação espaço/tempo na simulação

O modelo desta modelação baseada em agentes integra, como parâmetros, os conceitos de espaço e de tempo na mesma.

O espaço do modelo é descrito como a área de interação dos agentes. A biblioteca utilizada providencia vários tipos de universos, porém, neste modelo, o espaço utilizado será o Geospace. Este espaço existe na biblioteca Mesa-geo e é usado na representação de áreas explicitamente geográficas que estão relacionadas com localizações do mundo real. A diferença entre outras definições de espaço do Mesa referidos previamente (grelha, contínuo e rede), e o Geospace, é que este contém várias camadas que podem ser criadas através de ficheiros de dados, ficheiros matriciais ou ficheiros vetoriais (Wang, 2022). Neste espaço, para agentes que são criados na mesma célula, é atribuído uma posição aleatória aos agentes dentro dessa mesma célula de modo tornar o modelo mais realista.

O modelo terá também uma componente que está encarregue de lidar com o fator tempo, i.e., um objeto que se responsabiliza pela ativação dos agentes. A ordem de ativação dos agentes pode ter impacto no comportamento do modelo. Neste contexto, foi escolhido um tipo de escalonamento de ativação dos agentes que é utilizado geralmente em modelações baseadas em agentes (Wang, 2022). O objeto em questão chama-se *Scheduler* e este controla quando um agente é chamado a agir. O tipo de *Scheduler* usado nesta dissertação é denominado *Random Activation Scheduler*, e que tem como função ativar cada agente uma vez a cada iteração, por ordem aleatória. O conceito de tempo nesta modelação é igual ao número de iterações que o mesmo tem. Cada iteração corresponde a um segundo no ambiente.

3.2. Agentes

Neste modelo, apesar de todas as estruturas implementadas serem *GeoAgents*, são considerados como agentes as pessoas que estão na praia, pois são elas que vão ser as entidades alvo do estudo. Estas entidades computacionais têm como função interagir com o ambiente em que se encontram.

Para simular uma fuga de uma praia é necessário ter em consideração todo o tipo de pessoas que estão a ocupar a mesma. Para este modelo, consideramos adultos e crianças devido a serem os grupos etários mais abundantes durante a época balnear.

Neste projeto foram consideradas as seguintes propriedades para cada agente:

- Faixa etária (Adulto ou Criança): Para esta propriedade, consideramos três classes etárias, crianças com menos de dez anos, que têm velocidade reduzida; crianças com mais de dez anos e adultos.
- Velocidade: Existindo na literatura diversas abordagens, será usada uma distribuição normal (Mun, 2008). Outras abordagens argumentam que a melhor distribuição para a velocidade humana seria uma distribuição exponencial (Song et al., 2015).
- Tem grupo ou não: Os agentes podem estar sozinhos ou em grupo, um agente do tipo criança nunca pode estar sozinho.
- Estado do agente.

Aos agentes, para melhor análise de resultados e de acordo com a sua posição na simulação, foram atribuídos os seguintes estados:

- Suscetível: é o estado do agente que se encontra na parte arenosa da praia. Representado pela cor vermelha num adulto e pela cor azul-claro numa criança;
- Fora da praia: como o nome indica, é o estado do agente que informa que o mesmo já saiu da parte arenosa da praia, mas ainda não chegou à zona segura. Representado pela cor amarela num adulto e pela cor azul-escura numa criança;

- Salvo: é o estado que é atribuído a todo o agente que chega à zona segura. Representado em todo o tipo de agentes pela cor verde.

3.2.1. Descrição do Algoritmo

Como foi retratado previamente, métodos que nos indicam o caminho mais curto revelam ser pouco eficazes quando o número de agentes é muito elevado, como é o caso dos algoritmos conhecidos como a versão base do *A**, *Dijkstra*, *depth-first search*, *breadth-first search*, *Recursive Flood Fill* e *Priority Queue Flood Fill*, que aumentam o nível de complexidade à medida que o número de agentes aumenta, elevando assim o custo computacional. A alternativa foi desenvolver um algoritmo de navegação que tem como base pontos que determinam o percurso do agente, que, ao contrário dos algoritmos de caminho mais curto acima referidos, não precisam de manter em memória para cada agente referências para os vários caminhos possíveis até encontrarem um adequado.

O algoritmo desenvolvido baseia-se em marcar os pontos que vão orientar os agentes com agentes referenciadores no ambiente do modelo, i.e., determinar a movimentação das pessoas da praia com agentes específicos chamados pontos de referência. Estes pontos de referência vão traçar a parte possível da navegação das pessoas e, deste modo, as pessoas vão saber por onde é que podem navegar sem que exista um processamento de caminhos prévios e uma carga computacional desnecessária, mantendo o nível de complexidade independentemente do número de agentes.

A base do algoritmo desenvolvido divide-se em três partes:

A primeira parte consiste em estabelecer uma ligação entre os pontos de referência com as áreas de segurança (assinaladas na figura 12 e na figura 13). Deste modo, obtemos, para cada ponto de referência, uma indicação para qual área de segurança o agente deve-se deslocar (como esquematizado na figura 14 e ilustrado pelas figuras 15 e 16).

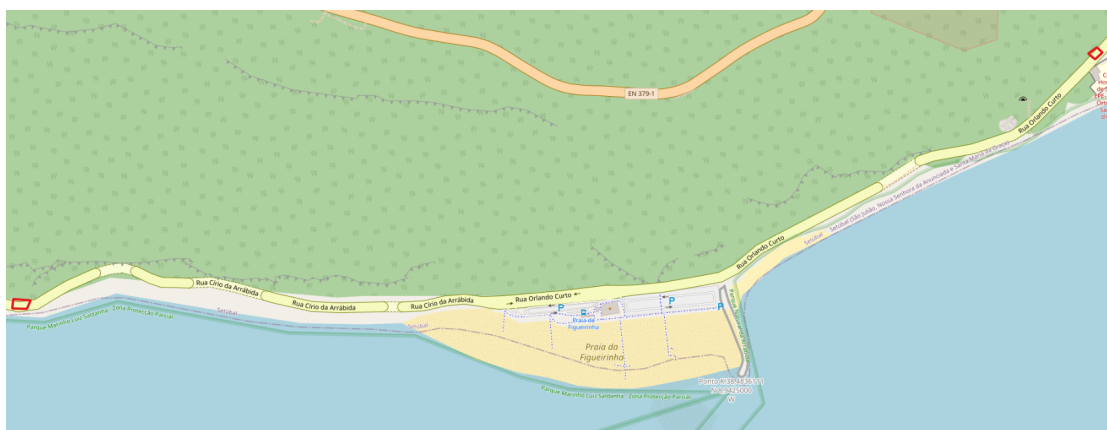


Figura 12. Imagem das áreas de segurança, assinaladas a vermelho, da praia da Figueirinha.



Figura 13. Imagem das áreas de segurança, assinaladas a vermelho, ampliadas da praia da Figueirinha.

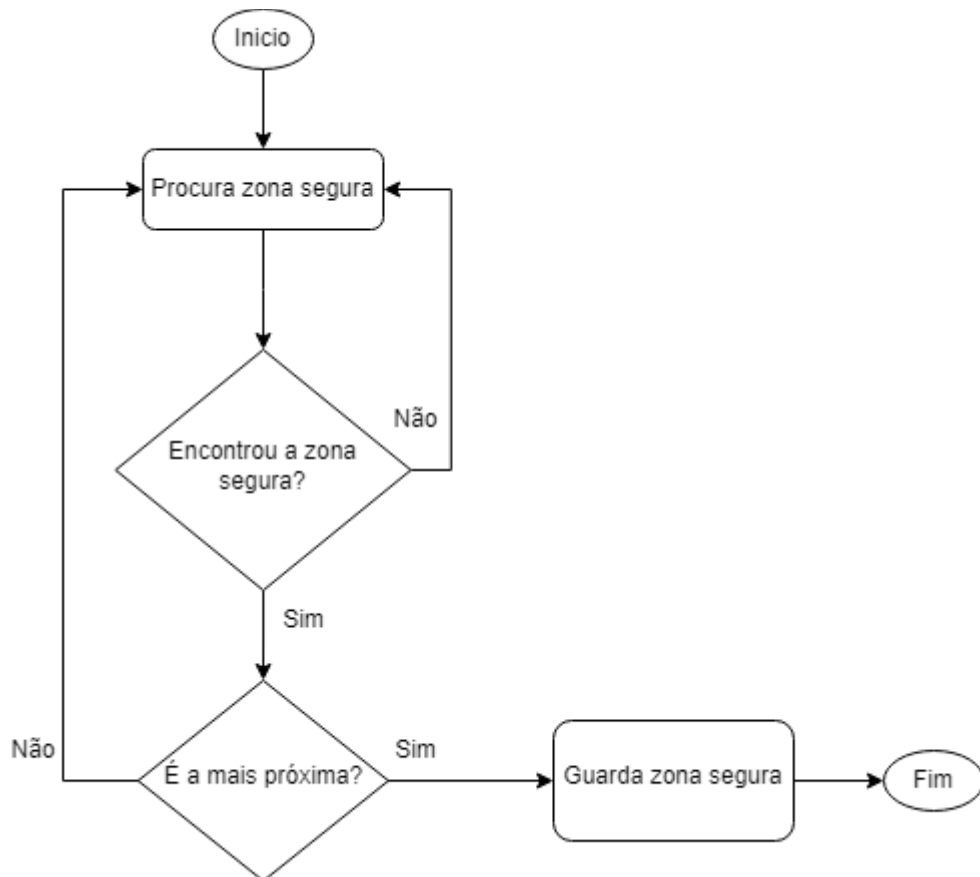


Figura 14. Fluxograma da procura da zona segura mais próxima de cada ponto de referência.



Figura 15. Atribuição da zona segura aos pontos de referência da zona arenosa da praia.



Figura 16. Atribuição da zona segura aos pontos de referência fora da zona arenosa da praia.

A segunda parte consiste em que os pontos de referência efetuam uma procura pelo ponto de referência mais próximo e que tenha em comum a mesma área de segurança (como descrito no fluxograma da figura 17). Assim, obtendo um caminho interligado de pontos de referência, que é ilustrado pela figura 18, com referências às áreas de segurança atribuídas na primeira parte.

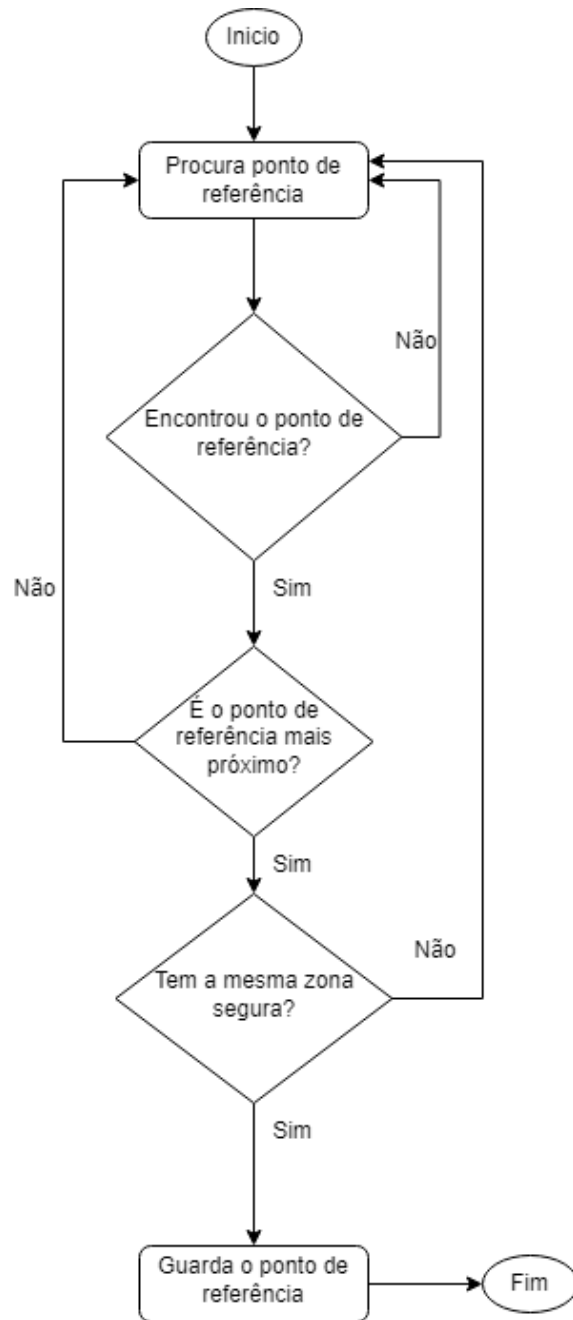


Figura 17. Fluxograma da procura do ponto de referência mais próximo.

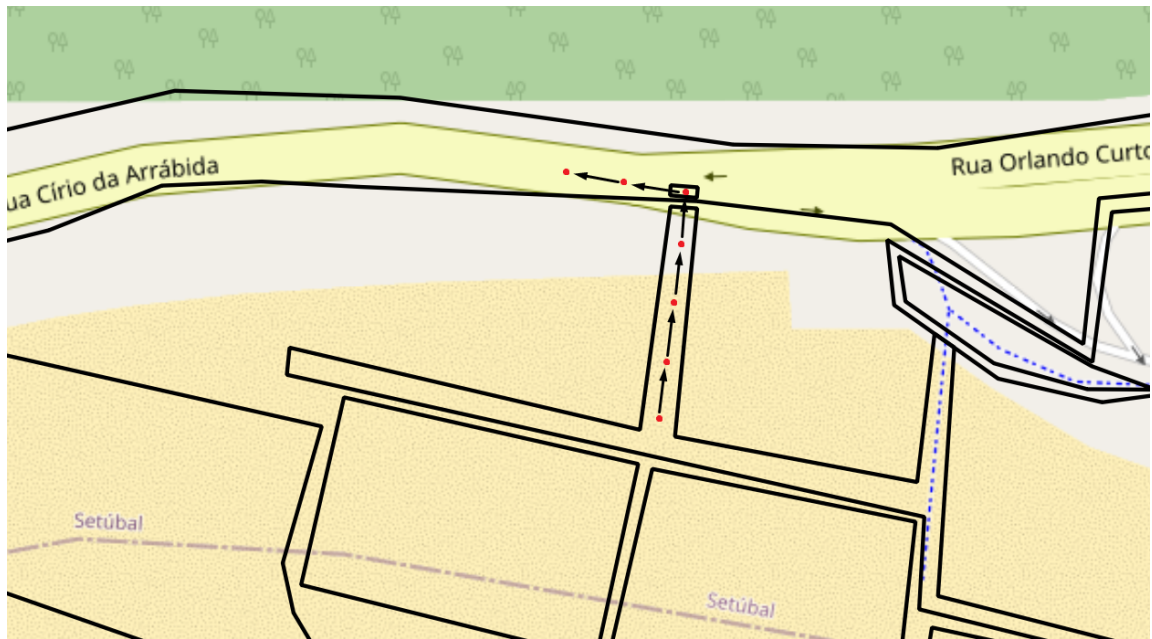


Figura 18. Interligação dos pontos de referência.

A terceira parte do algoritmo dedica-se à movimentação do agente do tipo pessoa, i.e., as pessoas da praia. Nesta parte, como é apresentado no fluxograma da figura 19, a pessoa irá procurar pelo ponto de referência mais próximo e dirigir-se até ao mesmo. Uma vez que a pessoa chega ao ponto de referência irá movimentar-se para o ponto de referência mais próximo da área de segurança, como ilustrado pela figura 20. Assim, percorrendo um caminho que foi antes interligado, tal como explicado na segunda parte deste algoritmo.

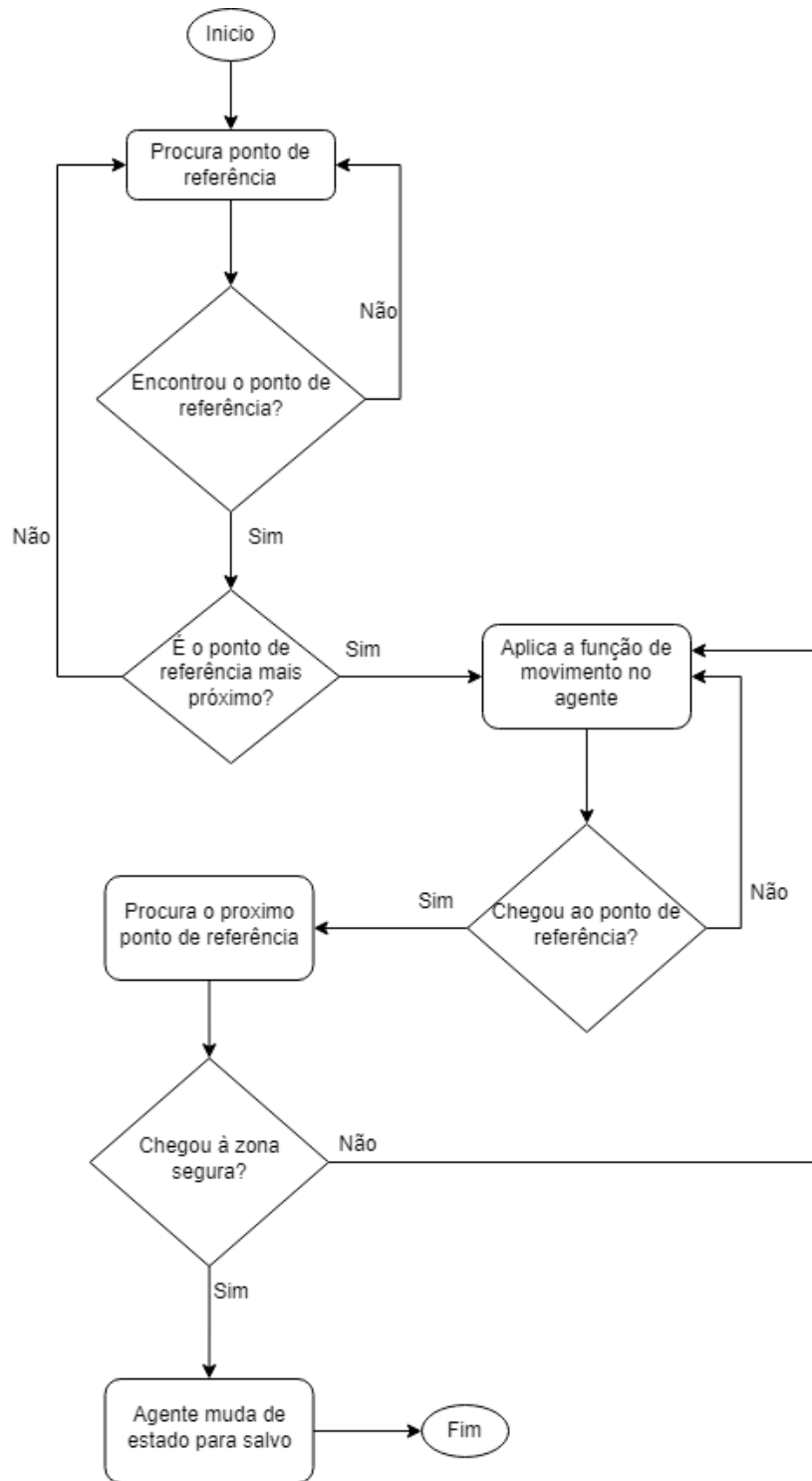


Figura 19. Fluxograma da movimentação do agente.

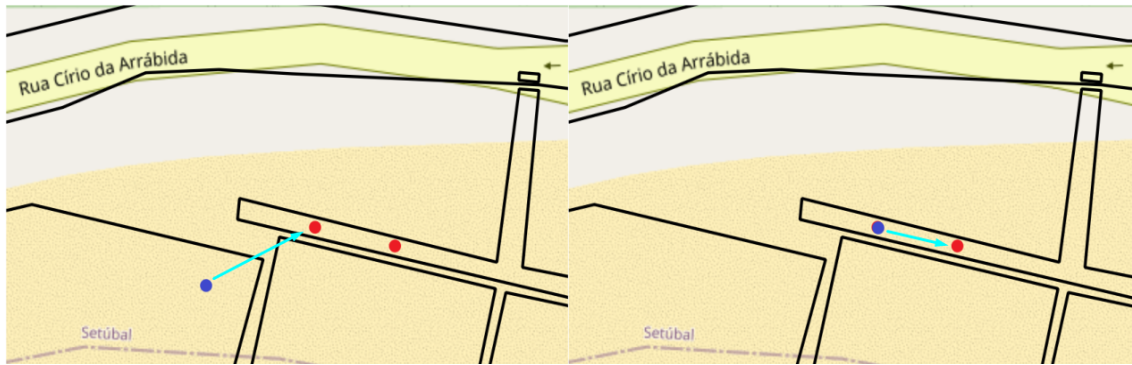


Figura 20. Ilustração da movimentação do agente.

3.2.2. Algoritmo de deslocamento dos agentes

Neste modelo o movimento dos agentes foi baseado na fórmula matemática que move um ponto num dado vetor, como é representado na equação (1):

$$\vec{B}_{new} = \vec{B} + \epsilon \vec{BP} \quad (1)$$

Sendo que:

- \vec{BP} é o vetor entre os dois pontos, ou melhor, a distância a ser percorrida.
- ϵ é o valor que o ponto vai percorrer no vetor.
- \vec{B}_{new} é a nova posição do agente.
- \vec{B} é a posição original do agente.

Para obter o vetor entre os dois pontos utilizamos a equação (2):

$$\vec{BP} = \vec{P} - \vec{B} = [P_1 - B_1, P_2 - B_2] \quad (2)$$

Para o objetivo deste modelo, que é movimentar o agente a cada iteração do modelo, até um certo ponto no mapa, será necessário obter o vetor unitário do seu movimento e multiplicar pela velocidade de maneira a obtermos um agente/ponto que se move a uma velocidade constante para uma dada localização no mapa.

Relativamente ao agente no modelo, as coordenadas georreferenciadas providenciadas pelo *Mesa-geo*, são do sistema de coordenadas denominado *Web Mercator*, que permite ter uma projeção das coordenadas em metros, deste modo, facilitando os cálculos, pois queremos usar a velocidade na ordem dos metros por segundo.

Como foi referido, cada segundo da simulação será igual a uma iteração do modelo. O agente a cada iteração vai andar um número específico de metros de acordo com sua a velocidade. Calcula-se o vetor de movimento utilizando as coordenadas do agente e do ponto de referência em questão com a equação (3):

$$\vec{VM} = (LP_x - PA_x, LP_y - PA_y) \quad (3)$$

Sendo:

- \overline{VM} o vetor de movimento do agente.
- LPx a abscissa do ponto de referência para onde o agente se dirige.
- LPy a ordenada do ponto de referência para onde o agente se dirige.
- $P Ax$ a abscissa do ponto da posição original do agente.
- $P Ay$ a ordenada do ponto da posição original do agente.

De seguida procedemos ao cálculo da norma do vetor usando a equação (4):

$$|M| = \sqrt{VMx^2 + VM y^2} \quad (4)$$

Sendo:

- $|M|$ o módulo do vetor.
- VMx a abscissa do vetor de movimento do agente.
- $VM y$ a ordenada do vetor de movimento do agente.

Seguidamente, com o objetivo de obter a normalização do vetor do agente dividimos o vetor de movimento pelo módulo respetivo, usando a equação (5).

$$\overline{VU} = (VMx \div |M|, VM y \div |M|) \quad (5)$$

Sendo:

- \overline{VU} o vetor unitário.

Finalmente, multiplicamos o vetor unitário pelo valor da velocidade que queremos que o agente se desloque para obter o deslocamento, usando a equação (6):

$$\vec{D} = (V \times VUx, V \times VUy) \quad (6)$$

Sendo:

- \vec{D} o deslocamento do agente.
- V o valor da velocidade do agente.
- VUx a abscissa do vetor unitário.
- VUy a abscissa do vetor unitário.

E, por último, utilizamos a equação (7), que soma o deslocamento à posição do ponto, obtendo assim a nova posição do agente:

$$\vec{P} = (P Ax + Dx, P Ay + Dy) \quad (7)$$

Sendo:

- \vec{P} a nova posição do agente.
- $P Ax$ a abscissa da posição original do agente.
- $P Ay$ a ordenada da posição original do agente.
- Dx a abscissa do deslocamento.
- Dy a ordenada do deslocamento.

Este processo é aplicado a cada iteração do modelo, i.e., a cada segundo da simulação de modo a movimentar o agente de acordo com a sua velocidade.

3.3. Ambiente

Numa simulação baseada em agentes, o ambiente onde os agentes se encontram é um fator que influencia diretamente os resultados, pois, vai determinar a taxa de sucesso da simulação. Se as condições de ambiente forem favoráveis aos agentes, a taxa de sucesso será obviamente mais alta quando comparada com condições do ambiente que dificultem e apresentem obstáculos aos agentes.

Como previamente referido, este modelo simula a praia da Figueirinha, em Setúbal, uma praia com características específicas que a tornam numa das mais acessíveis e, por conseguinte, mais movimentadas durante a época balnear (Setúbal Município Participado, 2021). Relembrando que o espaço deste ambiente é um *Geospace*, o mapa integrado no modelo será uma camada criada por um ficheiro *GeoJSON* e terá representado as seguintes estruturas:

- Zona de areia.
- Zona de chapéus de sol.
- Escadas de acesso à zona de areia.
- Parque de estacionamento.
- Restaurante.
- Passadiços.
- Estrada de acesso à praia.
- Zona de segurança.

Estas estruturas são *GeoAgents* e terão influência direta ou indireta tanto no comportamento dos agentes (i.e., *geoagente* pessoa), como no resultado da simulação. Por exemplo, quando um agente se desloca sobre areia seca, terá influência na sua velocidade; outro exemplo é o tamanho das áreas de saída da praia, que irão influenciar o número de agentes que conseguirão passar. Neste ambiente os agentes usam uma rede de pontos de referência e de zonas de segurança para ditar o caminho navegável.

Todos estes fatores/atributos, quer do ambiente, quer do próprio agente estão interligados entre si, e alterações dos mesmos implicam resultados diferentes nas simulações, providenciando a oportunidade de estudar diferentes situações de fuga, bem como diferentes técnicas de evacuação.

3.2.1. Interações com Ambiente

Como é natural em modelação baseada em agentes, os comportamentos dos agentes e o resultado da simulação vão depender do ambiente onde se encontram. Os agentes que se encontram na praia e que vão tentar sair da mesma vão ser influenciados do seguinte modo:

- **Velocidade:** No início da simulação os agentes vão estar dispersos na zona arenosa da praia, sendo o habitual num dia comum de época balnear. A zona arenosa da praia é composta por areia solta e por passadiços que permitem uma melhor movimentação na praia, pelo que, sabemos que a velocidade de um agente nos passadiços será diferente da sua velocidade em areia seca. Além disso, esta praia localiza-se entre duas zonas de cota alta, com aproximadamente 13 metros, que são onde se encontram as duas zonas seguras. Para chegar a estas zonas seguras os agentes terão de se deslocar pela estrada, que por sua vez tem uma certa inclinação, onde a velocidade será penalizada.
- **Percurso:** A movimentação dos agentes também será condicionada pelo ambiente. Mais precisamente, um agente não pode deslocar-se em linha reta ou passar por barreiras físicas ou lugares cujo atravessamento seria fisicamente irrealista. O modelo tem de ter em consideração a existência de barreiras, caminhos reais que façam sentido incluir na navegação do agente. Neste caso, as pessoas da praia só vão poder sair da zona arenosa pelas escadas que permitem o acesso à praia. Da mesma forma, áreas como o parque de estacionamento, os cafés e restaurantes também são declaradas como áreas interditas à circulação de pessoas.

3.4. Tratamento das colisões

O tratamento de colisões é fulcral para a elaboração de um bom algoritmo, sendo também um fator determinante no que toca à eficácia e complexidade do algoritmo. Em boa parte, neste modelo, dado o número elevado de agentes, as colisões irão aumentar o seu nível de processamento.

Para tratar das colisões entre agentes, foram implementados dois sistemas de deteção de colisões:

O primeiro, que visa tratar da *toward* e *glancing collision*, representado pela figura 9 e 10, consiste numa disputa entre dois ou mais agentes para o mesmo lugar no mapa. O agente que está mais próximo do destino é o que continua e os restantes ficam parados, deixando passar o agente mais próximo até chegar a sua vez. Este sistema é aplicado quando os agentes caminham sobre a área arenosa da praia. Não existindo ultrapassagens nesta área, entendeu-se não haver necessidade de verificar a *away collision* (figura 11), pois seria necessário colocar pontos de referência por toda a área arenosa. Na medida em que os agentes se dirigem para a zona das escadas ou dos passadiços, acabaria por requerer maior capacidade computacional, e a maior parte dos pontos de referência não iriam ser utilizados.

O segundo, que trata do caso onde existe *away collision*, representado pela figura 11, consiste em fazer com que o agente que colide e que está mais longe da zona segura se desvie para um segundo ponto de referência; deste modo quando o agente estiver atrás de outro com menor velocidade, esse mesmo agente, quando se desviar irá produzir o efeito de ultrapassagem. Este segundo sistema é aplicado quando os agentes se encontram fora da área arenosa da praia, permitindo assim aos agentes movimentarem-se de modo auto-organizado.

3.5. Algoritmo de evacuação em grupo

Este algoritmo tem como objetivo demonstrar o comportamento dos agentes quando os mesmos atuam em grupo. Consideramos as interações entre crianças e adultos, com o objetivo de estudar como estes dois tipos de agentes atuam quando dependem uns dos outros.

Como será expectável, o comportamento de uma criança numa situação de perigo vai depender de um adulto, ou pelo menos seria desejável que estivesse acompanhada por um. Uma criança não tem a capacidade de avaliar a situação de perigo, muitas vezes não possui capacidades físicas para sair de uma situação de stresse, ou simplesmente não está informada como um adulto para seguir as regras básicas da evacuação de uma praia.

Como foi referido, foram criados dois tipos de grupos de agentes:

- Grupos de colónias escolares.
- Grupos de agentes que chegam de carro e de autocarro à praia.

A elaboração deste algoritmo foi baseada no trabalho de Yang et al. (2013), no qual existe um líder com vários seguidores. O algoritmo consiste primeiramente em atribuir a cada seguidor um líder, que só pode ser um agente do tipo adulto; e a cada líder, um seguidor que pode ser um agente do tipo adulto ou um agente do tipo criança.

No início da simulação, os seguidores irão reunir-se com o seu respetivo líder de modo a formar um grupo. Uma vez reunidos, o líder irá efetuar uma procura num dado raio para verificar se o grupo está reunido, como ilustrado na figura 21 (líder representado pela cor vermelha). O líder só irá começar a evacuação quando todos os seguidores estiverem perto de si, isto é, dentro da sua área de influência. A área de influência é estabelecida de acordo com o número de seguidores. Quanto maior for o grupo, maior será o raio da área de influência. Note-se que, quando os seguidores se posicionarem em fila, a área de influência terá de ter uma dimensão suficiente para detetar os seguidores na totalidade.

Os seguidores recebem como ponto de referência o seu líder correspondente, por outras palavras, os seguidores vão movimentar-se na direção do líder (figura 21). Uma vez que os seguidores podem ser agentes do tipo criança, o que implica terem um valor de velocidade mais baixo que o do líder, podem ficar para trás. Por consequência, continuariam a seguir o líder numa direção retilínea e poderiam navegar sobre áreas interditas. Para evitar esta situação foi estabelecido que no decorrer da evacuação o líder irá parar de movimentar-se quando um dos seus seguidores se encontrar fora da sua área de influência e continuando a deslocação somente quando se verificar o contrário, como está esquematizado na figura 22.

No decorrer da elaboração deste algoritmo observámos que, no caso da navegação em grupo para as colónias escolares, por ser um grupo com uma dimensão relativamente maior que os outros grupos, as crianças atravessavam paredes e estruturas físicas quando se movimentavam em linha reta até ao líder, como ilustra a figura 23. Para corrigir este erro, foi implementada a regra que as crianças iriam seguir-se entre si de acordo com a sua distância do líder; por outras palavras, a criança mais próxima do líder iria ter o líder como ponto de referência e esta seria o ponto de referência para a próxima criança no grupo, produzindo o efeito da figura 24.

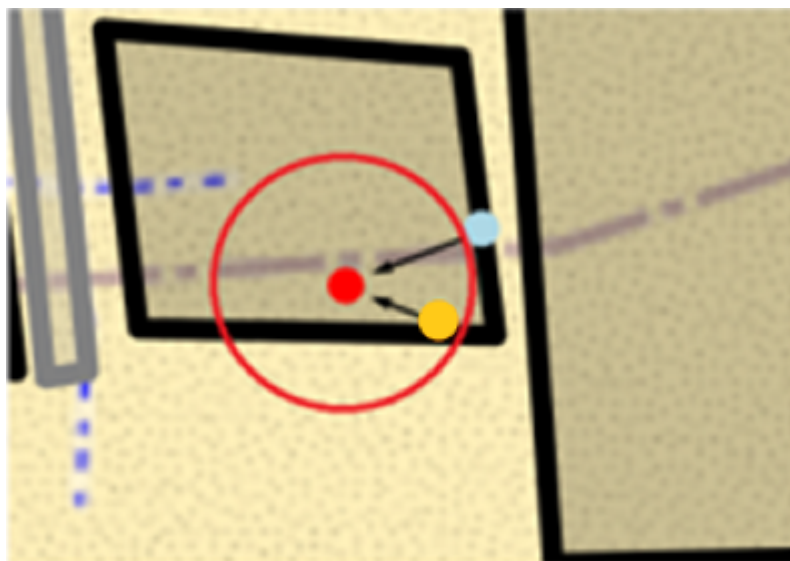


Figura 21. Ilustração da área de procura do líder no algoritmo de evacuação em grupo.

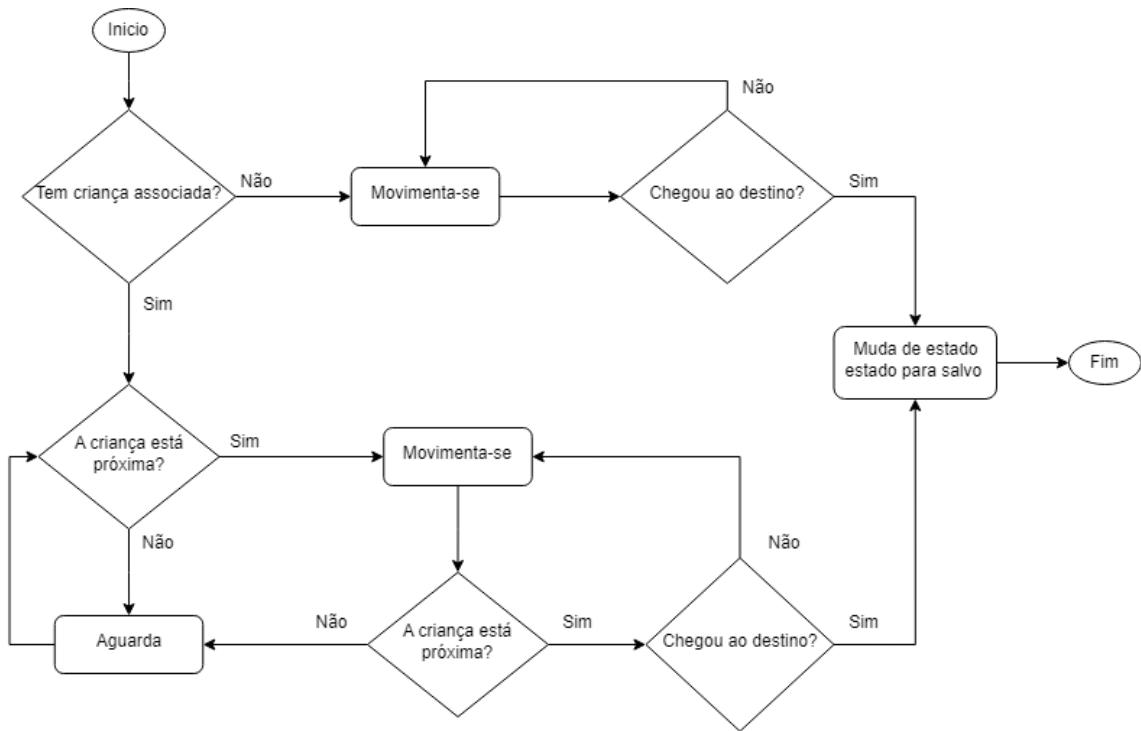


Figura 22. Fluxograma da movimentação do adulto em grupo.

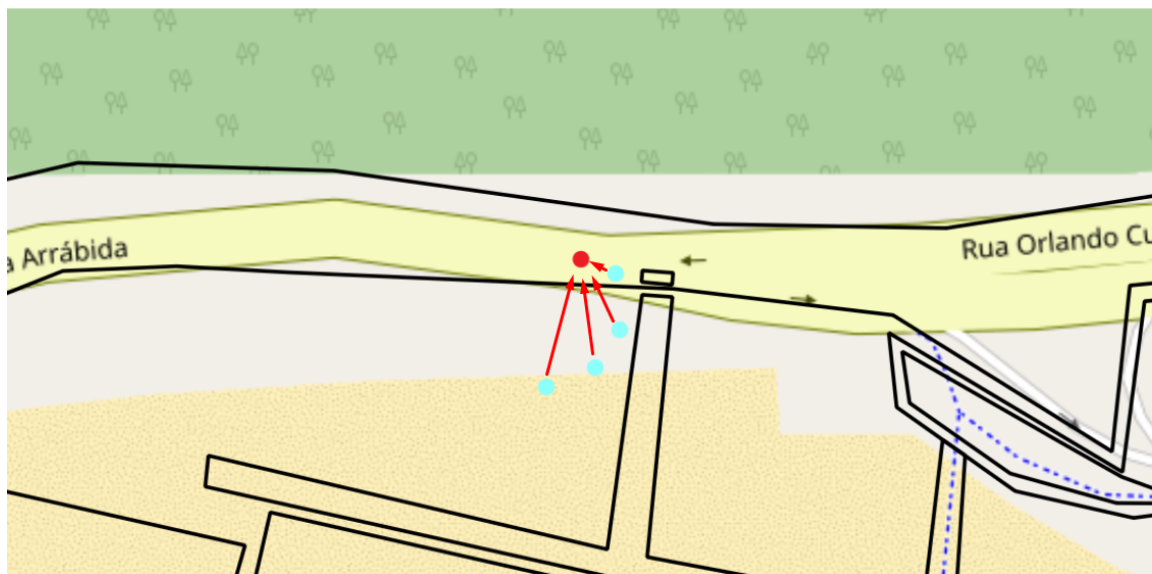


Figura 23. Ilustração do erro de navegação das colónias escolares.

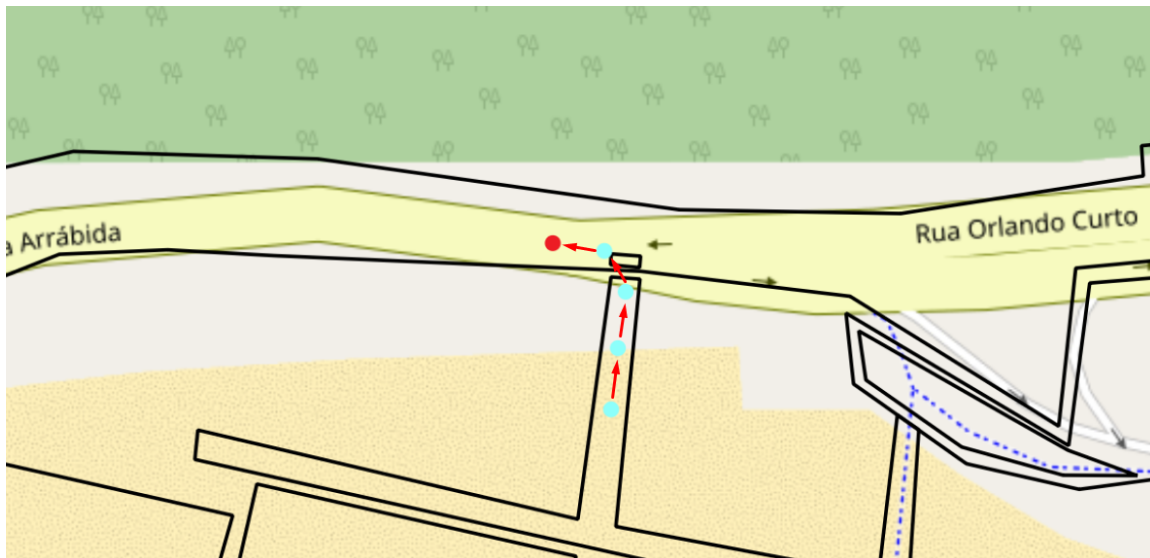


Figura 24. Ilustração da navegação das colônias escolares.

3.6. Parâmetros importantes das experiências

Para as experiências da praia da Figueirinha serão efetuadas várias simulações com vários parâmetros.

O objetivo em escolher estes parâmetros é: estabelecer cenários o mais perto da realidade possível e que vão ao encontro do contexto do problema; variar os mesmos de forma a estudar a importância que cada um terá durante a simulação bem como no resultado final; e tentar obter os resultados mais próximos da realidade. Assim, os parâmetros que foram considerados para a elaboração das simulações são:

- Número de agentes.

Serão considerados os valores providenciados pela guarda costeira do município de Setúbal, dos meses junho, julho, agosto e setembro durante os períodos da manhã, tarde e noite.

- Velocidade dos agentes.

Para algumas experiências será necessário variar a velocidade dos agentes de modo a conferir realismo à simulação. O site *healthline.com*, medicamento aprovado, usa valores de 0.97 m/s e 1,43 m/s. Contudo, como foi referido, vamos usar uma distribuição normal nos valores. Neste trabalho utilizaremos os valores de velocidade sugeridos por Nazir et al. (2014), considerando a velocidade média de um adulto de 1.12m/s e a velocidade média de uma criança de 1m/s, ambas com um desvio padrão de 0.17m/s.

Ainda no contexto sobre a variação de velocidade dos agentes, é necessário ter em consideração o terreno por onde os agentes se movimentam, pois os mesmos terão velocidades diferentes em terrenos diferentes. Assim, terá que ser aplicada uma penalização na velocidade do agente de acordo com o terreno onde o mesmo se encontra. Para esta finalidade, baseamo-nos no trabalho de Leicht et al (2017), que indica que a velocidade do ser humano reduz cerca de 13% quando caminha sobre areia seca, bem como no trabalho de Castano (2019) que estima uma redução de 20% na velocidade da pessoa quando a mesma caminha sobre uma superfície inclinada com 9° graus. Porém, no caso da penalização no terreno inclinado, consideramos, por razões de simplicidade, que seria aplicada 0.9% de penalização a cada grau de inclinação, de modo que 90° graus implicaria a uma penalização de 100% na velocidade do agente. Ainda por considerações de simplificação, o declive foi calculado utilizando a média dos declives de cada área da estrada e aplicada a respetiva penalização à velocidade do agente.

- Distribuição dos agentes.

Para este parâmetro será feita uma distribuição usando uma heurística de dispersão de agentes onde os mesmos estão distribuídos de forma uniforme nas áreas arenosas e nas áreas dos chapéus de praia. Posteriormente será realizada uma distribuição considerando apenas zonas específicas da praia como só a parte esquerda ou só a parte direita da mesma.

As crianças serão distribuídas na vizinhança do adulto correspondente.

- Trajetória dos agentes.

Os agentes, para saírem da praia irão poder percorrer os passadiços, que se encontram na areia e com largura suficiente para uma pessoa (aqui os agentes ganham velocidade pois deixam de estar em contacto com a areia solta) ou podem ignorar os passadiços, indo pela areia solta, evitando assim o congestionamento de pessoas que poderá ocorrer no passadiço.

Os valores deste parâmetro, irão variar de acordo com a experiência a ser simulada.

- Comportamentos entre agentes.

Os agentes neste modelo terão dois tipos de comportamentos: o primeiro onde estes se movimentam de forma livre, ou seja, de modo auto-organizado e o segundo em fila. Um dos objetivos será comparar os dois comportamentos.

- Número de grupos.

Com este parâmetro o objetivo será examinar como o modelo se comporta quando os agentes se movimentam em diferentes tipos de grupos. Foi estabelecido o número dos grupos de acordo com dados dos censos retirados do site do instituto nacional de estatística de Portugal (INE, 2022). Um dos tipos de grupos serão as colónias escolares que vão distribuir-se em grupos de vinte e um agentes, sendo vinte crianças acompanhadas por um adulto; e outro tipo de grupo será os agentes que usam carros e autocarros, estes vão distribuir-se em grupos que variam entre um e cinco agentes.

CAPÍTULO 4

Implementação em Python

Este capítulo destina-se à apresentação e descrição dos elementos mais relevantes da implementação do modelo contruído para esta dissertação. Serão apresentadas as classes mais relevantes do modelo, incluindo as classes dos agentes, bem como os seus atributos e como se relacionam. Por fim, é apresentada a interface gráfica desenvolvida.

Este modelo foi construído usando a extensão da biblioteca *Mesa* denominada *Mesa-geo*, que para além de permitir usar todas as funções de modelação de agentes e do espaço georreferenciado, também permite usar o mapa interativo do *Leaflet* e criar estruturas por cima deste, de modo a desenhar o mapa de simulação. Por outras palavras, conseguimos usar qualquer mapa de qualquer praia, podendo, desta forma, o modelo ser aplicado a vários ambientes de evacuação de tsunami.

4.1. Agentes e infraestruturas do modelo

Neste modelo, as pessoas são os agentes que vão efetuar a evacuação da praia e as infraestruturas serão os elementos do ambiente que irão interagir com os agentes e influenciar de forma direta ou indireta os resultados das simulações.

4.1.1. Pessoas da praia

Como já foi referido, os agentes deste modelo representam pessoas que vão ter de evacuar a praia. Estas podem ser adultos ou crianças e são o alvo do nosso estudo. A tabela 1 descreve os principais atributos do agente do tipo pessoa.

Tabela 1. Principais atributos do agente do tipo *PersonAgent*.

Atributos	Descrição
Id	Identificador único do agente
Type	Tipo de agente: Dentro_da_zona_de_inundacao, Fora_da_zona_de_inundacao e Salvo
Velocidade	Velocidade atribuída ao agente
Penalização da velocidade	A penalização que vai ser dada à sua velocidade
Target_landmark	Para onde o agente vai-se dirigir
Second_target_landmark	Para onde o agente vai-se dirigir ao colidir com outro agente
Posição_inicial	Posição inicial do agente no modelo
Tipo_landmark	Tipo de ponto de referência que o agente se está a dirigir: <i>MarkerAgent</i> e <i>MarkerRoadAgent</i>

A classe *PersonAgent* representa os agentes do tipo pessoa. Esta classe implementa os seguintes métodos:

- *step()*: é o método que vai ser chamado em cada iteração do modelo para aplicar as ações do agente, i.e., este método vai ser executado por cada iteração do modelo. É este método que vai executar as ações do agente; por exemplo, se o agente precisa de andar até certo ponto, este método vai executar, em cada iteração, a função de deslocamento, até o agente concluir essa tarefa.
- *move_point()*: este método vai movimentar o agente dado um deslocamento.
- *move()*: método que efetua os cálculos necessários para obter o deslocamento do agente, verifica em que estado o agente se encontra e verifica se o agente colidiu com outro agente. Caso exista colisão entre dois agentes este método vai aplicar a ação necessária, seja esta parar ou ultrapassar.
- *check_touch()*: este método retorna a informação se o agente em questão está próximo de outro agente, criando uma área de procura com o mesmo raio que a área ocupada pelo agente e verificando se estas intersejam.
- *is_on_sand()*: é o método que verifica se o agente está a andar na areia da praia e no caso de ser verdadeiro aplica a penalização no valor da velocidade correspondente.
- *set_agent_speed()*: método que atribui a velocidade ao agente.
- *set_agent_type()*: método que atribui o tipo do agente que pode ser: Adulto na zona de inundação, Adulto fora da zona de inundação, Criança na zona de inundação e Criança fora da zona de inundação.

4.1.2. Pontos de referência na praia

Para representar os pontos de referência na zona arenosa da praia foi criada a classe *MarkerAgent*. Esta classe contém os atributos e métodos necessários para a criação dos pontos de referência na praia. A tabela 2 descreve a classe *MarkerAgent*.

Tabela 2. Principais atributos do agente do tipo *MarkerAgent*.

Atributos	Descrição
Id	Identificador único do agente
Shape	Forma que o agente vai apresentar
Type	Tipo de agente: <i>MarkerAgent</i>
Next_marker	O ponto de referência mais próximo
Distance_to_safe_area	Distância até à zona segura correspondente

Esta classe implementa os seguintes métodos:

- *get_next_marker()*: devolve o ponto de referência mais próximo.
- *set_next_marker()*: atribui o ponto de referência mais próximo.
- *get_distance_to_safety_area()*: devolve a distância a uma zona segura.

4.1.3. Pontos de referência na estrada

Para representar os pontos de referência que estão fora da parte arenosa da praia, semelhante à secção anterior, foi criada a classe *MarkerRoadAgent*. Esta classe contém os atributos e métodos necessários para a criação dos pontos de referência na estrada. Embora semelhantes, esta classe tem a diferença de ter o atributo *second_next_marker*, que permite tratar do tipo de colisão *away collision*, como previamente referido na subsecção 3.6 do capítulo 3. A tabela 3 descreve a classe *MarkerRoadAgent*.

Tabela 3. Principais atributos do agente do tipo *MarkerRoadAgent*.

Atributos	Descrição
Id	Identificador único do agente
Shape	Forma que o agente vai apresentar
Type	Tipo de agente: <i>RoadMarkerAgent</i>
Next_marker	O ponto de referência mais próximo
Second_next_marker	O segundo ponto de referência mais próximo
Distance_to_safe_area	Distância até à zona segura correspondente

Esta classe implementa os seguintes métodos:

- *get_next_marker()*: devolve o ponto de referência mais próximo.
- *set_next_marker()*: atribui o ponto de referência mais próximo.

- *get_distance_to_safety_area()*: devolve a distância a uma zona segura.
- *set_second_next_marker()*: atribui o segundo ponto de referência mais próximo.
- *get_second_next_marker()*: devolve o segundo ponto de referência mais próximo.

4.1.4. Mapa

Neste modelo, a classe *MapAgent* é responsável por representar visualmente o SIG, i.e., distingue as estruturas da praia (restaurantes, parques de estacionamento, entre outros) que estão ilustradas na figura 25. A tabela 4 descreve os principais atributos da classe *MapAgent*.

Tabela 4. Atributos da classe *MapAgent*.

Atributos	Descrição
Id	Identificador único de cada zona do mapa
Shape	Forma do mapa
Type	Tipo de cada zona no mapa

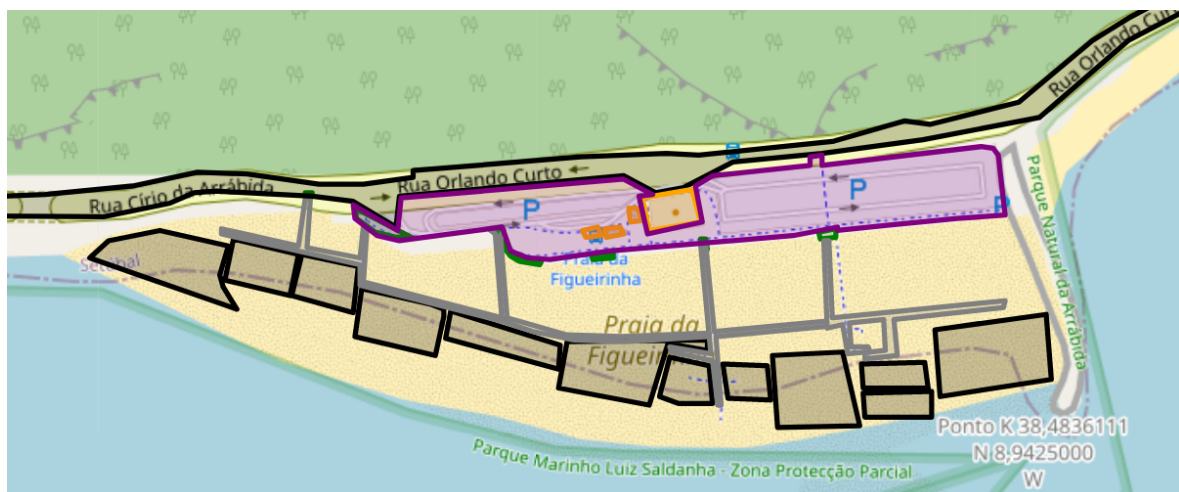


Figura 25. Imagem das diferentes partes da praia.

4.2. Modelo

Nesta secção será abordada a implementação do modelo de simulação e a explicação da sua função.

O modelo, neste projeto implementado na classe *TsunamiModel*, que estende a classe *Model* da framework *Mesa*, que por sua vez fornece os métodos necessários para a criação de um modelo baseado em agentes. A classe *TsunamiModel* tem como principais funções:

- Leitura do SIG, ligação do SIG ao modelo, e carregamento dos ficheiros *GeoJSON* com todos os dados da praia.
- Geração dos agentes.

- Integração dos pontos de referência no SIG e aplicação de todos os cálculos relacionados com os mesmos.
- Leitura do ficheiro do declive do terreno.

Esta classe instancia todas as estruturas georreferenciadas. A tabela 5 descreve os principais atributos da classe *TsunamiModel*.

Tabela 5. Principais atributos do modelo.

Atributos	Descrição
Map_coords	Coordenadas que o mapa vai mostrar
Regions	As regiões geográficas a serem carregadas no SIG
Grid	O tipo de grelha que o modelo vai usar: <i>Geospace</i>
Steps	Número de iterações do modelo
Schedule	Tipo de ativação dos agentes: <i>RandomScheduler</i>
Pop_size	Número de pessoas

4.3. Servidor

A classe *Server* é responsável por ligar o modelo com a parte da representação visual da biblioteca Mesa.

A representação visual deste modelo, como se ilustra na figura 26, é composta pelo mapa que mostra a localização da simulação dos agentes, botões que permitem dar início ou parar a simulação, vários botões seletores que permitem parametrizar variáveis que serão o *input* da simulação (como listado na tabela 6), um gráfico que mostra os estados dos agentes ao longo das iterações da simulação e um cronómetro que nos informa o tempo de simulação.

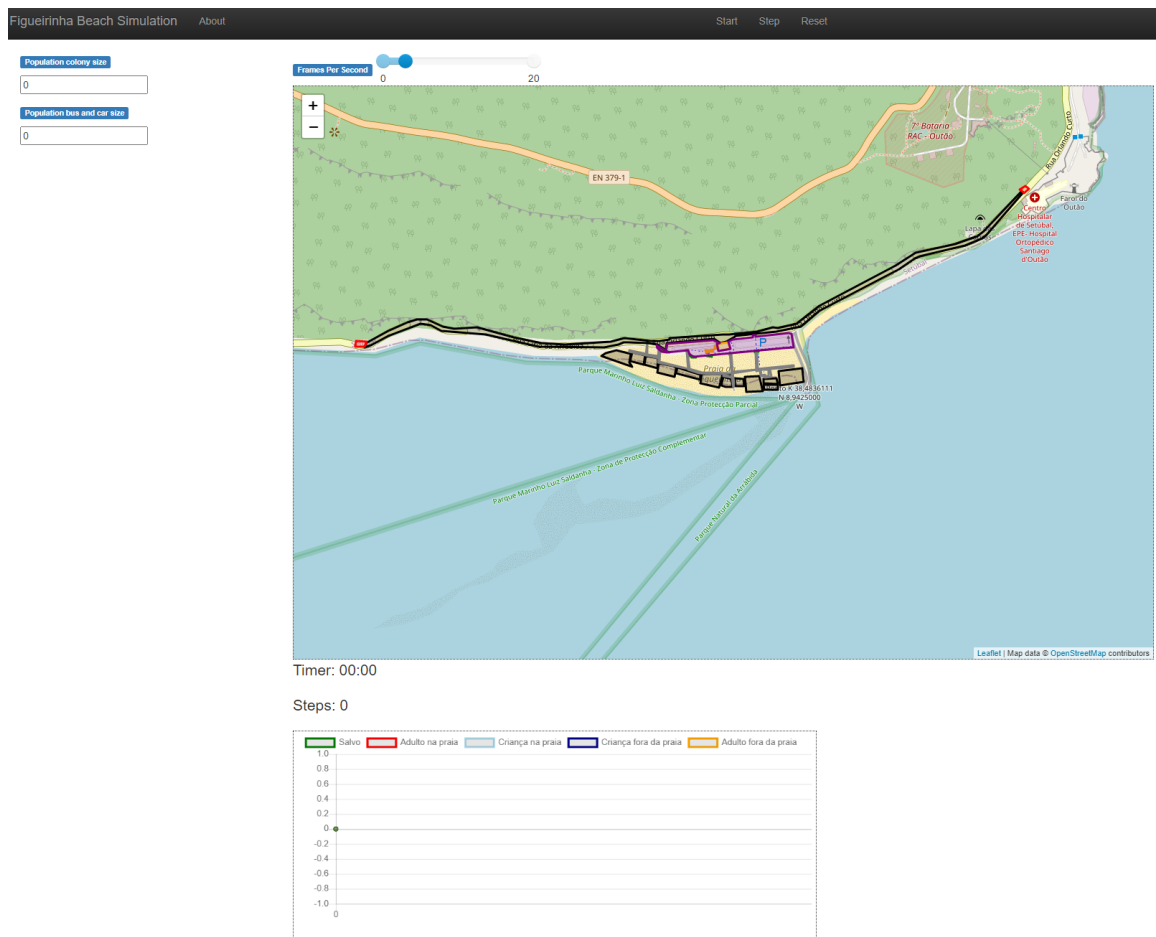


Figura 26. Representação visual do modelo baseado em agentes.

Tabela 6. Elementos da interface gráfica, representados na figura 26 e a sua descrição.

Botões	Descrição
Start	Botão que inicia a simulação, também serve para parar a simulação
Reset	Botão que volta a redefinir a simulação
Step	Botão que efetua uma iteração da simulação
Population bus and car size	Número de agentes que usa carro e autocarro
Population colony size	Número de colónias escolares
Frames per second	Número de iterações por segundo da simulação

4.4. Diagrama UML das Classes

As figuras 27 representa os diagramas das classes deste projeto.

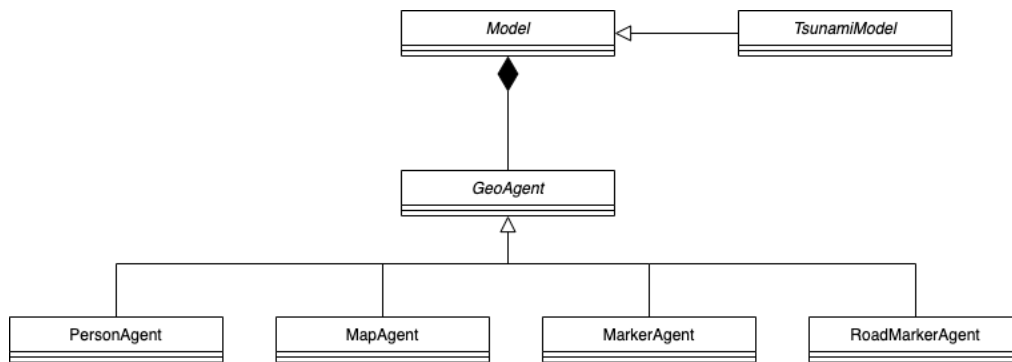


Figura 27. Diagrama UML das classes do projeto.

CAPÍTULO 5

Simulações e Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados das diversas simulações que foram realizadas utilizando o modelo construído para a evacuação da praia da Figueirinha. Estas experiências têm como objetivo testar as várias variáveis e parâmetros relacionados com a evacuação, de modo a obter resultados conclusivos e verificar o modelo utilizado.

5.1. Experiência 1: Variação do Número de Agentes e Modo de Organização

Nesta experiência o objetivo é observar como os resultados das simulações variam com o aumento do número de agentes. Para estas simulações foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Velocidade normalmente distribuída com valores de 1.12 m/s para a velocidade dos adultos e com valores de 1 m/s para a velocidade das crianças, ambas com um desvio padrão de 0.17.
- Navegar em fila ou em modo auto-organizado.
- Seguir o passadiço da praia ou não, este valor foi varrido pelos intervalos de 0%, 50% e 100%.
- Penalização de -13% no valor da velocidade quando caminha sobre a areia.

A tabela 7 apresenta os parâmetros (coluna 1, 2 e 3) e os resultados (coluna 4, 5 e 6) da experiência 1 e a tabela 8 apresenta as taxas de mortalidade da mesma.

Tabela 7. Resultados da experiência 1.

Agentes	Modo auto-organizado?	% de agentes a seguir pelo passadiço	Adultos na área inundada	Crianças na área inundada	Tempo
500	Sim	0%	0	5	35:00
	Não	100%	80	252	35:00
	Sim	50%	1	5	35:00
	Sim	100%	0	7	35:00
1000	Sim	0%	2	23	35:00
	Não	100%	196	612	35:00
	Sim	50%	1	23	35:00
	Sim	100%	27	103	35:00
1500	Sim	0%	10	79	35:00
	Não	100%	302	951	35:00
	Sim	50%	31	150	35:00
	Sim	100%	69	281	35:00

Tabela 8. Taxa de mortalidade da experiência 1

Agentes	Modo auto-organizado?	Agentes a seguir pelo passadiço (%)	Taxa de Mortalidade (%)
500	Sim	0	1
	Não	100	66,4
	Sim	50	1,2
	Sim	100	1,4
1000	Sim	0	2,5
	Não	100	80,8
	Sim	50	2,4
	Sim	100	13
1500	Sim	0	5,9
	Não	100	83,5
	Sim	50	12,1
	Sim	100	23,3

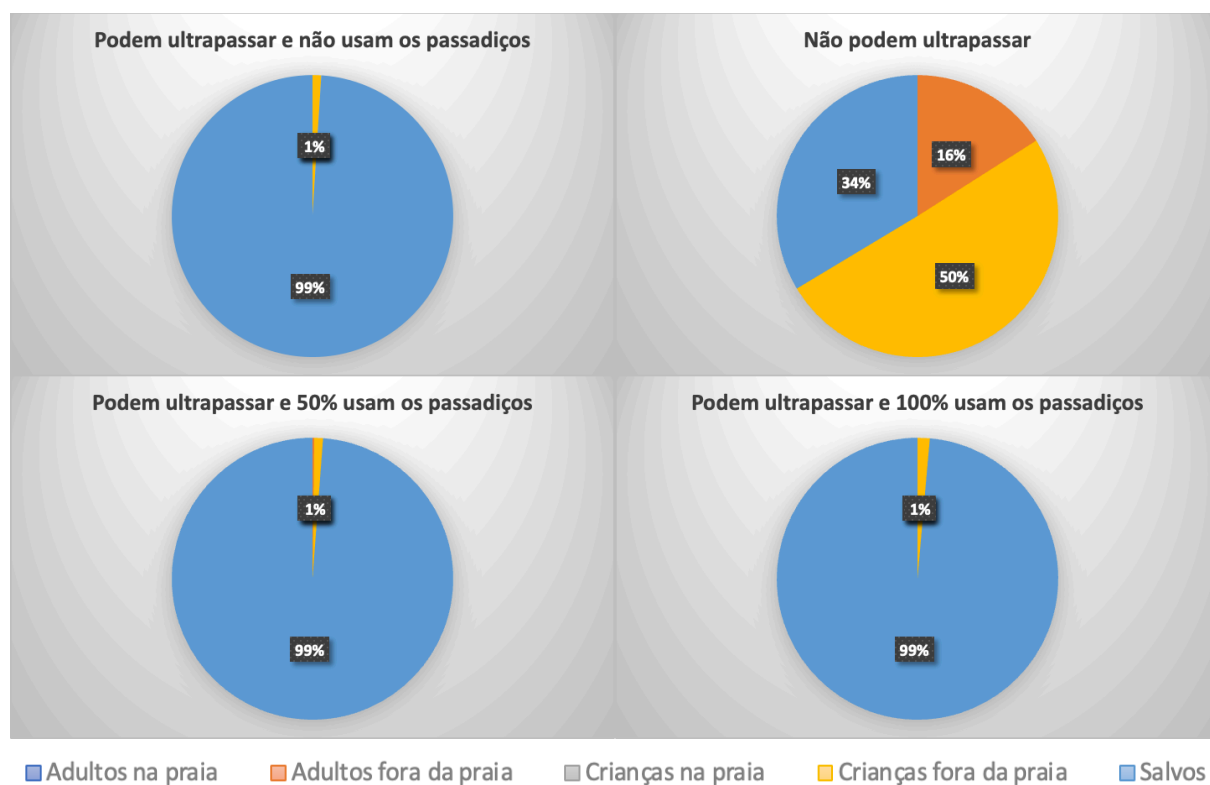


Figura 28. Resultados das experiências com 500 agentes.

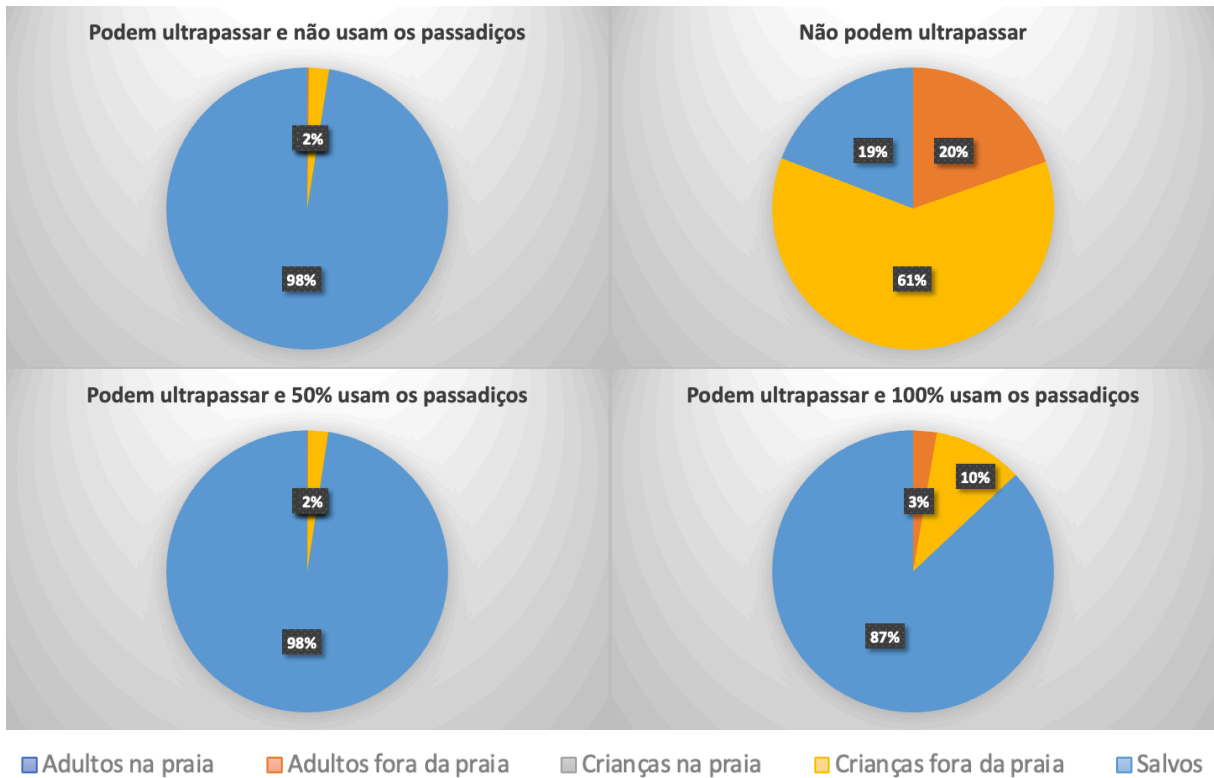


Figura 29. Resultados das experiências com 1000 agentes.

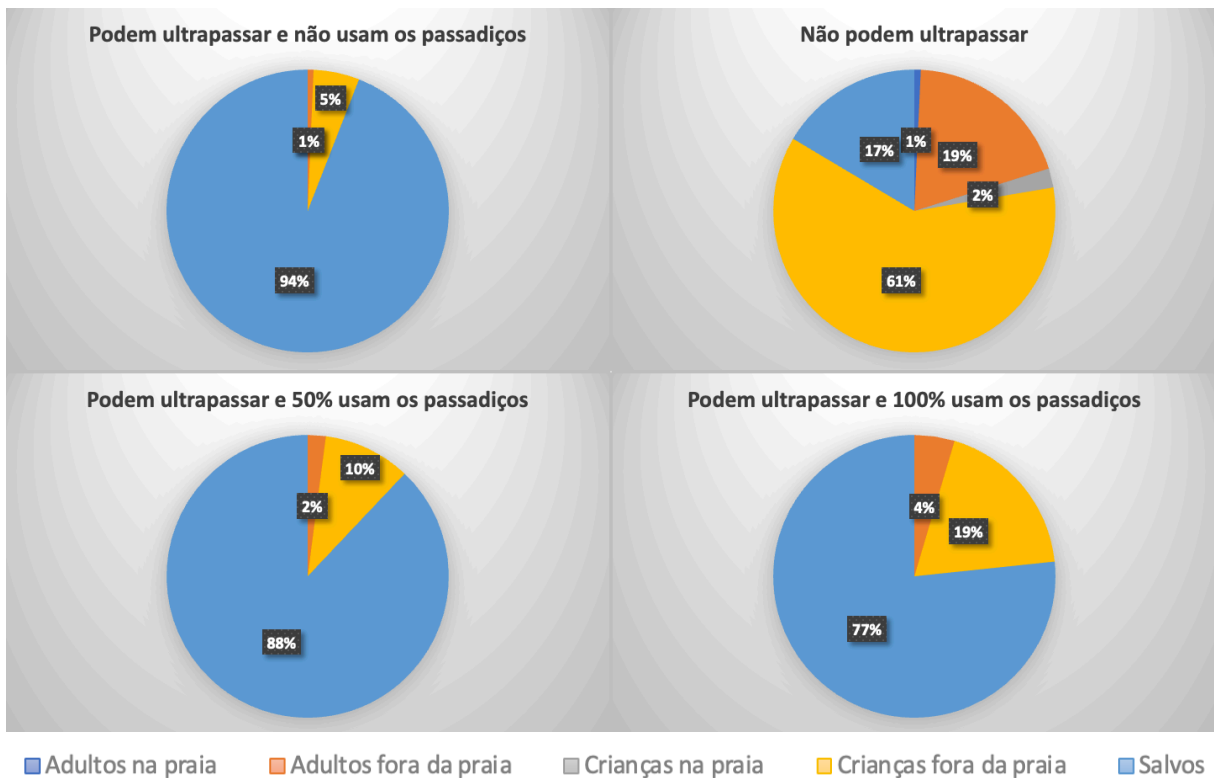


Figura 30. Resultados das experiências com 1500 agentes.

Como podemos observar através dos resultados da tabela 7, da tabela 8 e dos gráficos das figuras, 29, 30 e 31, à medida que foi aumentado o nível de obstrução na simulação, os resultados foram piorando. É destacado a situação onde os agentes só podem andar em fila, pois, revela os piores resultados desta experiência. Isto acontece devido aos agentes não conseguirem ultrapassar agentes que tenham velocidade inferior, como é o caso das crianças. Esta situação é ilustrada na figura 32.

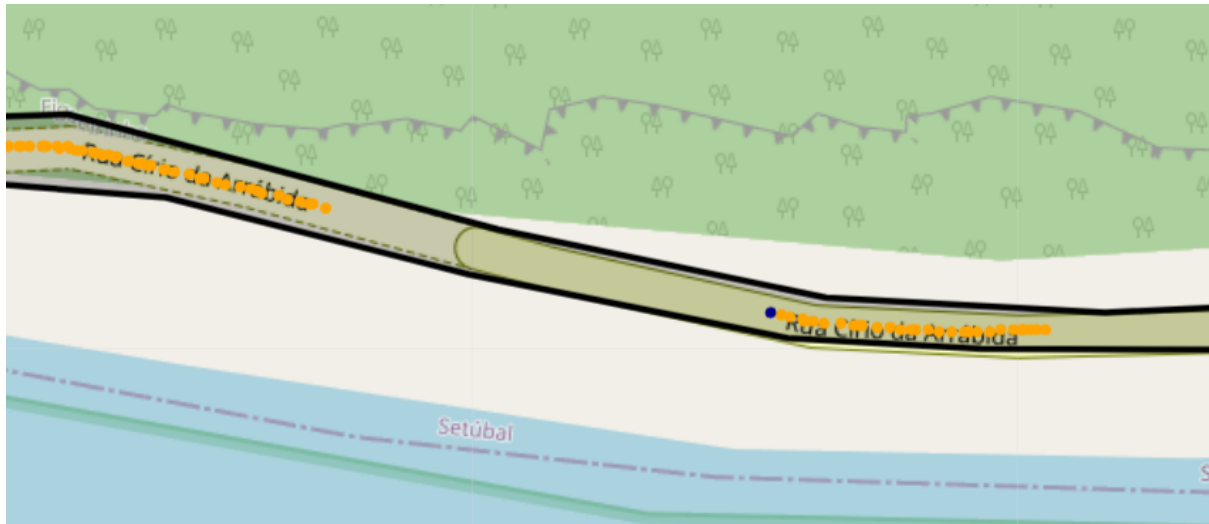


Figura 31. Caso onde uma criança atrasa a evacuação de outros agentes.

5.2. Experiência 2: Variação da Distribuição dos Agentes na Praia

Nesta experiência o objetivo será perceber qual a área da praia que permite uma evacuação mais rápida e para tal foram feitas 10 simulações, onde cinco das simulações foram colocados 250 agentes na parte oriental da praia e nas outras cinco foram colocados 250 agentes na parte ocidental da praia.

Para esta experiência foram só considerados adultos e todos ignoraram os passadiços da praia. As tabelas 9 e 10 mostram os resultados obtidos.

Tabela 9. Resultados das simulações usando a parte ocidental da praia.

Total	Adultos na zona inundada	Tempo
250	0	30:01
	0	31:20
	0	32:03
	1	35:00
	0	30:55

Tabela 10. Resultados das simulações usando a parte oriental da praia.

Total	Adultos na zona inundada	Tempo
250	0	32:01
	2	35:00
	2	35:00
	0	31:50
	0	33:59

De acordo com as tabelas 9 e 10, os resultados aparentam ser semelhantes. Neste contexto, e por considerações de simplicidade, iremos assumir que o fator a ser estudado nesta experiência, i.e., a zona da praia que permite uma evacuação mais rápida, não tem impacto no resultado. Assim, os agentes que podem ter maior risco de não efetuar a evacuação a tempo, são os que têm menor valor de velocidade e os que estão localizados na zona central da praia.

5.3. Experiência 3: Simulações com Dados do SMPCB

Como foi referido, foram providenciados, pelo SMPCB, dados sobre a quantidade de carros, autocarros e escolas que frequentaram a praia ao longo desta época balnear, como indicado na tabela 11. Dito isto, demos uso a estes dados para implementar nas simulações de forma a torná-las o mais próximo da realidade possível.

Tabela 11. Dados do SMPCB com o tamanho da população da praia da Figueirinha nos meses de época balnear.

Mês	Período	Autocarros e Carros	Colónias escolares
Junho	Manhã	415	0
	Tarde	484	424
	Noite	25	0
Julho	Manhã	918	0
	Tarde	1070	1811
	Noite	27	0
Agosto	Manhã	870	0
	Tarde	1217	0
	Noite	33	0
Setembro	Manhã	341	0
	Tarde	398	0
	Noite	19	0

Temos os seguintes parâmetros para as simulações em questão:

- No caso das escolas, as crianças irão seguir um adulto.
- Nos outros casos, os agentes serão distribuídos em grupos de 1 a 5 elementos.
- Os valores da velocidade são distribuídos de forma normal com valores de 1.12 m/s. para os adultos e 1 m/s para as crianças de idade inferior a dez anos, ambas com desvio padrão de 0.17.
- Há uma penalização de 13% na velocidade dos agentes quando caminham sobre areia seca.
- É usada a média do declive para calcular a penalização da velocidade na zona da estrada, 0.9% por cada grau de inclinação.
- As escolas vão sempre pelos passadiços da areia em fila.
- A simulação terá um tempo limite de 35 minutos.
- Para cada cenário são feitas cinco simulações

Para os meses junho e julho vamos simular três cenários:

- Durante a manhã, ou seja, quando as escolas ainda se encontram na praia.
- Durante a tarde, que é a altura que a praia se encontra mais cheia.
- Durante a noite, embora não se encontre muitas pessoas na praia, foi requisitado pelo SMPCB.

Para os meses de agosto e setembro, como não existem colônias escolares a frequentar a praia, simulamos apenas o cenário no qual a praia está mais cheia. As simulações são consideradas da parte da manhã no período das nove horas da manhã antes das colônias escolares chegarem à praia e são consideradas noturnas a partir do período das dezanove horas.

5.3.1. Junho

Para o mês de junho, consideramos cenários durante três períodos de tempo diferentes:

- Manhã:

Para esta experiência temos 415 agentes que chegam à praia via autocarro e carro:

Tabela 12. Resultados do mês de junho da parte da manhã.

Nº agentes	Adultos na área de inundação	Crianças na área de inundação	Tempo
415	41	55	35:00
	34	46	35:00
	39	54	35:00
	32	57	35:00
	40	63	35:00

Nestas experiências houve 10% de adultos, 63% de crianças e uma média de 92 agentes que não completaram a evacuação. A tabela 12 apresenta os resultados das experiências do mês de junho durante a manhã.

- Tarde:

Durante a tarde temos um valor de 424 agentes para colônias escolares e 484 agentes que usam carro e autocarro como meio de deslocação até à praia, obtendo um total de 908 agentes. A tabela 13 apresenta os resultados das experiências do mês de junho durante a parte da tarde.

Tabela 13. Resultados do mês de junho da parte da tarde.

Nº agentes	Adultos na área de inundação	Crianças na área de inundação	Tempo
908	75	347	35:00
	63	308	35:00
	64	293	35:00
	62	287	35:00
	54	273	35:00

Durante estas experiências notaram-se engarrafamentos provocados pelas colônias escolares sendo a velocidade das crianças o fator mais decisivo nos resultados. Houve 16% de adultos, 58% de crianças e uma média de 365 agentes não chegaram à zona segura.

- Noite:

Para as simulações noturnas deste mês consideramos 25 agentes, cujos resultados estão apresentados na tabela 14.

Tabela 14. Resultados do mês de junho da parte noturna.

Nº agentes	Adultos na área de inundação	Crianças na área de inundação	Tempo
25	1	0	35:00
	2	1	35:00
	0	0	31:43
	0	0	33:30
	0	0	33:41

Nas simulações noturnas, o único fator observado que poderá causar um agente não chegar à zona segura será a velocidade da criança que irá abrandar a velocidade do seu adulto responsável.

5.3.2. Julho

Semelhante ao mês de junho, também consideramos os três períodos de tempo:

- Manhã:

Para as simulações do período da manhã deste mês consideramos 918 agentes, cujos resultados estão apresentados na tabela 15.

Tabela 15. Resultados do mês de julho da parte da manhã.

Nº agentes	Adultos na área de inundação	Crianças na área de inundação	Tempo
918	94	128	35:00
	113	116	35:00
	74	118	35:00
	103	115	35:00
	110	125	35:00

Quando comparado com os resultados de junho à tarde, notamos que há uma redução no número de crianças que não chegam à área de segurança, pois neste cenário não existem colônias escolares. Obtendo assim, uma taxa de 14% de adultos, 62% de crianças e uma média aproximada de 219 agentes que não chegam à zona segura.

- Tarde:

Durante a tarde, consideramos 2881 agentes, onde 1070 são agentes que chegam à praia de carro e autocarro e 1811 são colônias escolares. Os resultados apresentam-se na tabela 16.

Tabela 16. Resultados do mês de julho da parte da tarde.

Nº agentes	Adultos na área de inundação	Crianças na área de inundação	Tempo
2881	229	1208	35:00
	196	945	35:00
	203	1010	35:00
	230	1084	35:00
	252	1135	35:00

Obtemos uma taxa de 24% de adultos, 55% de crianças e uma média de 1298 agentes que não chegaram à zona segura.

Durante estas simulações notou-se engarrafamentos na zona das escadas de acesso à praia, e um atraso por parte das crianças. É de notar que temos um número elevado de crianças que não chegaram à zona segura. Isto deve-se ao elevado número de colónias escolares do mês de junho.

- Noite:

Durante as simulações noturnas consideramos 27 agentes e a tabela 17 apresenta os seus resultados.

Tabela 17. Resultados do mês de julho da parte noturna.

Nº agentes	Adultos na área de inundação	Crianças na área de inundação	Tempo
27	1	1	35:00
	4	1	35:00
	0	0	34:32
	0	0	32:11
	0	0	33:06

Muito semelhante ao mês de junho, o fator decisivo foi a velocidade da criança.

5.3.3. Agosto

Para o mês de agosto, consideramos 1217 agentes.

Tabela 18. Resultados do mês de agosto.

Nº agentes	Adultos na área de inundação	Crianças na área de inundação	Tempo
1217	168	174	35:00
	170	160	35:00
	147	171	35:00
	166	169	35:00
	199	199	35:00

Observando os resultados destas simulações na tabela 18, obtemos uma taxa de 18% de adultos, 68% de crianças e uma média de 344 pessoas que não chegaram à zona segura. Isto deve-se a fatores, que foram possíveis identificar através de inspeção visual, como:

- Os engarrafamentos nas zonas das escadas de acesso à praia.
- O abrandamento da velocidade dos agentes tanto em areia solta como na subida da estrada.
- O facto de as crianças estarem distribuídas pelos grupos, abrandando os mesmos.
- O facto de as crianças terem que reunir com a sua família ou adulto responsável primeiro.

5.3.4. Setembro

Para o mês de setembro, consideramos 398 agentes.

Tabela 19. Resultados do mês de setembro.

Nº agentes	Adultos na área de inundação	Crianças na área de inundação	Tempo
398	33	62	35:00
	37	57	35:00
	35	64	35:00
	28	42	35:00
	30	53	35:00

Feitas as simulações do mês de setembro, representadas na tabela 19, obtemos uma taxa de 10% de adultos, 66% de crianças e uma média aproximada de 88 agentes que não chegaram à zona segura. Durante o decorrer destas simulações notamos, através de inspeção visual no decorrer das mesmas, que, embora havendo engarrafamento na zona das escadas, o fator mais decisivo foi o declive, fazendo com que as crianças atrasassem os grupos e não chegassem à zona segura.

As tabelas 20 e 21 apresentam as taxas de mortalidade da experiência 3. A tabela 22 apresenta a comparação das percentagens dos adultos e das crianças que não completam a evacuação, durante o período da tarde da mesma experiência.

Tabela 20. Taxa mortalidade da experiência 5.3 do mês de junho e julho.

Mês	Taxa de mortalidade na parte da manhã (%)	Taxa de mortalidade na parte da tarde (%)	Taxa de mortalidade na parte da noite (%)
Junho	22,2	40,2	3,2
Julho	24	45	5,2

Tabela 21. Taxa de mortalidade da experiência 5.3 do mês de agosto e setembro.

Mês	Taxa de mortalidade (%)
Agosto	28,3
Setembro	22,1

Tabela 22. Percentagens dos adultos e das crianças que não completaram a evacuação, durante o período da tarde, nos meses considerados da experiência 3

Mês	Adultos na área de inundação (%)	Crianças na área de inundação (%)
Junho	16	58
Julho	24	55
Agosto	18	68
Setembro	10	66

5.4. Resumo das Experiências

Após realizadas as experiências, podemos concluir que não será possível obter uma taxa de sucesso de 100% com a estrutura atual dos apoios de praia.

Considerando os resultados apresentados na secção 5.1, notamos que, para as mesmas condições de ambiente, o padrão dos resultados, quando o número de agentes varia, é o mesmo, i.e., quantos mais agentes houver na simulação, mais serão os agentes que não irão completar a evacuação nos 35 minutos estabelecidos. Com especial atenção aos casos em que todos os utentes da praia decidem utilizar os passadiços, o que revela resultados piores do que quando só 50% usa ou mesmo quando nenhum utente usa. Esta experiência também indica que o modo mais ineficiente de evacuar a praia é em fila, pois agentes com velocidade reduzida podem atrasar outros agentes e causar os resultados mais negativos.

Os resultados apresentados na secção 5.2, sugerem que ambas as vias de acesso à praia são igualmente eficazes em relação ao tempo de evacuação. O posicionamento do agente na praia não se afigura ser um fator decisivo que contribui para a taxa de mortalidade.

Com os resultados apresentados na secção 5.3, notamos que assim que foram introduzidos parâmetros na simulação de modo a tornar os cenários mais aproximados à realidade, o número de agentes que não chega à zona segura aumentou. Podemos assim afirmar que a navegação em grupo e a natureza do terreno são fatores decisivos nos resultados das simulações.

Finalmente, nas experiências observamos que a ocorrência de engarrafamentos era recorrente especialmente em cenários em que existiam colónias escolares.

Conclusão

Neste trabalho foram realizadas simulações computacionais relativas à evacuação da praia da Figueirinha devido a um aviso de tsunami usando um modelo baseado em agentes. Com este capítulo, o objetivo será responder às questões de investigação mencionadas no capítulo 1.

Esta dissertação tem como fim desenvolver um modelo baseado em agentes para auxiliar no estudo da evacuação da praia da Figueirinha na eventualidade de surgir um tsunami. Para este estudo foram levantadas as seguintes questões:

- Qual a possibilidade de evacuação, em caso de tsunami a partir do momento em que se sente um sismo na praia da Figueirinha, considerando determinados cenários?
- Quais as taxas de mortalidade na praia da Figueirinha nos cenários simulados?
- Quais medidas e os melhores trajetos de evacuação, tendo em conta a topologia do terreno da praia e a segurança das pessoas até chegar a um ponto seguro?

Para responder à primeira questão de investigação, após analisados os resultados, observamos que a possibilidade de evacuação em cada cenário diminuía quando era introduzida complexidade no modelo. Por exemplo, quando são considerados apenas agentes adultos com velocidade constante sem penalizações, a possibilidade de evacuação era de 100%, mas, à medida que foram adicionadas condições como navegação em grupo e crianças, essa possibilidade foi diminuindo. Como demonstra o exemplo da experiência 5.3.2, relativa ao período da tarde do mês de junho, obtemos uma taxa de 56% de agentes que conseguem evacuar da praia. Os resultados sugerem pois que é possível evacuar a praia da Figueirinha, mas a probabilidade de sucesso diminui quando os agentes estão organizados em grupos de crianças.

Para responder à segunda pergunta, após uma análise dos resultados das simulações nos cenários considerados, obtemos as taxas de mortalidade que, para a experiência 1 estão apresentadas na tabela 8 onde revelam que o pior caso é quando os agentes efetuam o percurso de evacuação em fila. Para a experiência 2, a taxa de mortalidade é quase nula, existindo apenas um caso onde um agente não chegou à zona segura na parte esquerda da praia e dois casos onde dois agentes não chegaram à zona segura na parte direita da praia.

Para a experiência 3, cuja taxa de mortalidade está apresentada nas tabelas 20, 21 e 22, mostra que a taxa de mortalidade mais alta é quando existem colónias escolares na simulação, sendo o maior valor obtido o mês de julho, durante o período da tarde.

Os resultados sugerem pois que a praia não reúne as condições necessárias para garantir uma evacuação com 0% de taxa de mortalidade. Os agentes com menor taxa de mortalidade são os

adultos, mas quando introduzimos crianças na simulação, a mortalidade aumenta. As crianças têm que ser obrigatoriamente acompanhadas por um ou mais adultos; assim, o adulto responsável terá que diminuir a sua velocidade e esperar pela criança.

Conclui-se também que, regra geral, uma criança com menos de 10 anos não terá velocidade suficiente para poder chegar à zona segura, influenciando o seu grupo e provocando situações de engarrafamento. Estas situações agravam-se quando são introduzidas colónias escolares na simulação, pois tratam-se de vinte crianças a seguir um adulto, i.e., um grupo de velocidade reduzida a obstruir o caminho de outros grupos de agentes.

Quando comparamos o mês de junho no período da tarde com o mês de julho no período da manhã (tabela 20), onde temos um número semelhante de agentes, mas em julho não existem colónias escolares, notamos uma redução no número de crianças na área inundada nesse mês. Isto sugere que as colónias escolares são um fator que piora a taxa de sucesso, nas condições de evacuação simuladas.

Para responder à terceira questão de investigação, depois de analisados os resultados, verificamos que a topologia do terreno tem uma influência significativa na evacuação, porém é um fator que atualmente, para evacuar a praia, não é possível ser evitado, uma vez que é similar nas duas únicas vias de evacuação da praia. Seguidamente, propõem-se algumas sugestões que poderiam vir a ser analisadas e testadas, tendo em vista verificar se aumentam a taxa de sucesso de evacuação:

- Construir muros ao longo do passeio ou elevar a cota do terreno. Embora tendo custos elevados, pensa-se que seria vantajoso, na medida em que poderia proteger a zona em causa a longo prazo.
- O alargamento da barra de areia que já existe ao longo da praia. Esta sugestão não tem custos elevados associados, pois a dragagem das areias tem que ser feita periodicamente. Sugere-se ainda o reforço com betão, uma vez que a areia não tem integridade estrutural.

Outra sugestão seria a realização de simulacros, tendo em vista otimizar o comportamento das pessoas, sendo uma atividade que poderia ajudar a preparação das pessoas para o desastre natural e aumentar a taxa de sucesso. As observações e resultados dos simulacros poderia também auxiliar a realização de simulações computacionais, através da recolha de dados empíricos que poderiam ser incorporados nas simulações, tanto para a praia da Figueirinha como para outras praias.

Neste trabalho foram estudadas as duas únicas vias de acesso à praia, e os resultados sugerem que não são vias com capacidade de evacuar todas as pessoas da praia. Disto isto, importa apelar ao seguimento das diretrizes do quadro de Sendai para redução de risco de desastres e do Gabinete das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres.

Como sugestões de trabalho futuro, apresentam-se dois cenários que seriam interessantes implementar num desenvolvimento futuro do modelo baseado em agentes desta dissertação.

Uma experiência a considerar seria a construção de acessos elevados, como por exemplo, passagens aéreas, que iria permitir que os utentes da praia da Figueirinha se colocassem em local elevado em pouco tempo. Seria interessante observar e estudar o comportamento dos agentes com acesso a uma nova via de evacuação.

Outra experiência a ser considerada, que foi proposto pelo SMPCB no decorrer de uma reunião agendada com os responsáveis do mesmo, seria o cenário onde existe a possibilidade de ocorrência de derrocadas originadas pelo sismo. O desafio desta experiência seria evacuar por apenas uma das vias de acesso.

Referências Bibliográficas

- Marques, Christopher. 2017. 28 de fevereiro de 1969: a noite em que Portugal tremeu para reavivar o risco. RTP, 2017. Disponível em <https://www.rtp.pt/noticias/pais/28-de-fevereiro-de-1969-a-noite-em-que-portugaltremeu-para-reavivar-o-risco_n985464>. Acesso em junho de 2022
- Araújo, Eric. Introdução à Modelagem baseada em Agentes (Agent-based Models). Youtube, 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=xT5HJVr5Sa0&ab_channel=EricAra%C3%BAjo>. Acesso em: janeiro de 2022.
- Bateman, Robert & Bowden, Royce & Gogg, Thomas & Harrel, Charles & Montevechi, Jack. 2013. Simulação de Sistemas aprimorando processos de logística, serviços e manufatura. Organização Belge Engenharia e Sistemas, tradução Alain de Norman et d'Audenhove ... et al. 1. ed. - Rio de Janeiro. 200p
- Bolstad, P. GIS Fundamentals: A First Text on Geographic Information Systems, 5ª Edição. University of Minnesota: XanEdu, 2016
- Bonabeau E. Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems. Proc Natl Acad Sci U S A. 2002 May 14;99 Suppl 3(Suppl 3):7280-7. doi: 10.1073/pnas.082080899. PMID: 12011407; PMCID: PMC128598.
- Brocke, Jan vom & Hevner, Alan & Maedche, Alexander. (2020). Introduction to Design Science Research.10.1007/978-3-030-46781-4_1.
- Castano, Cesar. 2019. Fluctuations in Walking Speeds and Spatiotemporal Gait Parameters When Walking on a Self-Paced Treadmill at Level, Incline, and Decline Slopes. Master's thesis, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Central Florida
- Champion, Alexis & Mandiau, René & Kolski, Christophe & Heidet, Alexandre & Kemeny, Andras. (1999). Traffic generation with the SCANer II simulator: towards a multi-agent architecture.
- Chen, Xuwei & Zhan, F.. (2014). Agent-based modeling and simulation of urban evacuation: relative effectiveness of simultaneous and staged evacuation strategies. 10.1057/9781137453648_6.
- Clarke, Keith (1999). Getting started with geographic information systems. Prentice Hall, Upper Saddle River (NJ), 340 pp.
- Crockford, Douglas. (2018). How JavaScript Works.
- Cronkleton, Emily & Bubnis, Daniel. What is the Average Walking Speed of an Adult? Healthline, 2019. Disponível em <<https://www.healthline.com/health/exercise-fitness/average-walkingspeed> >. Acesso em: Junho de 2022
- Crooks, Andrew & Castle, Christian. (2012). The Integration of Agent-Based Modelling and Geographical Information for Geospatial Simulation. 10.1007/978-90-481-8927-4_12.

- Emídio, António José Nunes de Melo. 2014. “Avaliação da vulnerabilidade dos edifícios no centro urbano da cidade de Setúbal, em caso de Tsunami”. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território. Universidade de Lisboa.
<http://hdl.handle.net/10451/20465>
- Esri Australia Pty. Ltd. What is GIS? Disponível em: <<https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/overview>>.
Acesso em: janeiro de 2022.
- Esteves, Pedro Miguel Pereira. 2020. As Tecnologias de Informação Geográfica e a sua aplicabilidade na Gestão de Resíduos e Espaços Verdes. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências Sociais e Humanas. Universidade Nova de Lisboa. <http://hdl.handle.net/10362/125979>
- INE. Estimativa da população residente de Setúbal de 2020 e 2021. 2022 Disponível em: <https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_main>. Acesso em: junho de 2022.
- Fielding, Roy. (2000). Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures.
- Figueirinha é a melhor praia acessível do país. 2021. Disponível em:
<<https://www.munsetubal.pt/figueirinha-e-a-melhor-praia-acessivel-do-pais/>>. Acesso em setembro de 2022.
- Foudil, Cherif & Djedi, NourEddine & Sanza, Cédric & Duthen, Yves. (2009). Path Finding and Collision Avoidance in Crowd Simulation. CIT. 17. 217-228. 10.2498/cit.1000873.
- Lima, Tiago & França, Tiago & Faria, Sergio & Silveira, Britaldo & Filho, Britaldo & Carneiro, Tiago & Carneiro, Senna. (2009). Modelagem de sistemas baseada em agentes: alguns conceitos e ferramentas.
- Galhardi, Antonio & Souza, Izabel & Bussola, Fernando. (2019). A Simulação Baseada em Agentes – Evacuação de pessoas sob um Tsunami: Aplicações do Netlogo.10.14488/ENEGEP2019_TN_STO_292_1648_39255.
- GEOS contributors (2021). GEOS computational geometry library. Open Source Geospatial Foundation. URL <https://libgeos.org/>.
- Harrell, Charles & Fu, Michael & Andradottir, Sigrun & Carson, John & Glover, Fred & Ho, Y.-C & Kelly, James & Robinson, Stephen. (2000). Integrating optimization and simulation: research and practice. 1. 610-616. 10.1109/WSC.2000.899770.
- IOC (2013) – Tsunami Glossary. Intergovernmental Oceanographic Commission, UNESCO. Technical Series, 85. 45 p. <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001882/188226e.pdf>. Acesso em julho de 2022.
- Johnston, Carol. (1998). Geographic Information Systems in Ecology. Boston: Blackwell Scientific.
- Kazil, Jacqueline & Masad, David & Crooks, Andrew. (2020). Utilizing Python for Agent-Based Modeling: The Mesa Framework. 10.1007/978-3-030-61255-9_30.
- Klein, Robert. (2018). The Role of Government in Managing the Risks of Natural Disasters. 10.13140/RG.2.2.30959.69285.
- Krisp, Jukka. (2016). Landmarks for Location-Based Services (LBS) in Particular Navigation and Wayfinding. KI – Künstliche Intelligenz. 10.1007/s13218-016-0462-8.

Krukar, Jakub & Schwering, Angela & Anacta, Vanessa. (2017). Landmark-Based Navigation in Cognitive Systems.

KI - Künstliche Intelligenz. 10.1007/s13218-017-0487-7.

Lämmel, Gregor. (2011). Escaping the Tsunami: Evacuation Strategies for Large Urban Areas. Concepts and Implementation of a Multi-Agent Based Approach. 10.14279/depositonce-2993.

Leicht, Anthony & Crowther, Robert. (2007). Pedometer Accuracy during Walking over Different Surfaces. Medicine and science in sports and exercise. 39. 1847-50. 10.1249/mss.0b013e3181405b9f.

Liu, Runjiao & Jiang, Difei & Shi, Lei. (2016). Agent-based simulation of alternative classroom evacuation scenarios. Frontiers of Architectural Research. 5. 10.1016/j.foar.2015.12.002.

Liu, Yuling & Okada, Norio & Takeuchi, Yukiko. (2008). Dynamic Route Decision Model-based Multi-agent Evacuation Simulation - Case Study of Nagata Ward, Kobe. Journal of Natural Disaster Science. 28.9198.10.2328/jnds.28.91.

Mas, Erick & Koshimura, Shunichi & Imamura, Fumihiko & Suppasri, Anawat & Muhari, Abdul & Adriano, Bruno. (2015). Recent Advances in Agent-Based Tsunami Evacuation Simulations: Case Studies in Indonesia, Thailand, Japan and Peru. Pure and Applied Geophysics. 172. 10.1007/s00024-015-1105-y.

Mas, Erick & Suppasri, Anawat & Koshimura, Shunichi & Imamura, Fumihiko. (2012). Agent based simulation of the 2011 Great East Japan Earthquake Tsunami evacuation procedure. Introduction to an integrated model of tsunami inundation and evacuation. Journal of Natural Disaster Science. 34.4157.10.2328/jnds.34.41.

Mls, Karel & Kořínek, Milan & Štekerová, Kamila & Tucnik, Petr & Bureš, Vladimír & Čech, Pavel & Husakova, Martina & Mikulecky, Peter & Nacházel, Tomáš & Ponce, Daniela & Zanker, Marek & Babic, Frantisek & Triantafyllou, Ioanna. (2022). Agent-based models of human response to natural hazards: systematic review of tsunami evacuation. Natural Hazards. 10.1007/s11069-022-05643-x.

Mun, Johnathan. (2008). Advanced Analytical Models: Over 800 Models and 300 Applications from Basel II Accords to Wall Street and Beyond.

Naylor, Thomas & Balintfy, Joseph & Burdick, Donald & CHU, Kong. 1917 "Computer Simulation Techniques", New York:

John Wiley and Sons, 1966

Nazir, Md & Razi, K & Hossain, Quazi & Adhikary, Sajal. (2014). Pedestrian Flow Characteristics at Walkways in Rajshahi Metropolitan City of Bangladesh.

Taft, Darryl. Python Slithers into Systems. Eweek. 2007. Disponível em: <

<https://www.eweeek.com/development/python-slithers-into-systems/>>. Acesso em 2 janeiro 2023

Queirós, M. (2009) – Riscos e Ordenamento do Território: Prometeus ou Conhecimento e Partilha.

Revista do Conselho Nacional de Planeamento de Emergência, Lisboa, 21: 20 - 28.

Quintino, Júlio (1970). O Sismo De 28 de fevereiro de 1969. Sep. Bol. Lab. Mineralógico e Geológico Fac. Ciências, 11. p 265-292.

Roan, T. (2014). Developing an agent-based evacuation simulation model based on the study of human behaviour in fire investigation reports.

- Röser, F. A Cognitive Observer-Based Landmark-Preference Model. *Künstl Intell* 31, 169–171 (2017).
<https://doi.org/10.1007/s13218-016-0475-3>
- Runjiao Liu, Difei Jiang, Lei Shi, Agent-based simulation of alternative classroom evacuation scenarios, *Frontiers of Architectural Research*, Volume 5, Issue 1, 2016, Pages 111-125.
- Sánchez, Jesús & Carrera, Álvaro & Iglesias, Carlos & Serrano, Emilio. (2016). A Participatory Agent-Based Simulation for Indoor Evacuation Supported by Google Glass. *Sensors*. 16. 1360. 10.3390/s16091360.
- Santos, Angela & Fonseca, Nuno & Queirós, Margarida & Zêzere, José & Bucho, José. (2017). Implementation of Tsunami Evacuation Maps at Setubal Municipality, Portugal. *Geosciences*. 7. 116.10.3390/geosciences7040116.
- Santos, Angela & Queirós, Margarida & Montecchiari, Gabriele. (2018). Evacuation Exercises and Simulations Toward Improving Safety at Public Buildings. 10.1007/978-3-319-65687-8_3.
- Santos, Angela & Sousa, Nuno & Kremers, Horst & Bucho, José. (2020). Building Resilient Urban Communities: The Case Study of Setubal Municipality, Portugal. *Geosciences*. 10.243.10.3390/geosciences10060243.
- Setúbal Município Participado, 2022. Disponível em: < <https://www.mun-setubal.pt/praias/#1529073263860e4d7ad8c-36b7>> Acesso em: setembro de 2022
- Siyam, Nur & Alqaryouti, Omar & Abdallah, Sherief. (2019). Research Issues in Agent-Based Simulation for Pedestrians Evacuation. *IEEE Access*. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2019.2956880.
- Sohn, Samuel & DeStefani, Serena & Kapadia, Mubbasir. (2018). Dynamic cognitive maps for agent landmark navigation in unseen environments. 1-6. 10.1145/3274247.3274518.
- Song, Ha & Lee, Jun. (2015). Finding a simple probability distribution for human mobile speed. *Pervasive and Mobile Computing*. 25. 10.1016/j.pmcj.2015.10.015.
- Stern, Roni. (2019). Multi-Agent Path Finding – An Overview. 10.1007/978-3-030-33274-7_6.
- Ullmann, Manuel & Bauer, Christina & Schwappach, Florin & Ludwig, Bernd. (2016). The path of least resistance: Calculating preference adapted routes for pedestrian navigation. *KI - Künstliche Intelligenz*. 10.1007/s13218-016-0472-6.
- Uno, Keisuke, Kashiyama, Kazuo. (2008) Development of Simulation System for the Disaster Evacuation Based on Multi-Agent Model Using GIS, *Tsinghua Science & Technology*, Volume 13, Supplement 1, 2008, Pages 348353, ISSN 1007-0214
- Varela, João. Simulação Multiagente de Tráfego Rodoviário com Base em Mecanismo de Reserva e com ligação a SIG. Tese (Mestrado em Engenharia Informática) - ISCTE-IUL. Lisboa, p. 73. 2011.
- Wang, Boyu & Hess, Vincent & Crooks, Andrew. (2022). Mesa-Geo: A GIS Extension for the Mesa Agent Based Modeling Framework in Python. 10.1145/3557989.3566157.
- Wang, Haizhong & Mostafizi, Alireza & Cramer, Lori & Cox, Dan & Park, Hyoungsu. (2015). An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: Decision-making and life safety. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 64. 10.1016/j.trc.2015.11.010.
- What is Geospatial Technology. Bronx Community College, 2018. Disponível em < <http://www.bcc.cuny.edu/academics/geospatialcenterofthecunycrestinstitute/whatisgeospatialtechnolo>

>. Acesso em agosto de 2022.

What is Geospatial Technology. GeoSLAM, 2022 Disponível em

<<https://geoslam.com/whatisgeospatialtechnology/>>. Acesso em agosto de 2022.

Wilensky, U. 1999. NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. Evanston, IL

Xue, Zhendan & Bloebaum, Christina. (2008). A Particle Swarm Optimization Based Aircraft Evacuation Simulation Model - VacateAir. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. 10.2514/6.2008-180.

Yang, Yuecheng & Dimarogonas, Dimos & Hu, Xiaoming. (2013). Optimal leader-follower control for crowd evacuation. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. 27692774.10.1109/CDC.2013.6760302.