

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE MATEMÁTICA, ESTATÍSTICA E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**Simulação de mobilidade urbana sob
chuvas extremas**

***O impacto de alagamentos na região
central de São Paulo***

Maysa Cristina Claudino da Silva

MONOGRAFIA FINAL

MAC 499 — TRABALHO DE
FORMATURA SUPERVISIONADO

Supervisor: Prof. Dr. Fabio Kon

São Paulo
2025

*O conteúdo deste trabalho é publicado sob a licença CC BY 4.0
(Creative Commons Attribution 4.0 International License)*

Resumo

Maysa Cristina Claudino da Silva. **Simulação de mobilidade urbana sob chuvas extremas: O impacto de alagamentos na região central de São Paulo.** Monografia (Bacharelado). Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2025.

O município de São Paulo sofre recorrentemente com alagamentos que impactam severamente a mobilidade urbana, um cenário agravado pelas mudanças climáticas. Compreender o aumento desses impactos é essencial para a gestão pública, mas faltam ferramentas que automatizem a relação entre dados pluviométricos e o comportamento do tráfego viário. Este trabalho propõe a extensão do simulador InterSCSimulator para integrar dados de chuva e alagamentos, permitindo a interdição dinâmica de vias e a redução de velocidade dos veículos conforme a intensidade da precipitação. As simulações realizadas na região central demonstraram que, embora o aumento na distância percorrida seja pequeno devido à conectividade da malha, o tempo de viagem sofre acréscimos significativos, chegando a quase 15% no período vespertino. Observou-se também que a localização e o momento da chuva são fatores tão críticos quanto o volume total precipitado. A ferramenta desenvolvida se mostrou eficaz para quantificar os efeitos de eventos climáticos, oferecendo apoio técnico para o planejamento de uma cidade mais resiliente.

Palavras-chave: Cidades inteligentes. Mobilidade urbana. Simulação de tráfego. Alagamentos. Chuvas extremas.

Abstract

Maysa Cristina Claudino da Silva. **Urban mobility simulation under extreme rainfall: *The impact of flooding in the central region of São Paulo***. Capstone Project Report (Bachelor). Institute of Mathematics Statistics and Computer Science, University of São Paulo, São Paulo, 2025.

The city of São Paulo frequently suffers from floods that severely impact urban mobility, a scenario amplified by climate change. Understanding the increase of these impacts is essential for public management, however, there is a lack of tools that automate the relationship between rainfall data and traffic behavior. This work proposes an extension of the InterSCSimulator to integrate rainfall and flooding data, enabling dynamic street closures and vehicle speed reduction according to precipitation intensity. Simulations carried out in the central region demonstrated that, while the increase in traveled distance is minor due to the road network connectivity, travel times increase significantly, reaching nearly 15% in the afternoon period. It was also observed that the location and timing of the rainfall are factors as critical as the total volume of precipitation. The developed tool proved effective in quantifying the effects of climate events, offering technical support for planning a more resilient city.

Keywords: Smart cities. Urban mobility. Traffic simulation. Floods. Extreme rainfall.

Lista de figuras

3.1	Registros de alagamentos por km ² nas subprefeituras de São Paulo. . . .	9
3.2	Comparação das ocorrências de alagamentos entre as subprefeituras São Miguel e Sé.	10
3.3	Região de simulação: Zona Central de São Paulo ampliada.	11
3.4	Correlação de pluviometria entre o CGE e o INMET	13
3.5	Média de chuva nas 5 horas anteriores e posteriores ao início da interdição por alagamento	14
3.6	Distribuição da duração de alagamentos registrados pela CET em 2023 .	15
3.7	Fluxo de processamento dos dados para o InterSCSimulator.	16
4.1	Redução de velocidade e capacidade em função da pluviometria	19
4.2	Fluxo de interdição de ruas na simulação.	19
5.1	Cenários de chuva nos picos da manhã e tarde para diferentes intensidades.	22
5.2	Impacto na velocidade média das viagens afetadas pela chuva.	24
5.3	Impacto no tempo de viagens afetadas pela chuva	25
5.4	Impacto na distância das viagens afetadas pela chuva	26

Lista de tabelas

3.1	Fontes de dados utilizadas no trabalho.	8
3.2	As cinco subprefeituras com mais ocorrências de alagamento.	9
3.3	Total de viagens diárias produzidas e atraídas nas regiões analisadas. . .	10
3.4	Interpretação dos coeficientes de correlação de Pearson	12
3.5	Porcentagem de eventos com chuva relevante por intervalo de tempo . .	15
5.1	Médias de viagens em um dia sem chuva	23
5.2	Velocidade média das viagens afetadas pela chuva	23
5.3	Tempo médio das viagens afetadas pela chuva	25
5.4	Distância das viagens afetadas pela chuva	26

Sumário

1	Introdução	1
2	O cenário do estudo	3
2.1	Fenômenos hidrológicos	4
2.2	Drenagem urbana e alagamentos	4
3	Análise e tratamento dos dados	7
3.1	Origem dos dados	7
3.2	Análise inicial	8
3.3	Construção dos arquivos de entrada	11
3.3.1	Chuvas e capacidade das vias	13
4	O InterSCSimulator	17
4.1	A Gestão de Eventos de Trânsito	17
4.2	A Modelagem de Eventos Pluviométricos	18
5	Resultados	21
5.1	Validação do Cenário Base	21
5.2	Impacto na Velocidade Média	23
5.3	Impacto no Tempo de Viagem	24
5.4	Impacto na Distância Percorrida	25
6	Conclusão	27
	Referências	29

Capítulo 1

Introdução

O conceito de Cidades Inteligentes surge como uma resposta estratégica aos desafios do crescimento urbano global. O objetivo principal dessas iniciativas é melhorar a qualidade de vida dos cidadãos, promovendo um desenvolvimento inclusivo e resiliente para garantir que as necessidades atuais sejam atendidas de forma sustentável.

Nesse contexto, o município de São Paulo, centro da Região Metropolitana, apresenta uma alta densidade populacional e uma infraestrutura complexa. A metrópole lida historicamente com chuvas intensas, concentradas principalmente no verão. No entanto, a vulnerabilidade da cidade a desastres hidrológicos, como alagamentos, é agravada por fatores humanos, como a impermeabilização do solo e o planejamento urbano.

Essa condição impacta diretamente a mobilidade urbana. Durante eventos de precipitação extrema, o deslocamento de pessoas e veículos é consideravelmente dificultado, o que gera prejuízos econômicos e sociais. As consequências mais visíveis são a interdição de vias importantes e o aumento dos congestionamentos, paralisando a rotina da cidade.

Para que gestores públicos e pesquisadores possam desenvolver estratégias eficazes contra esses desastres, é fundamental compreender não apenas onde os problemas ocorrem, mas como eles se propagam pela malha urbana. Nesse cenário, a simulação computacional possui um papel essencial, pois permite a análise de situações hipotéticas sem os riscos e custos de intervenções no mundo real. Contudo, para simular múltiplos cenários de mudanças climáticas em uma metrópole como São Paulo, são necessários mecanismos automatizados. Esses mecanismos devem processar grandes volumes de dados para que a malha viária reaja às condições do tempo de uma forma próxima à realidade.

Para viabilizar a análise desses cenários complexos, este trabalho utiliza o InterSCSimulator, um simulador de cidades inteligentes de código aberto projetado para executar simulações em larga escala (SANTANA, LAGO *et al.*, 2017). A ferramenta destaca-se pela capacidade de modelar milhares de agentes (como veículos e pedestres) interagindo em uma malha viária realista, permitindo o estudo de problemas de mobilidade urbana.

Trabalhos anteriores expandiram as capacidades do InterSCSimulator. DEL ESPOSTE *et al.* (2019), por exemplo, introduziu mecanismos para a criação de eventos de trânsito, permitindo a modelagem de interdições de vias ou a redução da capacidade de tráfego

em trechos específicos. Essa contribuição forneceu a base técnica necessária para simular obstruções dinâmicas na cidade.

O objetivo deste trabalho é utilizar esse ferramental existente e expandir o InterSCSimulador para simular, de forma automatizada, os efeitos da chuva na mobilidade urbana. A solução proposta consiste no desenvolvimento de módulos capazes de ler e processar arquivos com informações pluviométricas e dados da malha viária, traduzindo a chuva acumulada em bloqueios de vias dentro da simulação.

Para validar essa abordagem, serão simulados diferentes níveis de chuva na região central da cidade de São Paulo. O estudo utiliza o processamento de dados históricos reais provenientes de instituições oficiais, como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a Defesa Civil e a Companhia de Engenharia de Tráfego (CET). Isso garante que a simulação reflita as condições climáticas reais da metrópole. Adicionalmente, serão explorados cenários hipotéticos de condições extremas, permitindo avaliar o comportamento da mobilidade diante de eventos críticos que superam os registros históricos.

Os resultados obtidos confirmam a capacidade da ferramenta estendida em representar cenários de crise climática. As simulações permitiram quantificar o impacto dos alagamentos na mobilidade urbana, evidenciando como diferentes volumes de chuva afetam diretamente o tempo de viagem e a velocidade dos veículos na região central. Os códigos-fonte e scripts de tratamento de dados desenvolvidos estão disponíveis na página web desse trabalho.¹ Esses recursos garantem a reprodutibilidade dos experimentos e servir como base para futuras pesquisas na área de Cidades Inteligentes.

O próximo capítulo apresenta contextualiza os fenômenos hidrológicos, as características da drenagem urbana e o impacto histórico dos alagamentos na mobilidade de São Paulo. Na sequência, detalha-se a análise e o tratamento dos dados, definindo o escopo espacial e temporal da simulação e descrevendo a metodologia para construção dos arquivos de entrada a partir de registros oficiais. Posteriormente, apresenta-se o InterSCSimulador, abordando sua arquitetura, o gerenciamento de eventos de trânsito pré-existente e a nova implementação desenvolvida para a modelagem dinâmica de eventos pluviométricos. A seguir, são discutidos os resultados obtidos nos cenários simulados e a análise quantitativa das métricas de impacto na malha viária. Por fim, o texto expõe as conclusões, sintetizando as contribuições da pesquisa, suas limitações e as sugestões para trabalhos futuros.

¹ Disponível em: <https://maysaclaudio.github.io/tcc/>

Capítulo 2

O cenário do estudo

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a cidade de São Paulo alcançou 11,4 milhões de habitantes no censo de 2022, configurando-se como uma megacidade pelo seu porte populacional. Quando considerada a Região Metropolitana, esse número ultrapassa 22 milhões de habitantes, tornando-a a sexta área metropolitana mais populosa do mundo e a maior da América Latina (WORLD POPULATION REVIEW, 2025).

Historicamente, o planejamento urbano paulistano privilegiou o transporte individual em detrimento do transporte coletivo. Segundo NONA (s.d.), a substituição dos bondes elétricos por investimentos na expansão do sistema viário, iniciada no início do século XX, marcou uma mudança de paradigma na mobilidade urbana paulistana. O Plano de Avenidas, elaborado pelo ex-prefeito Prestes Maia na década de 1930, consolidou essa orientação ao priorizar o rodoviarismo e expandir o sistema viário em detrimento da rede de transporte público (ASQUINO, 2009). Atualmente, quase metade das viagens motorizadas realizadas no município são individuais (ZIONI *et al.*, 2024).

O transporte público, por sua vez, vem enfrentando um processo contínuo de precarização. De acordo com ZIONI *et al.* (2024), o tempo médio de deslocamento por transporte coletivo é 2,13 vezes superior ao registrado para o transporte individual. Estima-se que cerca de 5,5 milhões de passageiros sejam transportados diariamente por uma frota de pouco mais de 13 mil ônibus (ZIONI *et al.*, 2024). A superlotação, a irregularidade nos horários e o custo elevado das tarifas têm incentivado a migração para o transporte individual motorizado, o que agrava os congestionamentos e intensifica a lotação do sistema viário urbano.

A construção de um sistema de mobilidade resiliente é essencial para assegurar a continuidade das atividades econômicas e sociais mesmo diante de eventos extremos. Conforme apontam M. F. d. SILVA *et al.* (2024), a resiliência da mobilidade urbana envolve a capacidade de resistir, absorver e se recuperar de perturbações, garantindo o funcionamento mínimo dos sistemas de transporte. Essa resiliência pode ser fortalecida por meio da integração de tecnologias de monitoramento e previsão de desastres em tempo real (M. F. d. SILVA *et al.*, 2024). Nesse sentido, iniciativas que analisam o efeito dos alagamentos sobre a mobilidade, como este trabalho, contribuem diretamente oferecendo subsídios

técnicos para a gestão urbana.

2.1 Fenômenos hidrológicos

No contexto urbano, é importante diferenciar enchentes, inundações e alagamentos. Segundo [V. C. d. SILVA \(2002\)](#), as enchentes resultam do aumento natural da vazão de cursos d'água após chuvas intensas. Já de acordo com o [CEMADEN \(2016\)](#), as inundações ocorrem quando os rios transbordam e atingem áreas que não são usualmente submersas, enquanto os alagamentos decorrem da incapacidade do sistema de drenagem urbana de escoar o volume precipitado, fazendo com que a água se acumule em vias e calçadas

São Paulo foi construída sobre e ao redor dos rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí, cujas várzeas eram naturalmente sujeitas a inundações sazonais. A canalização desses cursos d'água e a urbanização intensa modificaram profundamente o regime hidrológico da região, restringindo o espaço natural de escoamento das águas e aumentando a frequência dos alagamentos. A impermeabilização do solo e o descarte inadequado de resíduos sólidos reduzem a infiltração e obstruem o sistema de drenagem, potencializando o acúmulo de água nas vias.

Áreas altamente impermeabilizadas, com excesso de concreto e pouca vegetação, favorecem a formação de tempestades de verão, precipitações de curta duração e alta intensidade. Chuvas extremas correspondem a precipitações que se afastam significativamente da média ou da condição climática de referência. Desde os anos 2000, esses episódios intensos têm ocorrido com frequência cada vez maior ([COLL, 2020](#)).

As mudanças climáticas globais estão diretamente relacionadas ao aumento da ocorrência de chuvas extremas. O aquecimento global intensifica a capacidade da atmosfera de reter umidade, resultando em precipitações mais volumosas e concentradas em curtos períodos. O relatório do Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas (IPCC) aponta que, para cada aumento de 1°C na temperatura média global, a intensidade das precipitações extremas diárias pode aumentar em até 7% ([IPCC, 2021](#)). Assim, projeta-se uma tendência de intensificação desses eventos ao longo das próximas décadas.

2.2 Drenagem urbana e alagamentos

A infraestrutura de drenagem paulistana é insuficiente para o volume atual de precipitações. No centro expandido, as galerias pluviais são antigas, estreitas e, muitas vezes, deterioradas ([JACOBI, 2000](#)). O acúmulo de resíduos sólidos e o entupimento de bocas de lobo reduzem ainda mais a capacidade de escoamento, resultando em alagamentos mesmo em chuvas de baixa intensidade.

Segundo [V. C. d. SILVA \(2002\)](#), o volume anual de chuvas na cidade de São Paulo apresentou um aumento gradual ao longo do século XX, passando de aproximadamente 1.300 mm/ano para cerca de 1.500 mm/ano na década de 1990, com registros que eventualmente ultrapassaram 2.000 mm/ano em anos posteriores. Entre 2005 e 2019, o CGE registrou aproximadamente 15 mil pontos de alagamento no município, com concentração nas marginais Tietê e Pinheiros e nos na região central ([CARVALHO, 2021](#)).

Desde o século XIX, políticas públicas voltadas ao controle de cheias e saneamento foram implementadas para viabilizar a expansão urbana. O Plano de Avenidas transformou os fundos de vale em eixos viários, subordinando os cursos d'água à lógica do tráfego veicular. Mais recentemente, planos como o Plano Diretor de Drenagem e o Plano Municipal de Redução de Riscos buscaram mitigar os impactos das inundações com obras estruturais, como piscinões, e com soluções baseadas na natureza (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2025). No entanto, a fragmentação institucional e a predominância do paradigma rodoviarista ainda dificultam uma gestão integrada e sustentável das águas urbanas.

Os alagamentos urbanos têm como consequência imediata a interrupção parcial ou total do tráfego, provocando congestionamentos e comprometendo a mobilidade. Vias importantes da capital podem permanecer interditadas por horas, afetando o acesso a serviços e a atividades econômicas. A redução da capacidade viária decorre tanto do acúmulo físico de água nas pistas quanto do comportamento dos motoristas, que tendem a reduzir a velocidade e aumentar a distância de segurança (CARDOSO, 2019). Segundo CARDOSO (2019), a densidade da capacidade viária pode diminuir em até 11% durante eventos de chuva intensa. Os bloqueios em vias estratégicas, como as marginais Tietê e Pinheiros, produzem efeitos em cascata, sobrecarregando as rotas alternativas e gerando congestionamentos generalizados.

A interação entre urbanização, mobilidade e dinâmica hidrológica evidencia que os alagamentos em São Paulo não são fenômenos isolados, mas o resultado de um conjunto de fatores estruturais, históricos e climáticos. Compreender esse contexto é fundamental para estabelecer os principais fatores que condicionam a ocorrência de alagamentos e seu impacto sobre a circulação urbana.

Capítulo 3

Análise e tratamento dos dados

São Paulo, a maior metrópole da América Latina, apresenta diariamente um fluxo intenso e complexo de deslocamentos urbanos. Este capítulo tem como objetivo definir o escopo espacial e temporal adotado para a simulação da mobilidade urbana na cidade, buscando reduzir a complexidade inicial do estudo. O foco está na observação das ocorrências de alagamento e na sua relação com os índices pluviométricos correspondentes. Além de delimitar a região de interesse, o tratamento dos dados foi essencial para identificar quais informações são relevantes ao simulador e como elas devem ser estruturadas. As seções seguintes descrevem a origem dos dados, as análises realizadas e o processo de organização das informações para a etapa de simulação.

3.1 Origem dos dados

Para simular a mobilidade urbana em cenários de alagamento precisamos analisar algumas informações cruciais: as ocorrências de alagamentos dos últimos anos, o histórico de pluviometria, as viagens realizadas pelos cidadãos e a rede viária da cidade. A Tabela 3.1 resume as fontes de dados utilizadas nesse trabalho e suas páginas de acesso.

A plataforma GeoSampa disponibiliza para download o histórico das ocorrências de alagamentos registradas pela Defesa Civil desde 2013. A Companhia de Engenharia de Tráfego (CET) também forneceu o seu histórico de pontos de alagamentos a partir do ano de 2006 até novembro de 2024. O conjunto dessas fontes foram usadas para obter o momento e a localização de alagamentos passados.

Para obter informações dos eventos climáticos que provocaram os alagamentos, foram coletados os registros pluviométricos da estação automática A701 São Paulo - Mirante do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada na subprefeitura Santana-Tucuruvi, zona norte da capital. O Banco de Dados do INMET fornece os dados coletados a cada hora pela estação desde o ano de 2000. Para informações mais específicas de cada região, foram utilizados os dados do Boletim Pluviométrico do Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas (CGE) que fornece a pluviometria diária de cada subprefeitura desde 2010.

Apesar dos registros fornecidos pela CET começarem em 2006, as coordenadas geográficas dos eventos começaram a ser registradas apenas em 2018. Nos anos anteriores foi salvo apenas o nome da via e uma referência por escrito do local afetado. Assim, considerando esse fator e a intersecção dos períodos das fontes, os dados analisados e utilizados na simulação contemplam o intervalo de janeiro de 2018 à novembro de 2024.

A Pesquisa Origem Destino, também chamada de Pesquisa OD, realizada pela Companhia do Metropolitano de São Paulo reflete os padrões de deslocamento das pessoas na Região Metropolitana de São Paulo. As mais de 21 milhões de viagens diárias que população passou a realizar após o impacto da pandemia da Covid-19, foram refletidas na Pesquisa OD de 2023. Devido a sua atualidade, essa versão da pesquisa foi utilizada para representar a mobilidade urbana nesse trabalho.

A rede viária da cidade de São Paulo foi obtida através do OpenStreetMap, um projeto de distribuição informações geográficas do mundo todo. Os dados são mantidos pela própria comunidade e abertos para qualquer pessoa.

Com as fontes de dados consolidadas e o período definido, passou-se à etapa de análise exploratória, buscando identificar padrões espaciais e temporais relevantes para o experimento de simulação.

Fonte dos Dados	Descrição	Página web
GeoSampa	Ocorrências de alagamentos registradas pela Defesa Civil desde 2013.	Portal GeoSampa
Companhia de Engenharia de Tráfego (CET)	Pontos de alagamentos registrados entre 2006 e novembro de 2024.	Não estão publicados na web.
Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)	Registros pluviométricos horários da estação automática A701 (São Paulo - Mirante) desde o ano de 2000.	Banco de Dados Meteorológicos do INMET
Centro de Gerenciamento de Emergências Climáticas (CGE)	Pluviometria diária para cada subprefeitura de São Paulo desde 2010.	Boletim Pluviométrico CGESP
Pesquisa Origem-Destino (Pesquisa OD) 2023	Viagens diárias na Região Metropolitana de São Paulo.	Portal da Pesquisa OD (Metrô)
OpenStreetMap	Mapa da rede viária (ruas, avenidas, etc.) da cidade de São Paulo.	Portal OpenStreetMap

Tabela 3.1: Fontes de dados utilizadas no trabalho.

3.2 Análise inicial

Nessa primeira etapa, foram analisados os dados obtidos das fontes mencionadas anteriormente a fim de compreender o comportamento de alagamentos na cidade e identificar

regiões com sobreposição significativa entre ocorrências de alagamentos e viagens. A partir desse estudo é possível definir a área de foco do trabalho e construir heurísticas acerca dos parâmetros temporais necessários para simular os cenários de chuva e alagamentos.

O mapa da Figura 3.1 mostra a densidade dos registros de ocorrências de alagamentos por km² nas subprefeituras de São Paulo. A ferramenta Leaflet foi usada para montar os mapas ilustrados nessa seção. A versão interativa dos mapas, incluindo os mapas específicos de cada ano, pode ser acessada na página web desse trabalho.¹

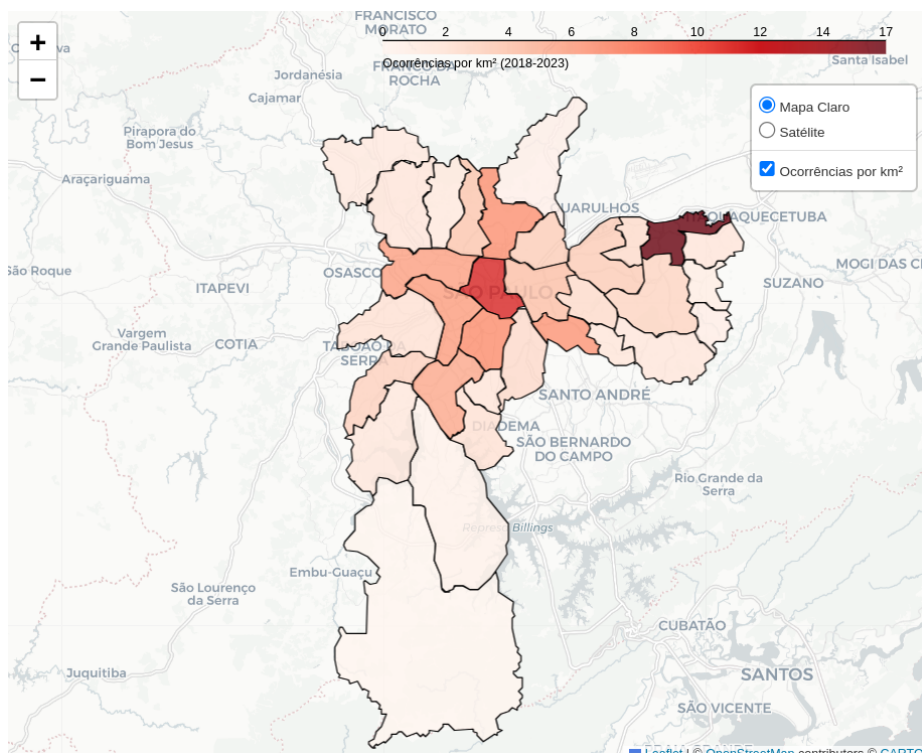


Figura 3.1: Registros de alagamentos por km² nas subprefeituras de São Paulo.

A Tabela 3.2 contém os valores numéricos das cinco subprefeituras com mais ocorrências de alagamento no período analisado.

Subprefeitura	Total de eventos	Eventos por km ²
Sé	312	11,70
São Miguel	432	16,52
Santana-Tucuruvi	225	6,29
Lapa	225	5,54
Santo Amaro	192	5,09

Tabela 3.2: As cinco subprefeituras com mais ocorrências de alagamento.

Observamos que as regiões da Sé e de São Miguel apresentam um número de alagamentos mapeados significativamente maior que o das demais regiões da capital. No entanto, as duas apresentam características distintas.

¹ Disponível em: <https://maysaclaudino.github.io/tcc/mapas-analise-inicial/>

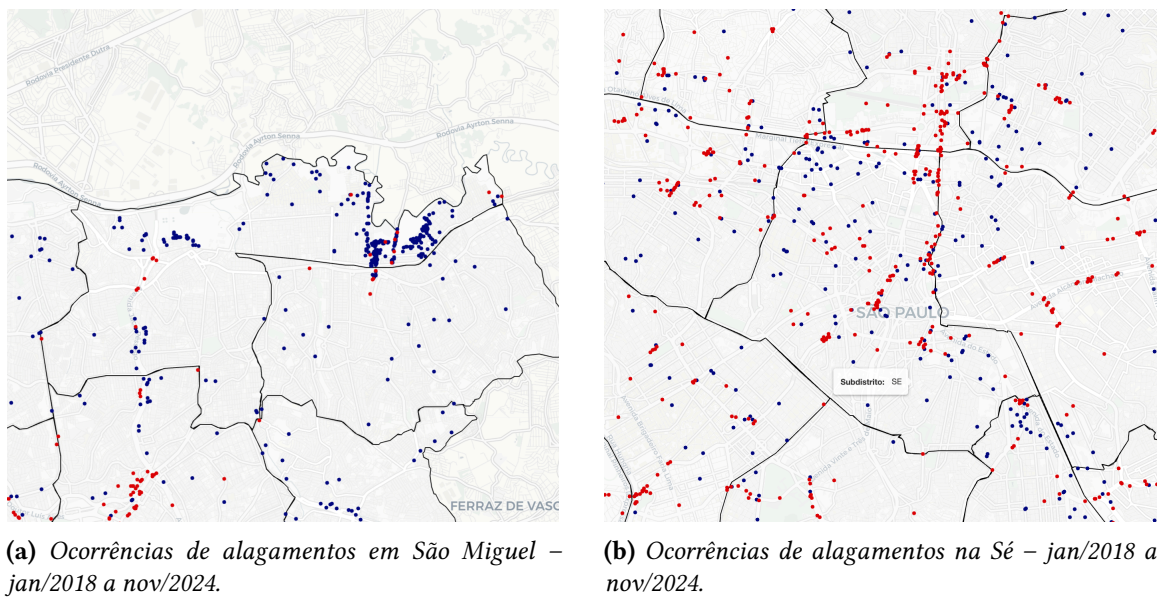


Figura 3.2: Comparação das ocorrências de alagamentos entre as subprefeituras São Miguel e Sé.

São Miguel, no extremo leste da capital, apresenta o maior número de alagamentos, embora esses eventos se concentrem em poucos pontos, sem grande dispersão pela região. Segundo a Pesquisa OD de 2023, a região registra cerca de 1,2 milhão viagens produzidas e atraídas diariamente. Já a Sé contabiliza quase 3,3 milhões de viagens, refletindo o papel central que exerce na rede de mobilidade da cidade. Além das viagens com origem ou destino na própria subprefeitura, muitas outras atravessam a região, conectando diferentes zonas da capital.

No banco de dados da Pesquisa OD, a região da Sé está classificada como parte da Zona Central da cidade. Essa zona inclui também áreas das subprefeituras de Pinheiros, Mooca, Lapa e Vila Mariana. Por esse motivo, a análise e a simulação consideram as ocorrências de alagamentos e as viagens de toda essa região ampliada, ilustrada na Figura 3.3. Essa ampliação é vantajosa, pois inclui não apenas as viagens que começam ou terminam na Sé, mas também aquelas que atravessam a subprefeitura, oferecendo uma visão mais completa do impacto dos alagamentos sobre a mobilidade central da cidade. A Pesquisa OD 2023 indica que essa área produz e atrai mais de 12,4 milhões de viagens, reforçando seu papel central na mobilidade paulistana.

Região	Total de viagens
São Miguel	1.221.454
Sé	3.291.606
Centro ampliado	12.429.227

Tabela 3.3: Total de viagens diárias produzidas e atraídas nas regiões analisadas.

A Zona Central de São Paulo concentra uma grande diversidade de vias e modais de transporte (avenidas, ruas, ciclovias, linhas de metrô e corredores de ônibus) e também abriga parte significativa da atividade econômica da capital, com forte presença de comércio, serviços e equipamentos públicos. Essa combinação faz da Sé uma região estratégica

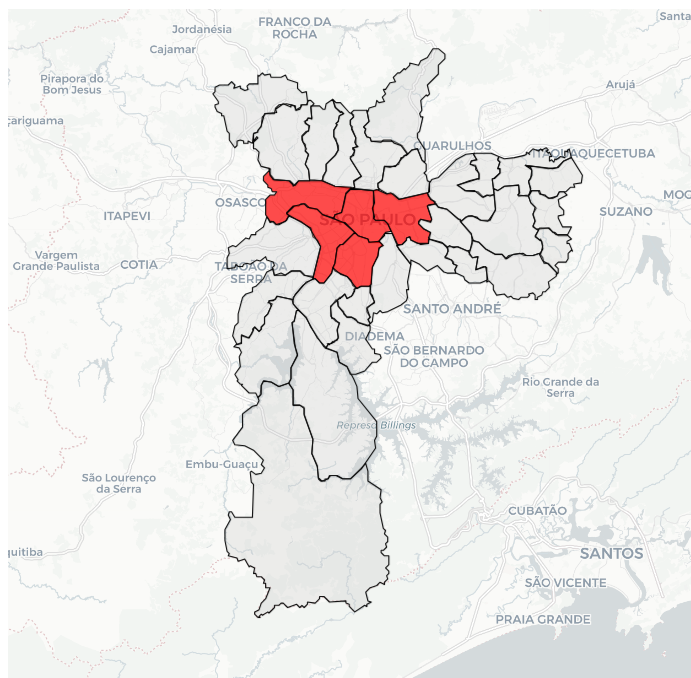


Figura 3.3: Região de simulação: Zona Central de São Paulo ampliada.

para a análise da relação entre alagamentos e mobilidade urbana. Apesar dessa diversidade de meios de transporte que existem na região, o presente trabalho considera apenas as viagens realizadas por automóvel. Essa escolha tem como objetivo simplificar a modelagem inicial no simulador e concentrar a análise nos efeitos diretos dos alagamentos sobre o tráfego viário.

3.3 Construção dos arquivos de entrada

Nessa seção, descrevemos como os dados introduzidos anteriormente foram manipulados e organizados de forma que o InterSCsimulador pudesse ler e trabalhar as informações. Com esse objetivo, a solução desenhada é composta de um arquivo `rain.csv` que detalha a quantidade de precipitação ao decorrer do período da simulação e um outro arquivo `roads-rain-capacity.csv` que detalha a capacidade pluviométrica comportada pelas vias do mapa. Esse segundo, é feito a partir do cruzamento dos registros de alagamentos com os registros de pluviometria. As Listagens 3.1 e 3.2 exemplificam o formato desses arquivos, que serão explicados adiante.

```
1;1.8
3600;1.2
7200;1.0
10800;24.8
14400;25.4
18000;11.6
```

Listagem 3.1: Exemplo de um arquivo `rain.csv`.

CV EVARISTO COMOLATTI;3595;2390993860;2225397467;27.4
R ROCHA;7643;4350117963;4350117967;33.0
MARGINAL TIETE CENTRAL;9510;25876617;25876402;33.8

Listagem 3.2: *Exemplo de um arquivo roads-rain-capacity.csv.*

Como mencionado anteriormente, o CGE fornece a milimetragem diária de chuva de cada subprefeitura. Essa granularidade em específico comprometeria tanto a precisão e veracidade dos valores de capacidade das vias, quanto impossibilitaria de realizar uma simulação mais realista. Isso porque uma chuva constante ao longo de várias horas ou um temporal momentâneo podem gerar a mesma quantidade de chuva ao fim do dia. Também, dependendo do momento do dia, a chuva pode ter impactos diferentes na mobilidade urbana, o relatório da Pesquisa OD mostra que às 17h o número de viagens iniciadas da RMSP mais que triplica em relação às 10h.

Os dados do INMET possuem granularidade horária, o que soluciona as questões apresentadas acima. Contudo, a estação meteorológica do INMET está localizada em Santana-Tucuruvi, a aproximadamente 7 km da da subprefeitura da Sé. Devido a distância, nessa etapa, verificamos a viabilidade de usar os registros do INMET no decorrer do desenvolvimento do trabalho.

O mapa da Figura 3.4, ilustra o coeficiente de correlação de Pearson² calculado entre os dados de pluviometria do CGE de cada subprefeitura e a soma diária dos dados da estação do INMET. Os dados usados abrangem o período de janeiro de 2018 a novembro de 2024, em dias em que pelo menos uma das estações registrou pluviometria. O coeficiente de Pearson varia de 0 a 1, conforme a Tabela 3.4 obtida de SCHÖBER *et al.*, 2018.

Coeficiente de Pearson	Interpretação
0,00 – 0,09	Correlação insignificante
0,10 – 0,39	Correlação fraca
0,40 – 0,69	Correlação moderada
0,70 – 0,89	Correlação forte
0,90 – 1,00	Correlação muito forte

Tabela 3.4: *Interpretação dos coeficientes de correlação de Pearson*

É possível observar que as subprefeituras mais próximas à estação do INMET apresentam maiores coeficientes de correlação. Conforme esperado, Santana-Tucuruvi tem o maior valor 0,82, uma correlação forte. Dessa forma, a comparação e o uso das duas fontes de dados faz sentido principalmente nas regiões próximas à estação do INMET. Em particular, temos interesse na subprefeitura da Sé cujo coeficiente é 0,74, também considerado uma correlação forte.

Como a pluviometria horária evidencia com mais precisão os eventos de chuvas e alagamentos do que a pluviometria diária e os históricos do INMET e CGE possuem uma forte correlação para a Sé, justifica-se usar os dados do INMET como referência nas etapas posteriores.

² O coeficiente de correlação de Pearson mede a intensidade e a direção da relações linear entre variáveis.

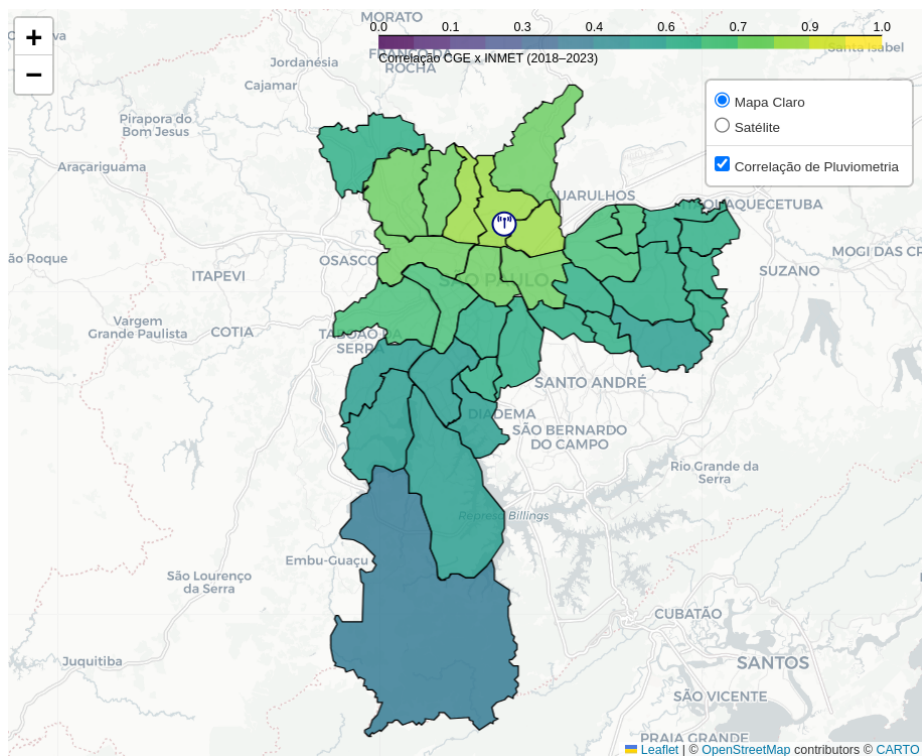


Figura 3.4: Correlação de pluviometria entre o CGE e o INMET

3.3.1 Chuvas e capacidade das vias

Inicialmente, devemos disponibilizar ao InterSCSimulator a série temporal de volumes de chuva que servirá de base para a simulação. Isso é feito passando um arquivo de entrada no formato csv com essa descrição, chamado aqui de `rainfall.csv`. A primeira coluna desse arquivo corresponde a quantos segundos se passaram desde o início da simulação e a segunda coluna descreve a pluviometria em milímetros do intervalo de tempo entre a sua entrada e a anterior.

A Listagem 3.1 descreve a pluviometria horária em 5 horas de simulação. O arquivo `rainfall.csv` foi gerado a partir de um script em Python implementado especificamente para processar os dados brutos do INMET e convertê-los para o formato aceito pelo simulador.

Além desse arquivo, o simulador também requer um arquivo `trips.xml`, responsável por descrever as viagens que ocorrem durante a simulação. Esse arquivo já era parte do conjunto de entradas padrão do InterSCSimulator. Para gerar um novo `trips.xml` com as viagens da região de análise, foi desenvolvido o script `pesquisaOD-to-trips.xml.ipynb`, que utiliza como entrada o banco de dados da Pesquisa OD e o grafo da cidade (`map.xml`, do OpenStreetMap). O script filtra as viagens que possuem origem ou destino dentro da região estudada, identifica os nós correspondentes no grafo e constrói o arquivo `trips.xml` no formato esperado pelo simulador. Cada viagem registrada nesse arquivo contém o nó de origem, o nó de destino, o identificador da aresta de origem, a quantidade de viagens representadas por aquela entrada e o horário de início da viagem.³

³ Os scripts estão disponíveis em <https://maysaclaudio.github.io/tcc/>

Agora, precisamos informar a simulação em relação a capacidade pluviométrica das vias para acionar o efeito de alagamento nela no momento adequado (explicado na Seção 4.1). Procura-se obter a partir das fontes de dados um limite de pluviometria para cada via que quando ultrapassado, a via em questão é alagada.

A meteorologista do INMET Marlene Real disse, em entrevista ao Portal Multiplix (M. OLIVEIRA, 2021), que a intensidade da chuva está relacionada ao seu tempo de duração, podendo ser classificada como o seguinte:

- Até 0,1mm/m: chuvisco
- De 0,2mm/h a 9,9mm/h: chuva fraca
- De 10mm/h a 19mm/h: chuva moderada
- De 20mm/h a 60mm/h: chuva forte

A partir dessa especificação, desconsideraremos para a análise subsequente as ocorrências com menos de 5mm de chuva acumulados nas últimas 10 horas anteriores ao evento.

Para definir o limite de pluviometria das vias da região da Sé, analisamos os índices pluviométricos nos horários próximos aos que foram apurados nas ocorrências de alagamentos. Aqui consideramos apenas os registros da CET de 2023, pois são os únicos que dispõem de horário de início e término da interdição.

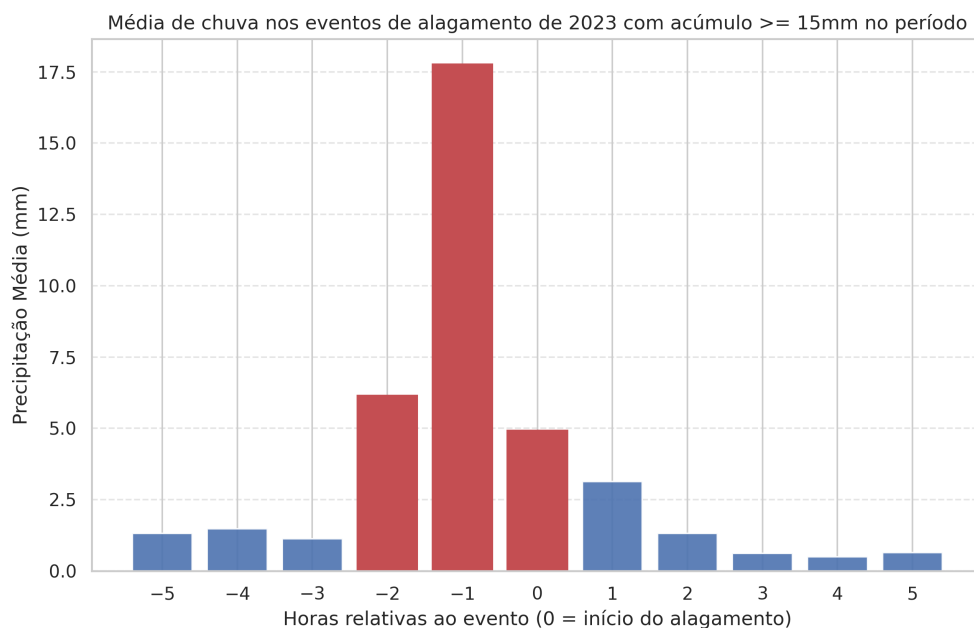


Figura 3.5: Média de chuva nas 5 horas anteriores e posteriores ao início da interdição por alagamento

A Tabela 3.5 traz a relação do momento em que a chuva forte começou em relação ao início do evento de alagamento. A partir dela e do gráfico na Figura 3.5, é razoável escolher para cada evento o volume de chuva acumulado no intervalo da 2ª hora anterior até o horário do evento como o índice de causa do alagamento, já que 71,4% das ocorrências com chuva relevante se incluem nesse período.

Início da chuva forte	Quantidade de eventos
Na hora do evento	5,7%
1ª hora anterior	48,6%
2ª hora anterior	17,1%
3ª hora anterior	1,0%
4ª hora anterior	1,9%
5ª hora anterior	3,8%

Tabela 3.5: Porcentagem de eventos com chuva relevante por intervalo de tempo

Para as vias em que houve alagamentos mas não foram contempladas devido a não terem o registro horário, usaremos como limite de pluviometria o maior valor da soma deslizante de 3 horas no dia da ocorrência. Portanto, a capacidade pluviométrica de uma rua será o menor limite obtido dentre as ocorrências de alagamento observadas.

Além de definir quando uma via deve ser fechada, é necessário estabelecer por quanto tempo ela permanecerá intransitável. Para isso, analisamos o histórico de duração dos alagamentos registrados pela CET em 2023, calculando o intervalo entre o horário de início e o término de cada ocorrência.

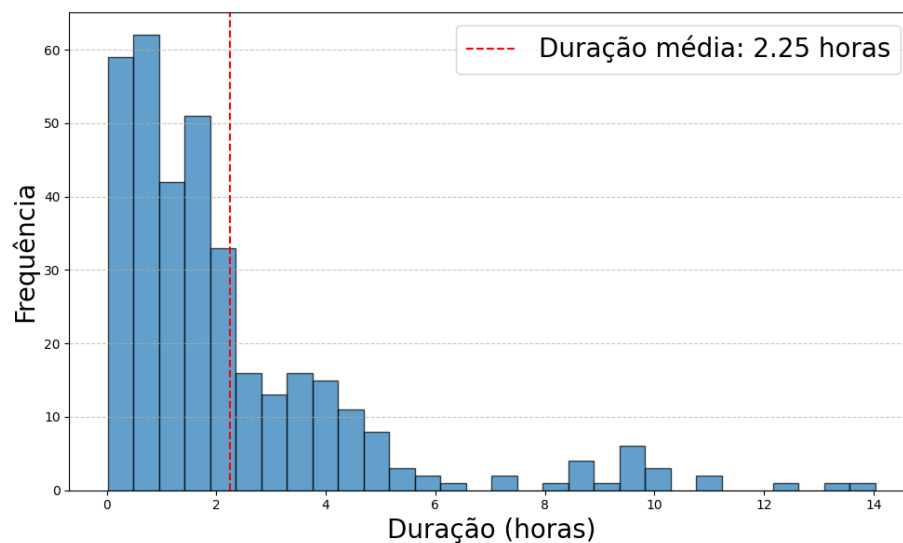


Figura 3.6: Distribuição da duração de alagamentos registrados pela CET em 2023

Com base nessa distribuição da Figura 3.6, definiu-se a duração padrão de 2 horas para os bloqueios gerados na simulação. Essa escolha busca representar o tempo médio necessário para o acúmulo de água, a interrupção do tráfego e o escoamento do sistema de drenagem. Vale ressaltar que, na implementação do simulador, esse tempo pode ser estendido dinamicamente caso a chuva persista, mas as 2 horas iniciais servem como o bloco base para a interdição.

Finalmente, montamos o arquivo `roads-rainfall-capacity.csv` (Listagem 3.2), onde:

- A primeira coluna é o nome da rua. Esse parâmetro não é utilizado na simulação,

mas torna o arquivo mais amigável para seres humanos.

- A segunda coluna é o id da aresta equivalente a via no grafo do mapa.
- A terceira e quarta coluna são os id's dos nós equivalentes ao início e fim da via no grafo do mapa, respectivamente.
- A quinta coluna é a capacidade pluviométrica da via.

Toda aresta não incluída nesse arquivo é tratada como se não alagasse, independentemente da quantidade de chuva. No repositório deste trabalho disponibilizamos o arquivo `roads-rainfall-capacity-se.csv` para as estradas da região da Sé.

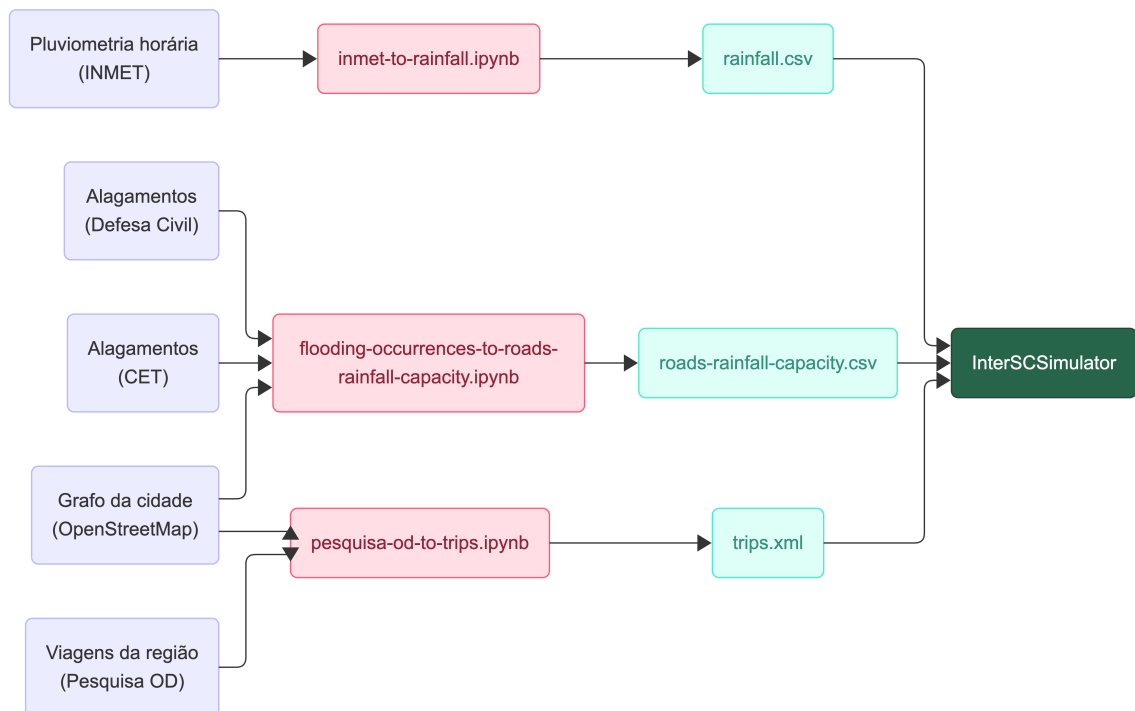


Figura 3.7: Fluxo de processamento dos dados para o InterSCSimulator.

Com todas as informações preparadas — incluindo o volume de chuva processado por meio do arquivo `rainfall.csv` e a definição da capacidade pluviométrica das vias no arquivo `roads-rainfall-capacity.csv` — concluímos a etapa de análise e estruturação dos dados necessários para a simulação. A partir daqui, avançamos para a próxima fase do trabalho, na qual implementamos as adaptações do InterSCSimulator que permitem representar os efeitos dos alagamentos na mobilidade urbana da cidade.

Capítulo 4

O InterSCSimulator

O InterSCSimulator é um simulador de código aberto voltado para Cidades Inteligentes, projetado especificamente para lidar com cenários de grande escala (SANTANA, LAGO *et al.*, 2017). A ferramenta foi desenvolvida para representar a complexidade de um ambiente urbano real, incluindo o tráfego de veículos, o deslocamento de pedestres, o sistema de transporte público (como ônibus e metrô) e redes de sensores. O principal objetivo do simulador é permitir a execução de cenários realistas que possam auxiliar tanto pesquisadores quanto gestores públicos na tomada de decisões. Uma de suas características mais importantes é a capacidade de gerenciar milhões de agentes simultaneamente, o que possibilita a representação detalhada da mobilidade em grandes metrópoles.

Para atingir esse nível de desempenho, o simulador utiliza a linguagem de programação Erlang e baseia-se no Modelo de Atores. Nessa abordagem, cada elemento da simulação, um carro, um pedestre ou um sensor, atua como uma unidade independente (um ator) que se comunica com os outros por meio de trocas de mensagens. Essa arquitetura é essencial para garantir que o sistema consiga processar o enorme volume de interações que ocorrem no trânsito de uma cidade como São Paulo. Graças a essa estrutura, o InterSCSimulator consegue executar cenários com mais de 20 milhões de agentes de forma eficiente, muitas vezes em velocidade superior ao tempo real.

4.1 A Gestão de Eventos de Trânsito

Para possibilitar a experimentação de cenários mais complexos, como acidentes de trânsito ou interdições programadas, foi necessário criar mecanismos que pudessem alterar a infraestrutura da cidade durante a simulação. Essa funcionalidade foi desenvolvida por DEL ESPOSTE *et al.* (2019) através da implementação do agente *Events Manager*. Este agente é responsável por gerenciar eventos de trânsito, programando intervenções e modificando o grafo da cidade em tempo de execução. Essa característica é essencial para garantir o realismo da simulação, já que, no mundo real, a malha viária sofre alterações constantes devido a incidentes ou obras.

O funcionamento dessa gestão de eventos baseia-se na leitura de um arquivo de configuração estático, chamado `events.xml`, que lista as intervenções a serem realizadas. O

simulador utiliza esse arquivo para agendar as modificações nos ciclos de tempo definidos. O sistema permite simular o fechamento total de vias, removendo temporariamente a aresta correspondente do grafo (`close_street`) e impedindo a passagem de veículos. Além disso, é possível simular a redução da capacidade de uma via (`reduce_capacity`), ajustando o fluxo permitido para uma porcentagem menor, o que reduz a velocidade dos carros naquele trecho.

Apesar de o gerenciador de eventos ter criado a base necessária para alterar o mapa da cidade, ele dependia originalmente de um agendamento manual. Para simular um bloqueio, era preciso saber com antecedência e definir no arquivo `events.xml` exatamente qual rua fecharia e quando. Essa abordagem funcionava bem para situações controladas, mas não permitia relacionar diretamente o acúmulo de chuva com a interdição das ruas. Este trabalho resolve essa limitação automatizando a criação desses eventos de bloqueio a partir do processamento de dados reais de chuva, como veremos a seguir.

4.2 A Modelagem de Eventos Pluviométricos

Para resolver a dependência de agendamentos manuais, implementamos um mecanismo de pré-processamento que transforma dados climáticos brutos em eventos de trânsito para o simulador. O processo começa com a leitura dos dados: o sistema lê o arquivo `rain.csv` e guarda a série temporal de chuvas em uma lista na memória. Em seguida, lê o arquivo `roads-rain-capacity.csv` e armazena em outra lista os limites de chuva que cada via suporta antes de alagar.

Com essas estruturas carregadas, o simulador cruza as informações para criar a lista de eventos de alagamento. A lógica utiliza uma janela de tempo deslizante: o sistema calcula a chuva acumulada nas últimas 3 horas para cada momento registrado no arquivo de chuvas. Se esse volume acumulado for maior que a capacidade suportada pela via, é criado automaticamente um evento de fechamento (`close_street`) para os trechos daquela rua, com a duração padrão de 2 horas conforme explicado no Capítulo 3.

Um ponto importante resolvido nesta etapa foi o tratamento de eventos sobrepostos. Existem situações em que uma chuva forte e constante pode manter uma rua alagada por um período maior que a duração padrão. Para lidar com isso, o agente Events Manager foi alterado. Em vez de tentar fechar uma rua que já está fechada, o gerenciador verifica o estado da via: se um novo alagamento é detectado para um trecho já bloqueado, o sistema adia o horário de sua reabertura. Dessa forma, o bloqueio continua ativo enquanto as condições de chuva permanecerem críticas.

Além das vias interditadas, outros fatores influenciam a circulação em dias de chuva. Nessas condições, os motoristas tendem a diminuir a velocidade e aumentar a distância entre os veículos por questões de segurança. Segundo [TRANSPORTATION \(2025\)](#), chuvas leves reduzem a velocidade do tráfego entre 2% e 13%, e a capacidade da via entre 4% e 11%. Já as chuvas fortes podem reduzir a velocidade em até 17% e a capacidade em até 30%. Esses valores foram incorporados na simulação para impactar o trânsito gradativamente conforme o volume de chuva, seguindo os gráficos da Figura 4.1.

Por fim, os eventos de alagamento gerados dinamicamente são unidos aos eventos

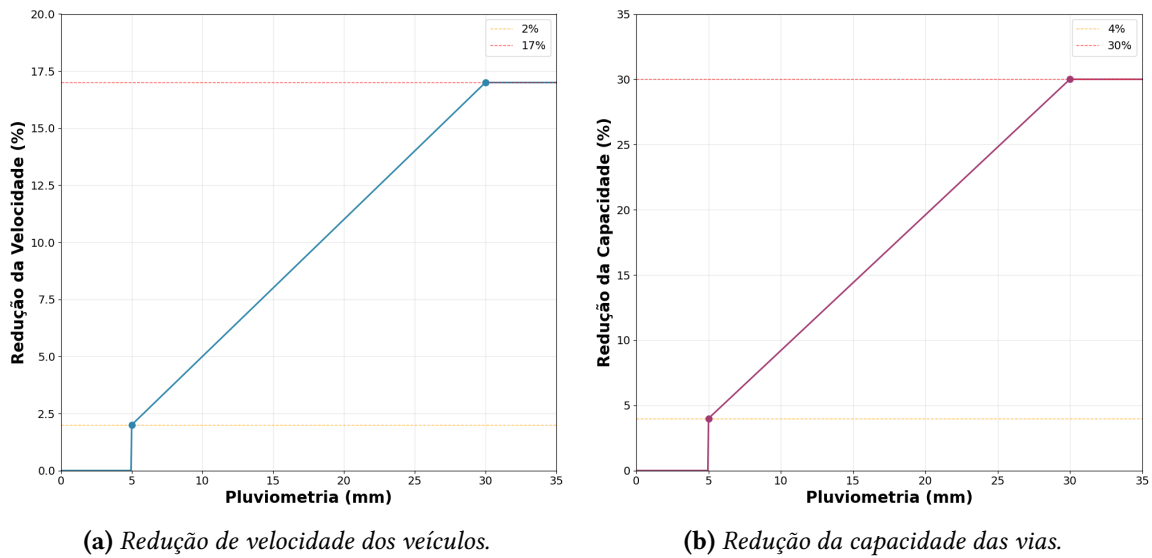


Figura 4.1: Redução de velocidade e capacidade em função da pluviometria

estáticos do arquivo `events.xml`, formando uma lista única de intervenções na cidade. Quando um desses eventos é ativado durante a simulação, a aresta correspondente à via alagada é removida temporariamente do grafo. A consequência é que essa via deixa de ser considerada como um caminho possível. O agente (carro), ao se deparar com essa remoção ou ao planejar seu trajeto, é forçado a recalcular sua rota. O sistema então busca o menor caminho até o destino a partir da posição atual do veículo, utilizando apenas as ruas que não estão interditadas.

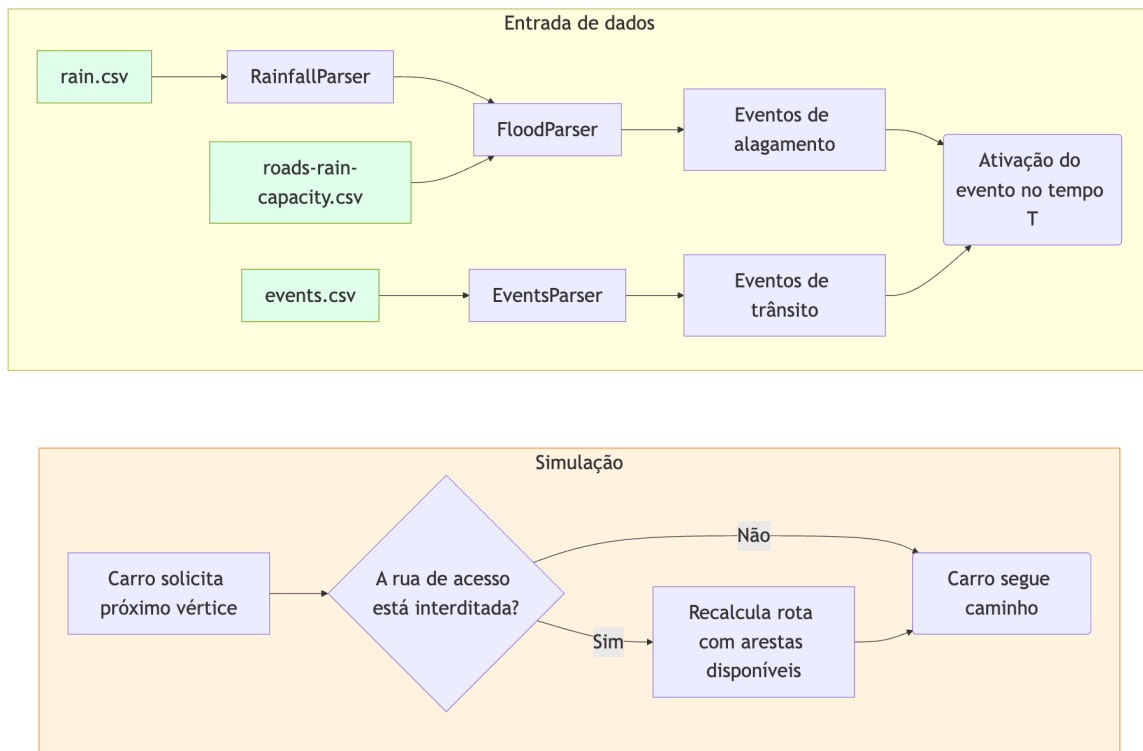


Figura 4.2: Fluxo de interdição de ruas na simulação.

Capítulo 5

Resultados

Para compreender como eventos climáticos extremos afetam a mobilidade urbana na região central de São Paulo, foram realizadas simulações considerando diferentes volumes de precipitação. A escolha dos cenários buscou representar tanto situações que já fazem parte do cotidiano da cidade quanto eventos extremos que, segundo as projeções climáticas, tendem a se tornar mais frequentes.

Conforme apontado por [NOBRE e YOUNG \(2011\)](#), há uma tendência de aumento na frequência de dias com precipitações intensas na Região Metropolitana de São Paulo. Índices climáticos como o R20 (dias com mais de 20mm de chuva), R30, R50 e R80 são indicadores importantes para medir essa mudança no padrão climático.

Com base nesses índices e nos padrões de deslocamento identificados na Pesquisa OD de 2023, o estudo focou em períodos de pico de tráfego do dia: a manhã (05h às 08h) e a tarde (16h às 19h). Ao todo, foram estabelecidos nove cenários de simulação:

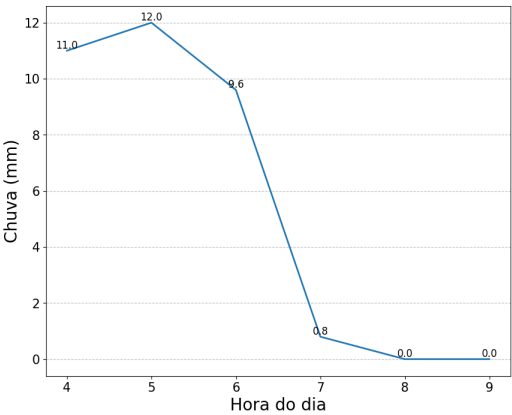
- Cenário Base: Um dia sem chuva (0mm), para servir de controle e comparação.
- Cenários Reais (20mm e 30mm): Simulações baseadas em dados históricos reais do INMET, representando dias de chuva forte que já ocorrem com alguma regularidade.
- Cenários Hipotéticos (50mm e 80mm): Simulações de estresse baseadas em projeções de eventos extremos (R50 e R80), onde o volume de chuva foi concentrado sinteticamente nos horários de maior fluxo de veículos.

A Figura 5.1 ilustra a distribuição horária da chuva em cada um desses cenários.

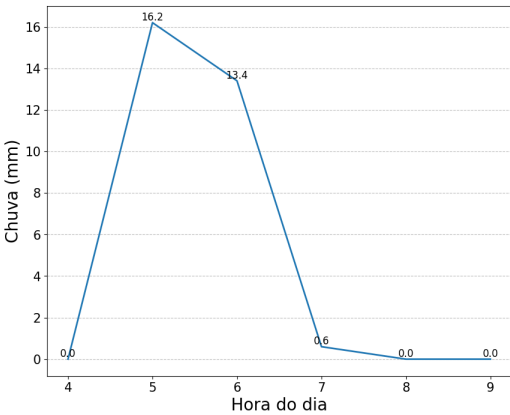
5.1 Validação do Cenário Base

Antes de analisar o impacto dos alagamentos, é fundamental verificar se o simulador representa corretamente o comportamento do trânsito em condições normais. O cenário de dia sem chuva serve como nossa linha de base.

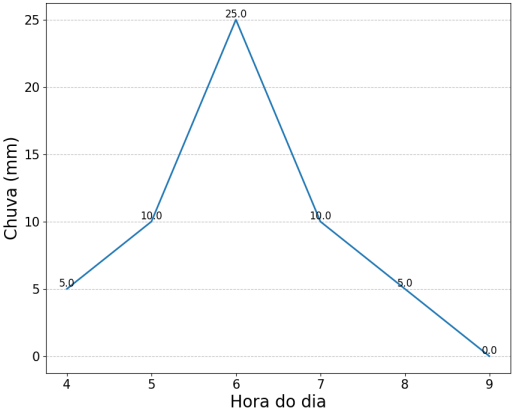
A Tabela 5.1 apresenta as médias obtidas para as viagens realizadas dentro da região do centro ampliado neste cenário.



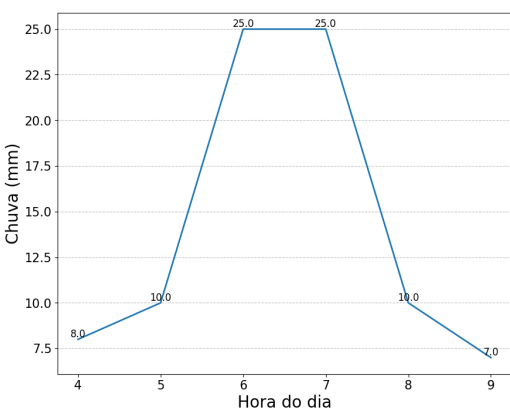
(a) 20mm — pico manhã (28/10/2019)



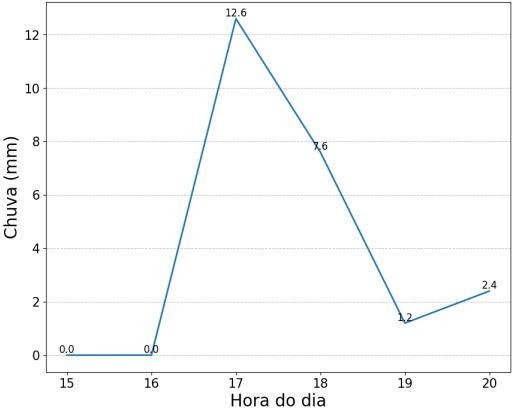
(b) 30mm — pico manhã (17/11/2020)



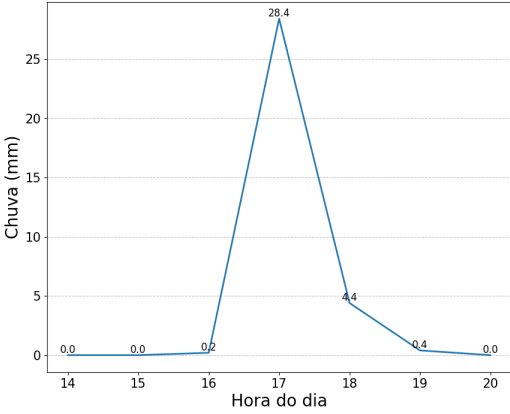
(c) 50mm — pico manhã (hipotético)



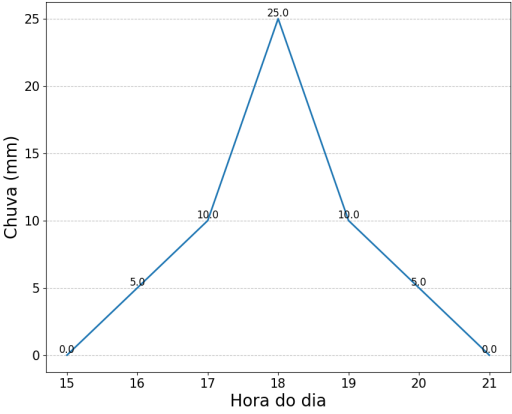
(d) 80mm — pico manhã (hipotético)



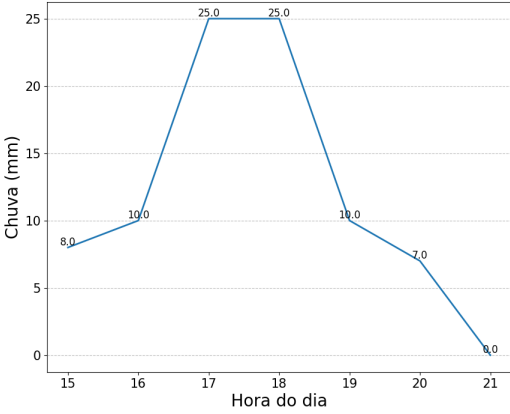
(e) 20mm — pico tarde (20/01/2022)



(f) 30mm — pico tarde (30/09/2018)



(g) 50mm — pico tarde (hipotético)



(h) 80mm — pico tarde (hipotético)

Figura 5.1: Cenários de chuva nos picos da manhã e tarde para diferentes intensidades.

Cenário	Tempo médio	Velocidade média	Distância média
Dia sem chuva - 0mm	22,14 min	31,45 km/h	12,21 km

Tabela 5.1: Médias de viagens em um dia sem chuva

Observa-se que a velocidade média registrada foi de 31,45 km/h. Este valor é coerente com a realidade de ruas da região central de São Paulo fora de situações de congestionamento severo. O simulador não representa um cenário de “pista livre” (onde a velocidade seria próxima de 50 ou 60 km/h), mas sim um fluxo urbano realista, com interações entre veículos e semáforos.

Além disso, o tempo médio de viagem registrado foi de 22,14 minutos para uma distância média de 12,21 km. Esses números indicam que as viagens que estamos estudando são de curta e média distância, típicas da região central expandida, onde os deslocamentos tendem a ser mais concentrados do que nas regiões periféricas.

O modelo se comporta de maneira estável e próxima da realidade no cenário ideal, o que nos dá confiança para afirmar que as alterações observadas nos próximos cenários são, de fato, consequências da chuva e dos alagamentos introduzidos na simulação.

5.2 Impacto na Velocidade Média

A velocidade média foi a métrica que sofreu o impacto mais direto e expressivo em todos os cenários de chuva simulados. Conforme apresentado na Tabela 5.2, houve reduções significativas em relação ao dia padrão, variando entre 12% e 21% dependendo do volume de precipitação e do período do dia.

Período	Chuva (mm)	Velocidade média (km/h)	Relação com dia seco
Manhã	20mm	27,76	-14,07%
Manhã	30mm	27,04	-13,95%
Manhã	50mm	26,47	-17,32%
Manhã	80mm	26,02	-18,39%
Tarde	20mm	27,03	-12,36%
Tarde	30mm	25,02	-21,85%
Tarde	50mm	26,46	-16,65%
Tarde	80mm	26,19	-17,45%

Tabela 5.2: Velocidade média das viagens afetadas pela chuva

Essa desaceleração geral pode ser visualizada nos histogramas da Figura 5.2, onde notamos um deslocamento das curvas para a esquerda, indicando uma maior frequência de viagens realizadas em velocidades mais baixas.

Esse comportamento é explicado pela combinação de dois fatores principais implementados na simulação. O primeiro é a redução direta na velocidade que simula o comportamento dos motoristas diante da perda de visibilidade e atrito. O segundo é o con-

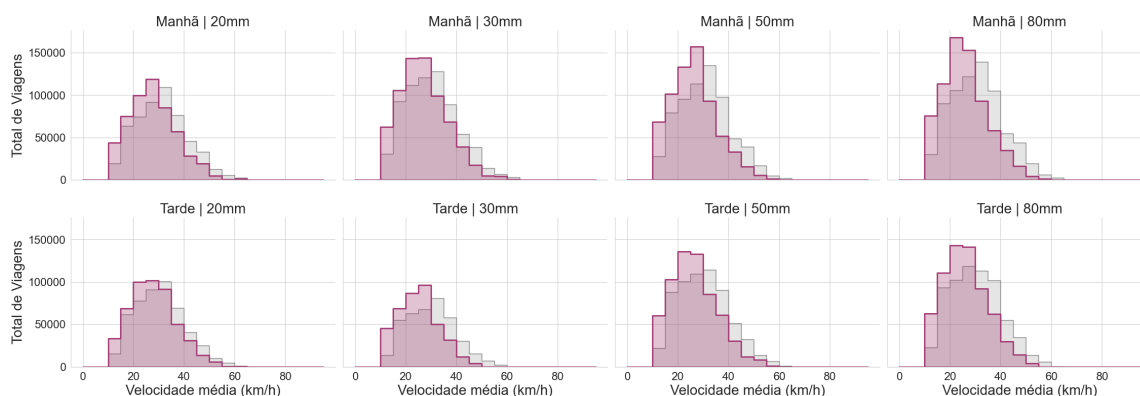


Figura 5.2: Em rosa, a distribuição da velocidade média nas viagens afetadas pela chuva. Em cinza, a distribuição das mesmas viagens em um dia seco.

gestionamento causado pelos alagamentos, ao fechar ruas, os veículos são obrigados a buscarem rotas alternativas. Esses desvios podem gerar gargalos e diminuir o fluxo geral do trânsito.

Um destaque importante nesta análise é o cenário de pico a tarde com 30mm de chuva (Figura 5.1f). Embora não seja o cenário com o maior volume total de água, ele apresentou a pior queda de velocidade de todo o estudo, com uma redução de 21,85%. Esse índice superou inclusive o cenário extremo hipotético de mais de 80mm, que registrou uma queda de 17,45% no mesmo período.

Podemos analisar esse caso a partir da natureza dos dados. O cenário de 30mm utiliza registros históricos reais de chuva. É provável que, o horário em que a precipitação ocorreu nesse dia tenha sido crítico para a malha viária e gerou um congestionamento mais intenso. Em contrapartida, os cenários hipotéticos de 50mm e 80mm, apesar de mais volumosos, foram modelados com uma distribuição de chuva mais uniforme ao longo das horas de pico. Isso demonstra que quando e como ela cai é um fator tão determinante para o colapso do trânsito quanto o volume total precipitado.

5.3 Impacto no Tempo de Viagem

O tempo de viagem é a métrica que resume o impacto geral dos alagamentos na vida do cidadão, pois ela reflete tanto o efeito da redução da velocidade quanto a necessidade de percorrer distâncias maiores devido aos desvios.

Observando a Tabela 5.3, nota-se que o tempo médio das viagens aumentou em todos os cenários, mas esse crescimento não ocorreu de forma linear em relação ao volume de chuva. Os acréscimos variaram entre 4,6% e 14,4% em comparação as mesmas viagens no dia sem chuva, dependendo do cenário analisado.

Os dados indicam que o trânsito no pico da tarde é mais sensível aos efeitos da chuva do que pela manhã. O cenário de 30mm, por exemplo, ilustra bem essa diferença: enquanto na manhã o aumento no tempo de viagem foi de apenas 4,61%, na tarde esse aumento saltou para 14,42%. Isso se deve a esse período acumular o trânsito residual do dia e possuir

Período	Chuva (mm)	Tempo médio (min)	Relação com dia seco
Manhã	20mm	25,15	5,49%
Manhã	30mm	23,70	4,61%
Manhã	50mm	25,64	11,60%
Manhã	80mm	25,53	12,23%
Tarde	20mm	25,19	8,06%
Tarde	30mm	26,91	14,42%
Tarde	50mm	25,21	11,09%
Tarde	80mm	25,43	12,29%

Tabela 5.3: Tempo médio das viagens afetadas pela chuva

um fluxo de retorno para casa mais denso. O sistema viário nesse horário parece depender mais de ruas suscetíveis a alagamentos do que no período matutino. Quando essas vias falham à tarde, o impacto no tempo final do motorista é mais severo.

A distribuição dos tempos de viagem pode ser visualizada na Figura 5.3, onde os histogramas mostram como as viagens mais longas se tornam mais frequentes nos cenários críticos, especialmente nos gráficos referentes ao período da tarde.

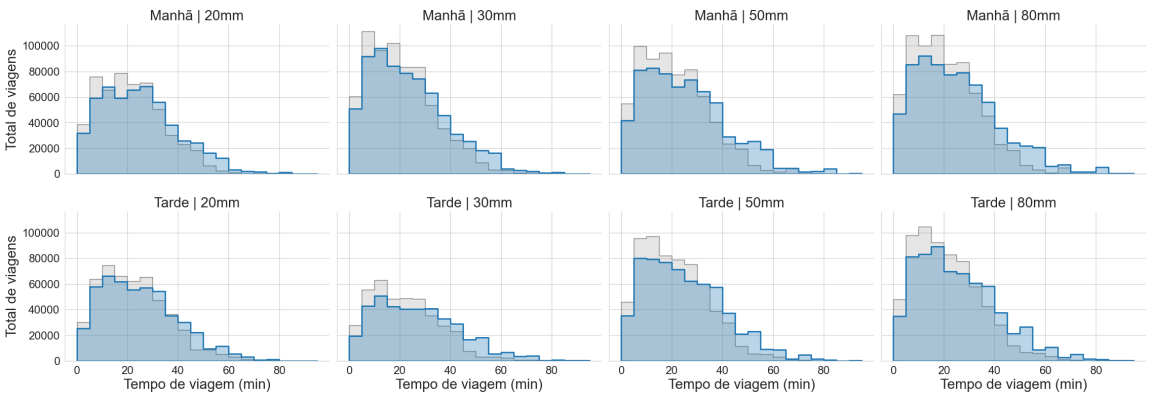


Figura 5.3: Em azul, a distribuição do tempo de viagens afetadas pela chuva. Em cinza, a distribuição das mesmas viagens em um dia seco.

5.4 Impacto na Distância Percorrida

Ao contrário do tempo e da velocidade, a distância média percorrida foi a métrica que apresentou a menor variação entre todos os cenários simulados. Conforme detalhado na Tabela 5.4, o aumento na quilometragem das viagens afetadas pela chuva oscilou apenas entre 1,62% e 3,30% em relação às mesmas viagens no dia sem chuva.

Essa estabilidade pode ser observada visualmente na Figura 5.4, onde os histogramas de distribuição de distância para os cenários com chuva permanecem muito semelhantes ao padrão do cenário base, sem grandes deslocamentos.

Esse resultado mostra a alta conectividade da infraestrutura da região central de São

Período	Chuva (mm)	Distância média (km)	Relação com dia seco
Manhã	20mm	12,22	1,62%
Manhã	30mm	11,27	1,80%
Manhã	50mm	11,85	1,85%
Manhã	80mm	11,61	1,95%
Tarde	20mm	12,26	1,78%
Tarde	30mm	11,76	3,30%
Tarde	50mm	11,55	2,17%
Tarde	80mm	11,57	2,95%

Tabela 5.4: Distância das viagens afetadas pela chuva

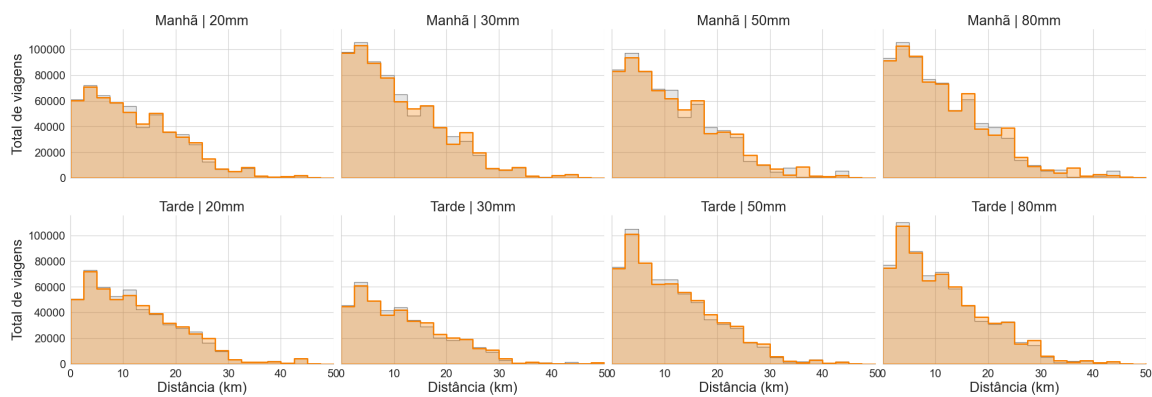


Figura 5.4: Em laranja, a distribuição da velocidade média nas viagens afetadas pela chuva. Em cinza, a distribuição das mesmas viagens em um dia seco.

Paulo. A malha viária do centro expandido é densa, oferecendo múltiplas opções de rotas. Quando uma rua é interditada por alagamento, o simulador consegue encontrar um caminho alternativo que é geograficamente muito próximo, causando pouco impacto da distância final. Isso difere do que aconteceria em rodovias ou em regiões com barreiras físicas (como pontes sobre um rio), onde um bloqueio obrigaria o motorista a fazer um desvio maior para chegar ao destino.

Assim, vemos que o efeito do alagamento na região central não está associado ao motorista precisar percorrer um caminho muito mais longo, ele apenas perde agilidade preso nos congestionamentos que se formam nas rotas alternativas. O problema central, portanto, é a saturação da capacidade das vias, e não a distância física do desvio.

Capítulo 6

Conclusão

Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver uma ferramenta capaz de simular o impacto de eventos pluviométricos na mobilidade urbana da cidade de São Paulo. A motivação surgiu da necessidade de compreender, de forma quantitativa, como os alagamentos recorrentes afetam o deslocamento da população em uma das maiores metrópoles do mundo.

Para atingir esse objetivo, foi realizada a extensão do InterSCSimulator, incorporando módulos capazes de processar dados reais de pluviometria (do INMET) e histórico de alagamentos (da CET e Defesa Civil). Essa integração permitiu que o simulador reagisse dinamicamente às condições climáticas, fechando vias e alterando a velocidade do tráfego conforme a intensidade da chuva, algo que a versão original da ferramenta não suportava.

Os experimentos realizados na região do centro ampliado de São Paulo permitiram verificar a eficácia da implementação e revelaram características sobre a dinâmica da cidade sob chuva:

- A malha viária da região central possui alta conectividade. Isso foi evidenciado pelo fato de que a distância média percorrida aumentou muito pouco mesmo nos cenários críticos. Ou seja, existem rotas alternativas fisicamente próximas aos pontos de alagamento.
- Apesar das rotas alternativas serem curtas, o tempo de viagem sofreu aumentos significativos. Conclui-se que o principal impacto dos alagamentos não é obrigar o motorista a percorrer grandes distâncias, mas sim o congestionamento severo que se forma nas vias que restaram abertas.
- As simulações demonstraram que o trânsito da tarde é consideravelmente mais sensível aos eventos climáticos do que o da manhã. Mesmo com volumes de chuva similares, os atrasos registrados no período vespertino foram consistentemente superiores, indicando que a malha viária tem menor capacidade de recuperação neste horário.
- O volume total de precipitação não é o único fator determinante para o colapso do trânsito. O cenário real de 30mm causou mais transtornos do que cenários de

chuvas extremas de 80mm. Isso prova que o momento e a intensidade da chuva são tão ou mais críticos quanto a quantidade absoluta de água.

Apesar dos avanços obtidos na modelagem da mobilidade urbana sob condições de chuvas extremas, este trabalho apresenta limitações que abrem caminhos para futuros aprimoramentos.

As simulações realizadas focaram exclusivamente em viagens feitas de carro. O transporte público, que é fundamental para a cidade, possui dinâmicas próprias, que não foram contempladas nesse modelo, como rotas fixas e a impossibilidade de realizar desvios de forma flexível. O InterSCSimulator possui suporte a outros meios de transportes. Um trabalho futuro poderia estender a implementação para medir como os alagamentos afetam o cumprimento de horários das linhas, a lotação dos veículos e o impacto sobre os usuários do transporte coletivo.

Outro ponto de restrição é a região geográfica. Devido a limitações computacionais, o estudo se restringiu à zona central expandida de São Paulo. Embora seja uma área crítica e de alta densidade, ela não reflete a realidade de regiões mais periféricas além de não avaliar o impacto dos alagamentos em deslocamentos de longa distância.

Adicionalmente, houve uma simplificação no tratamento dos dados de alagamento. A base de dados do CGE distingue as ocorrências entre “intransitáveis” (bloqueio total) e “transitáveis” (onde o acúmulo de água não toma todas as pistas). Neste trabalho, a modelagem priorizou os eventos de interdição total e a redução generalizada de velocidade pela chuva. No entanto, as ocorrências “transitáveis” também geram impactos pois funcionam como gargalos que reduzem a capacidade de fluxo da via sem bloqueá-la totalmente.

Enfim, este trabalho demonstra que a simulação computacional é uma aliada importante para o planejamento urbano. Diante de um cenário de mudanças climáticas, onde eventos extremos tendem a se tornar mais frequentes, a capacidade de prever e mitigar seus efeitos é essencial. Ao conectar dados reais de meteorologia com a modelagem de tráfego, foi possível transformar números isolados em uma visualização concreta dos impactos que a chuva traz para a mobilidade. Espera-se que as contribuições apresentadas sirvam como ponto de partida para estudos mais complexos e para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes, auxiliando na construção de uma São Paulo mais resiliente e preparada para enfrentar seus desafios climáticos.

Referências

- [ANTUNES 2010] Fatima ANTUNES. *As enchentes na história de São Paulo*. Out. de 2010. URL: https://prefeitura.sp.gov.br/web/cultura/w/patrimonio_historico/ladeira_memoria/8385#:~:text=As%20enchentes%20que%20ocorrem%20em,gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20energia%20el%C3%A9trica%20implantado..
- [ASQUINO 2009] Marcelo Sacenco ASQUINO. “Infra-estrutura e planejamento na Metrópole de São Paulo: entre as escalas regionais e o impacto local”. Tese de dout. São Paulo, Brasil: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2009. URL: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16133/tde-15032010-153947/publico/M_ASQUINO_tese.pdf (citado na pg. 3).
- [CARDOSO 2019] Juliana Mitsuyama CARDOSO. “Efeitos da chuva e da luminosidade sobre o tráfego em rodovias paulistas”. Diss. de mest. São Paulo, Brasil: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2019. URL: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18144/tde-20022020-145053/publico/DissertCardosoJulianaMitsuyamaCorrig.pdf> (citado na pg. 5).
- [CARNEIRO e JESUS 2020] Rizia CARNEIRO e Valéria C. M. de JESUS. “Desafios à gestão da mobilidade urbana no Brasil: a política de transporte público e os impactos socioespaciais do Plano Diretor de São Paulo (2014-2029)”. *Revista Continentes* 9.16 (jan. de 2020), pp. 119–142. DOI: 10.22484/rc.2020.16.899. URL: <http://dx.doi.org/10.22484/rc.2020.16.899>.
- [CARVALHO 2021] Raissa Barreto de CARVALHO. “ANÁLISE DE CHUVAS EXTREMAS E A RELAÇÃO COM EVENTOS DE ALAGAMENTOS NA CIDADE DE SÃO PAULO – SP”. Diss. de mest. São José dos Campos, Brasil: Universidade Estadual Paulista, 2021. URL: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/693bec9d-90c9-4bf9-b3de-7daa0dd68205/content> (citado na pg. 4).
- [CASTRO e ALVIM 2022] Afonso Celso Vanoni de CASTRO e Angélica Tanus Benatti ALVIM. “Urbanização e gestão de riscos hidrológicos em são paulo”. *Cadernos Metrópole* 24.54 (mai. de 2022), pp. 669–696. ISSN: 2236-9996. DOI: 10.1590/2236-9996.2022-5410. URL: <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2022-5410>.
- [CEMADEN 2016] CEMADEN. *Inundação*. Mai. de 2016. URL: <http://www2.cemaden.gov.br/inundacao/> (citado na pg. 4).

- [CENTRO DE GERENCIAMENTO DE EMERGÊNCIAS CLIMÁTICAS (CGE) 2010] CENTRO DE GERENCIAMENTO DE EMERGÊNCIAS CLIMÁTICAS (CGE). *Boletim Pluviométrico*. Acessado em: out. 2025. 2010. URL: https://arquivos.saisp.br/nextcloud/index.php/s/qikdinFyAM33MJK?path=%2FBOLETIM_PLUVIOMETRICO.
- [COLL 2020] Liana COLL. *A estreita relação entre mudanças climáticas e o aumento de eventos extremos*. Fev. de 2020. URL: https://unicamp.br/unicamp/ju/noticias/2020/02/27/estreita-relacao-entre-mudancas-climaticas-e-o-aumento-de-eventos-extremos/#:~:text=JU%20menu%20superior%20*%20Arte%20%5C&%20Cultura.%20*%20Atualidades. (citado na pg. 4).
- [COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO 2023] COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO. *Pesquisa Origem Destino 2023*. Acessado em: out. 2025. 2023. URL: https://www.metro.sp.gov.br/pt_BR/pesquisa-od/.
- [DEL ESPOSTE *et al.* 2019] Arthur de M DEL ESPOSTE *et al.* “Design and evaluation of a scalable smart city software platform with large-scale simulations”. *Future Generation Computer Systems* 93 (2019), pp. 427–441 (citado nas pgs. 1, 17).
- [FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA 2024] FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA. *Plano Diretor de Drenagem - PDD: Plano de Ações*. 2ª ed. ISBN 978-65-89429-18-0. São Paulo: FCTH/SIURB, 2024. URL: https://drive.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/obras/arquivos/FCTH_Plano_de_Acoes_PDD_2ed.pdf.
- [INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET) 2000] INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)*. Acessado em: out. 2025. 2000. URL: <https://bdmep.inmet.gov.br/>.
- [JACOBI 2000] Pedro JACOBI. “Do centro à periferia: meio ambiente e cotidiano na cidade de são paulo”. *Ambiente & Sociedade* 6-7 (jan. de 2000), pp. 145–162. ISSN: 1414-753X. DOI: 10.1590/S1414-753X2000000100007. URL: <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2000000100007> (citado na pg. 4).
- [NOBRE e YOUNG 2011] Carlos A. NOBRE e Andrea F. YOUNG, ed. *Vulnerabilidades das Megacidades Brasileiras às Mudanças Climáticas: Região Metropolitana de São Paulo*. Relatório Final. São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2011. URL: https://www.nepo.unicamp.br/publicacoes/relatorio-final/megacidades_RMSP.pdf (citado na pg. 21).
- [NONA s.d.] Marcos NONA. *Priorizar transporte coletivo é solução para mobilidade em SP*. URL: <https://sites.usp.br/prp/2930> (citado na pg. 3).
- [O ESTADO DE S. PAULO 2013] O ESTADO DE S. PAULO. “O caminho da transformação”. *O Estado de S. Paulo* (jan. de 2013). Caderno Metrópole. Data: 11 de janeiro de 2013, A18–A23. URL: <https://www.scielo.br/j/ea/a/xM3HNxRtNM5RqtjttKjxgJb/?format=pdf&lang=pt>.

- [J. C. F. F. d. OLIVEIRA *et al.* 2024] João C. F. F. de OLIVEIRA, Luiz M. F. de OLIVEIRA, André L. M. V. de OLIVEIRA, Cristiano C. QUARESMA e Herman P. P. F. F. de OLIVEIRA. “Developing a Conceptual Model to Evaluate Flood Resilience in Brazilian Smart Cities”. *Smart Cities* 7.1 (dez. de 2024), p. 22. DOI: [10.3390/smartcities7010022](https://doi.org/10.3390/smartcities7010022). URL: <https://doi.org/10.3390/smartcities7010022>.
- [M. OLIVEIRA 2021] Matheus OLIVEIRA. *Meteorologista do Inmet explica como classificar a intensidade das chuvas*. Portal Multiplix. 2021. URL: <https://www.portalmultiplix.com/noticias/cotidiano/meteorologista-do-inmet-explica-como-classificar-a-intensidade-das-chuvas> (acesso em 15/08/2025) (citado na pg. 14).
- [OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS 2024] OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS. *OpenStreetMap*. Acessado em: out. 2025. 2024. URL: <https://www.openstreetmap.org/>.
- [IPCC 2021] PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). *Mudança do Clima 2021: A Base Científica*. 2021. URL: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC_mudanca2.pdf (citado na pg. 4).
- [PILOTTO 2006] Angela Seixas PILOTTO. “Mobilidade Urbana: Uma análise das propostas do Plano Diretor 2002 e da percepção dos cidadãos sobre a mobilidade em São Paulo”. Diss. de mestr. São Paulo, Brasil: Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2006. URL: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16137/tde-11012024-170835/publico/ME_ANGELASEIXASPILOTTO_rev.pdf.
- [PREFEITURA DE SÃO PAULO 2013] PREFEITURA DE SÃO PAULO. *GeoSampa — Mapa Digital da Cidade de São Paulo*. Acessado em: out. 2025. 2013. URL: <https://metadados.geosampa.prefeitura.sp.gov.br/geonetwork/intranet/por/catalog.search#/metadata/432c06b1-03a1-4b1f-9210-423e1b58e869>.
- [PREFEITURA DE SÃO PAULO 2025] PREFEITURA DE SÃO PAULO. *Obras reforçam o combate a alagamentos e áreas de risco em São Paulo*. Set. de 2025. URL: https://prefeitura.sp.gov.br/web/obras/w/obras-refor%C3%A7am-o-combate-a-alagamentos-e-%C3%A1reas-de-risco-em-s%C3%A3o-paulo#:~:text=Infraestrutura%20Urbana%20e%20Obras%20*%20Infraestrutura%20Urbana,e%20%C3%A1reas%20de%20risco%20em%20s%C3%A3o%20paulo. (citado na pg. 5).
- [RODRIGUES *et al.* 2023] Maria Santiellas Costa RODRIGUES, Cristiano Capellani QUARESMA e Rodrigo Kuester PEREIRA. “Desafios à adoção de Soluções Baseadas na Natureza no combate às inundações urbanas na cidade de São Paulo, SP, Brasil”. In: *Anais do XX Encontro Nacional da ANPUR (ENANPUR)*. Acessado em: nov. 2025. 2023. URL: <https://anpur.org.br/wp-content/uploads/2023/05/st04-21.pdf>.
- [SANTANA, CHAVES *et al.* 2017] Eduardo Felipe Zambom SANTANA, Ana Paula CHAVES, Marco Aurelio GEROSA, Fabio KON e Dejan S MILOJICIC. “Software platforms for smart cities: concepts, requirements, challenges, and a unified reference architecture”. *ACM Computing Surveys* 50.6 (2017), pp. 1–37.

- [SANTANA, LAGO *et al.* 2017] Eduardo Felipe Zambom SANTANA, Nelson LAGO, Fabio KON e Dejan S MILOJICIC. “Intersc Simulator: large-scale traffic simulation in smart cities using erlang”. In: *International workshop on multi-agent systems and agent-based simulation*. Springer, 2017, pp. 211–227 (citado nas pgs. 1, 17).
- [SCHÖBER *et al.* 2018] Patrick SCHÖBER, Christa BOER e Lothar A. SCHWARTE. “Correlation coefficients: appropriate use and interpretation”. *Anesthesia & Analgesia* 126.5 (2018), pp. 1763–1768. DOI: [10.1213/ANE.0000000000002864](https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864). URL: https://journals.lww.com/anesthesia-analgesia/fulltext/2018/05000/correlation_coefficients__appropriate_use_and.50.aspx (citado na pg. 12).
- [M. F. d. SILVA *et al.* 2024] Moisés Figueiredo da SILVA, Leonardo de SOUZA MODERO, Luciano Henrique TRINDADE e Antônio Pires BARBOSA. “RESILIÊNCIA URBANA E DIREITO À CIDADE: A DEFESA CIVIL COMO FATOR ESTRUTURAL EM CIDADES INTELIGENTES”. *Revista ARACÊ* 6.3 (2024), pp. 6478–6501. DOI: [10.56238/arev6n3-131](https://doi.org/10.56238/arev6n3-131). URL: <https://doi.org/10.56238/arev6n3-131> (citado na pg. 3).
- [V. C. d. SILVA 2002] Vanderli Custódio da SILVA. “Deslocamentos na Região Metropolitana de São Paulo: Uma análise sobre a correlação entre uso do solo e transporte”. Tese de dout. Rio Claro, Brasil: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2002 (citado na pg. 4).
- [TRANSPORTATION 2025] U.S. Department of TRANSPORTATION. *How Do Weather Events Affect Roads?* Jul. de 2025. URL: <https://ops.fhwa.dot.gov/weather/roadimpact.htm> (citado na pg. 18).
- [WORLD POPULATION REVIEW 2025] WORLD POPULATION REVIEW. *Largest Cities by Population 2025*. Acessado em: nov. 2025. 2025. URL: <https://worldpopulationreview.com/cities> (citado na pg. 3).
- [YULITA 2023] Enzo Gonçalves YULITA. “Mobilidade urbana: uma análise sobre a correlação entre densidade demográfica e o uso de transporte público no município de São Paulo”. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Diss. de maestr. São Paulo, Brasil: Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2023. URL: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-08032024-100519/publico/EnzoGoncalvesYulitaCorr23.pdf>.
- [ZIONI *et al.* 2024] Silvana ZIONI, Thiago Von Zeidler GOMES e Priscila da Mota MORAES. “Freio de arrumação para a mobilidade urbana paulistana”. *Estudos Avançados* 38.111 (2024), pp. 115–133. ISSN: 0103-4014. DOI: [10.1590/s0103-4014.202438111.007](https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438111.007). URL: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438111.007> (citado na pg. 3).