

Universidade De São Paulo
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas
Departamento de Geografia

Pedro Mastini Galve

**Análise da Contribuição dos Parques Lineares para a Redução de Inundações
em eventos de chuva extrema: Estudo de Caso no Parque Linear Aricanduva
na Cidade de São Paulo-SP**

São Paulo

2025

Universidade De São Paulo
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas
Departamento de Geografia

**Análise da Contribuição dos Parques Lineares para a Redução de
Inundações em eventos de chuva extrema: Estudo de Caso no Parque Linear
Aricanduva na Cidade de São Paulo-SP**

Pedro Mastini Galve

Trabalho de Graduação Individual ou Monografia
apresentada ao Departamento de Geografia da
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências
Humanas da Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Bacharel em Geografia

São Paulo

2025

Pedro Mastini Galve

**Análise da Contribuição dos Parques Lineares para a
Redução de Inundações em eventos de chuva extrema: Estudo de
Caso no Parque Linear Aricanduva na Cidade de São Paulo-SP**

Monografia apresentada à Faculdade de Filosofia,
Letras e Ciências Humanas da Universidade de
São Paulo, no Departamento de Geografia, para
obtenção do título de Bacharel em Geografia sob
orientação da Profa. Dra. Nádía Gilma Beserra de
Lima.

Aprovado em:

Banca Examinadora:

“Se não posso fazer tudo o que devo, devo
ao menos fazer tudo o que posso”

Amigos do Bem

Agradecimentos

Gostaria de começar agradecendo à minha família, meu pai Ronaldo, minha mãe Sonia e meu irmão Davi que me apoiaram, incentivaram e estiveram ao meu lado durante toda a graduação, levando-me a atividades de campo, estágios e sempre se interessando por tudo o que envolvia a faculdade. Gostaria de agradecer também à minha namorada, Livia, que representou uma mudança de chave na minha trajetória acadêmica e sempre me apoiou na busca pela minha melhor versão. Sem o seu incentivo no momento certo, provavelmente não teria conseguido desenvolver este trabalho da maneira como foi realizado. Meus agradecimentos à minha orientadora, Professora Nádia, que sempre me mostrou os melhores caminhos a serem seguidos na pesquisa e me orientou da melhor forma que eu poderia imaginar. Agradeço igualmente às minhas amigas da época do cursinho, Luiza e Nathalia, que sempre estiveram comigo, compartilhando tanto minhas reclamações quanto minhas alegrias. Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, em especial ao Omar e ao Filipe, que me introduziram ao mundo da pesquisa. Aos meus amigos Josè, Anna, Lucas, Felipe, Helena, Janine e Ana que as risadas que demos juntos foram de extrema ajuda para finalizar essa pesquisa. E, por fim, ao Professor Emerson e ao Rogério, que também contribuíram significativamente com valiosas conversas e indicações de leitura.

Resumo

Este trabalho analisa o papel do Parque Linear Aricanduva como infraestrutura verde na mitigação de inundações em uma bacia hidrográfica urbana da cidade de São Paulo. A pesquisa combina análise estatística da precipitação, mapeamento de fragilidade ambiental e modelagem hidrológica para comparar cenários com e sem a presença do parque. Foram utilizados dados pluviométricos de sete estações (2009–2024), tratados em R e representados por meio de boxplots, permitindo identificar a sazonalidade do regime de chuvas e a ocorrência de eventos extremos. O mapeamento de fragilidade ambiental, fundamentado na metodologia de Ross (1994), evidenciou que 36% da área urbanizada da bacia encontra-se em zonas de alta ou muito alta fragilidade, correlacionadas espacialmente ($r = 0,78$) com registros de deslizamentos. A modelagem hidrológica no software HEC-HMS, complementada pelo modelo HAND no Google Earth Engine, demonstrou que a presença do parque reduz os picos de vazão em 8,3%, retarda o tempo de concentração em 27 minutos e diminui a área inundada em 1,04 km². Os resultados confirmam que o Parque Linear Aricanduva desempenha a função de reduzir o risco de inundações. Nesse sentido, a pesquisa destaca a relevância de soluções baseadas na natureza como estratégia adaptativa para o planejamento urbano e a gestão de riscos hidrológicos em grandes metrópoles.

Palavras-chave: Fragilidade ambiental; Modelagem hidrológica; Soluções baseadas na natureza.

Abstract

This study analyzes the role of the Aricanduva Linear Park as green infrastructure for flood mitigation in an urban watershed of São Paulo. The research combines statistical analysis of precipitation, environmental fragility mapping, and hydrological modeling to compare scenarios with and without the park's presence. Rainfall data from seven stations (2009–2024) were processed in R and represented through boxplots, allowing the identification of rainfall seasonality and extreme events. The environmental fragility mapping, based on the methodology of Ross (1994), revealed that 36% of the urbanized area of the basin lies within high or very high fragility zones, spatially correlated ($r = 0.78$) with recorded landslides. Hydrological modeling using HEC-HMS software, complemented by the HAND model in Google Earth Engine, demonstrated that the presence of the park reduces peak flows by 8.3%, delays the time of concentration by 27 minutes, and decreases the flooded area by 1.04 km². The results confirm that the Aricanduva Linear Park plays a crucial role in reducing flood risk. In this sense, the research highlights the importance of nature-based solutions as an adaptive strategy for urban planning and hydrological risk management in large metropolitan areas.

Keywords: Environmental fragility; Hydrological modeling; Nature-based solutions.

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Eventos de precipitação classificados por estação pluviométrica, período e intensidade..... 48

Tabela 02: Dados do uso do solo impactado pela inundação na bacia do rio Aricanduva retirados do Modelo HAND..... 59

Lista de Equações

Equação 1: Equação de Chuvas Intensas da Cidade de São Paulo, Fonte: CPRM, 2014..... 31

Lista de Figuras

Figura 1: Mapa da Bacia do Rio Aricanduva.....	13
Figura 2: Mapa Pedológico da Bacia do Rio Aricanduva.....	15
Figura 3: Mapa hipsométrico da Bacia do Rio Aricanduva.....	17
Figura 4: Porcentagem de área urbanizada na bacia do Rio Aricanduva.....	19
Figura 5: Mapa da área urbanizada da Bacia do Rio Aricanduva.....	19
Figura 6: Análise dos eventos extremos de precipitação na cidade de São Paulo no período de 1933 a 2009. Fonte: IAG/USP, Elaboração: Silva (2010).....	21
Figura 8: Divisão da bacia hidrográfica do Aricanduva no HEC-HMS.....	29
Figura 9: Interface da plataforma criada no GEE.....	33
Figura 10: Mapa de localização das estações meteorológicas.....	42
Figura 11: Distribuição Mensal da Precipitação – Estação Aricanduva/Vila Formosa (2014–2024).....	43
Figura 12: Distribuição Mensal da Precipitação – Itaquera (2014–2024).....	44
Figura 13: Distribuição Mensal da Precipitação – Mooca (2014–2024).....	45
Figura 14: Distribuição Mensal da Precipitação – Penha (2014–2024).....	45
Figura 15– Distribuição Mensal da Precipitação – São Mateus (2014–2024).....	46
Figura 16: Distribuição Mensal da Precipitação – Vila Prudente (2014–2024).....	47
Figura 17: Precipitação anual das estações. Fonte: CGE (2025).....	50
Figura 18: Mapa de fragilidade ambiental.....	51
Figura 19: Mapa de suscetibilidade da Zona Leste de São Paulo. Fonte: IPT 2025.....	53
Figura 20: Mapa de calor de inundações entre 2013 a 2024. Fonte: GeoSampa.....	54
Figura 21: Vazão do Rio Aricanduva no primeiro cenário.....	55
Figura 22: Vazão do Rio Aricanduva no segundo cenário.....	56
Figura 23: Comparação entre os dois cenários: com parque linear e sem parque linear na Bacia do Rio Aricanduva.....	57

Sumário

1. Introdução.....	10
2. Objetivo.....	12
2.1 Objetivos Específicos.....	12
3. Área de Estudo.....	12
3.1 Aspectos Físicos.....	14
3.1.1 Pedologia.....	14
3.1.2 Relevo.....	15
3.1.3 Urbanização.....	17
3.1.4 Caracterização Climática.....	20
3.1.5 Caracterização da População da Bacia Hidrográfica do Rio Aricanduva e Vulnerabilidade Social.....	22
4. Materiais e Métodos.....	24
4.1 Fragilidade Ambiental.....	24
4.2 Análise Estatística da Precipitação.....	25
4.3 Modelagem Hídrica.....	26
4.3.1 Etapas da Modelagem.....	28
4.3.2 Equação de Chuvas e Delimitação do Evento Extremo.....	31
4.4 Modelo HAND no Google Earth Engine.....	32
5. Infraestrutura Verde.....	34
6. Áreas de fragilidade ambiental.....	38
7. Áreas de Inundação.....	41
8. Resultados e Discussão.....	42
8.1 Análise Estatística da Precipitação: Boxplots, Estações Pluviométricas e Identificação de Eventos Extremos.....	42
8.2 Fragilidade Ambiental.....	50
8.3 Inundações.....	53
8.4 Simulação Hidrológica.....	54
8.5 Modelo HAND e cenários simulados.....	59
9. Conclusão.....	61
10. Referências Bibliográficas.....	63
11. Anexo.....	66

1. Introdução

O acelerado processo de urbanização nas cidades brasileiras, marcado pela ausência de planejamento territorial integrado, tem colocado a vegetação urbana como elemento estratégico para a promoção da resiliência socioambiental (Carvalho, 1982). Na Região Metropolitana de São Paulo, esse debate assume especial relevância diante da complexa dinâmica de suas áreas verdes, que englobam desde remanescentes de Mata Atlântica até parques lineares concebidos como infraestruturas de drenagem, desempenhando funções ecológicas e urbanísticas distintas (Benini; Martin, 2011). Entretanto, o padrão histórico de ocupação do território, caracterizado pela expansão desordenada e pela supressão de sistemas naturais, tem exacerbado a vulnerabilidade de extensas áreas aos desastres hidrológicos, sobretudo às inundações recorrentes (Campos et al., 2016). A literatura geográfica aplicada às bacias hidrográficas já destacava, desde Rodrigues e Adami (2005), que o entendimento integrado das dinâmicas físicas e antrópicas é fundamental para diagnosticar e tratar problemas hidrológicos em ambientes urbanizados.

As inundações, entendidas como processos hidrodinâmicos de transbordamento canalizado, representam um dos principais desafios para a gestão de cidades em regiões tropicais, particularmente em grandes metrópoles onde a impermeabilização do solo atinge índices superiores a 80% em determinadas sub-bacias (São Paulo, 2020). Nessas condições, a combinação entre eventos climáticos extremos e a degradação dos sistemas naturais de drenagem potencializa significativamente os impactos dos eventos de cheia. No contexto paulistano, a bacia hidrográfica do Rio Aricanduva se destaca como um território emblemático: com 100,4 km² de extensão, localizada na zona leste da cidade, a bacia apresenta um canal principal de aproximadamente 21 km e declividade média de 1,2%, sendo caracterizada por forte contraste entre suas áreas de cabeceira e seus trechos médio e inferior (EMPLASA, 2018).

Essa heterogeneidade interna é registrada por diversos estudos. Enquanto as porções de montante ainda mantêm setores com relativa permeabilidade, fragmentos de vegetação nativa e usos rurais, sobretudo nos distritos de São Mateus e São Rafael, as áreas intermediárias e de jusante são marcadas por intensa densificação urbana, ocupações consolidadas em várzeas e altas taxas de

impermeabilização, especialmente nos distritos de Vila Formosa, Cidade Líder e Jardim Nove de Julho (Simas; Rodrigues; Sant'Anna Neto, 2017). A esse cenário soma-se a presença de trechos canalizados no baixo curso, onde se observam inundações recorrentes associadas à insuficiência crônica dos sistemas convencionais de drenagem, projetados para eventos com período de retorno de apenas 2 anos, conforme aponta Tucci (2008).

Estudos recentes têm reforçado a importância de articular dimensões ambientais, sociais e urbanísticas na compreensão do risco de inundações em bacias hidrográficas densamente urbanizadas. Simas e Rodrigues (2020), ao mapearem a vulnerabilidade socioespacial em áreas suscetíveis a enchentes na cidade de São Paulo, demonstram que a sobreposição entre vulnerabilidade social e suscetibilidade hidrológica é particularmente crítica nas bacias urbanizadas da zona leste, como a do Aricanduva. Nessa perspectiva integrada, os parques lineares emergem como potenciais instrumentos de mitigação, atuando simultaneamente como infraestrutura verde e como elemento de drenagem sustentável, capazes de promover infiltração, retenção e retardamento do escoamento superficial, conforme orienta o IPT (2020).

O Parque Linear Aricanduva, inaugurado em 2012 como parte do Projeto Tietê¹, constitui um desses exemplos de intervenção urbanística multifuncional. Com 4,5 km de extensão e área aproximada de 425 mil m² (SMVA, 2018), o parque foi concebido para integrar gestão ambiental, controle de cheias e lazer comunitário, articulando funções ecológicas e hidrológicas ao longo do canal do rio Aricanduva. Sua posição estratégica em um dos trechos historicamente mais críticos da bacia possibilita avaliar sua contribuição real para a modificação do comportamento hidrológico local.

Diante disso, este estudo parte do pressuposto de que a análise integrada dos aspectos hidrológicos, urbanísticos e ambientais da bacia pode oferecer subsídios relevantes para compreender o papel dos parques lineares como instrumentos de controle de inundações em megalópoles tropicais. Ao articular o exame da dinâmica pluviométrica regional com a avaliação do desempenho

¹ O Projeto Tietê é um dos programas de recuperação ambiental da Região Metropolitana de São Paulo, iniciado em 1992 pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP). Seu objetivo central é a despoluição gradual do Rio Tietê e de seus afluentes, por meio da ampliação do sistema de coleta e tratamento de esgoto, recuperação de áreas degradadas e implantação de parques lineares ao longo das margens fluviais. O projeto foi estruturado em etapas, com investimentos sucessivos, e inclui não apenas ações de saneamento básico, mas também intervenções de drenagem urbana e requalificação ambiental, visando integrar controle de enchentes, preservação ambiental e melhoria da qualidade de vida urbana (SABESP, 2020).

hidrológico do Parque Linear Aricanduva, busca-se contribuir tanto para o avanço do conhecimento acadêmico sobre drenagem urbana sustentável quanto para o aprimoramento das políticas públicas de adaptação às mudanças climáticas. Em um cenário de intensificação de eventos extremos de precipitação, a compreensão detalhada da função das infraestruturas verdes no amortecimento do escoamento superficial assume caráter estratégico, permitindo quantificar sua contribuição efetiva para a atenuação de enchentes e subsidiar decisões técnicas e de planejamento em contextos urbanos complexos.

2. Objetivo

O presente estudo tem como objetivo central investigar em que medida o Parque Linear Aricanduva contribui para a redução de inundações na bacia hidrográfica do rio Aricanduva, localizada na região leste da cidade de São Paulo, particularmente durante eventos extremos de precipitação

2.1 Objetivos Específicos

- Comparar cenários hidrológicos com e sem o Parque Linear Aricanduva.
- Avaliar a eficiência do Parque Linear em termos de retenção e infiltração de águas pluviais
- Mapear e analisar as áreas de fragilidade ambiental da bacia
- Identificar as áreas urbanizadas mais vulneráveis às inundações.

3. Área de Estudo

A bacia hidrográfica do Rio Aricanduva (Figura 1), localizada na zona leste da cidade de São Paulo, constitui uma das unidades de drenagem urbanas mais críticas e emblemáticas da Região Metropolitana. Com aproximadamente 100,4 km² de extensão (Prefeitura de São Paulo, 2020), essa bacia sintetiza os desafios típicos enfrentados por áreas urbanas tropicais densamente ocupadas, reunindo uma complexa interação entre fatores naturais e processos antrópicos.

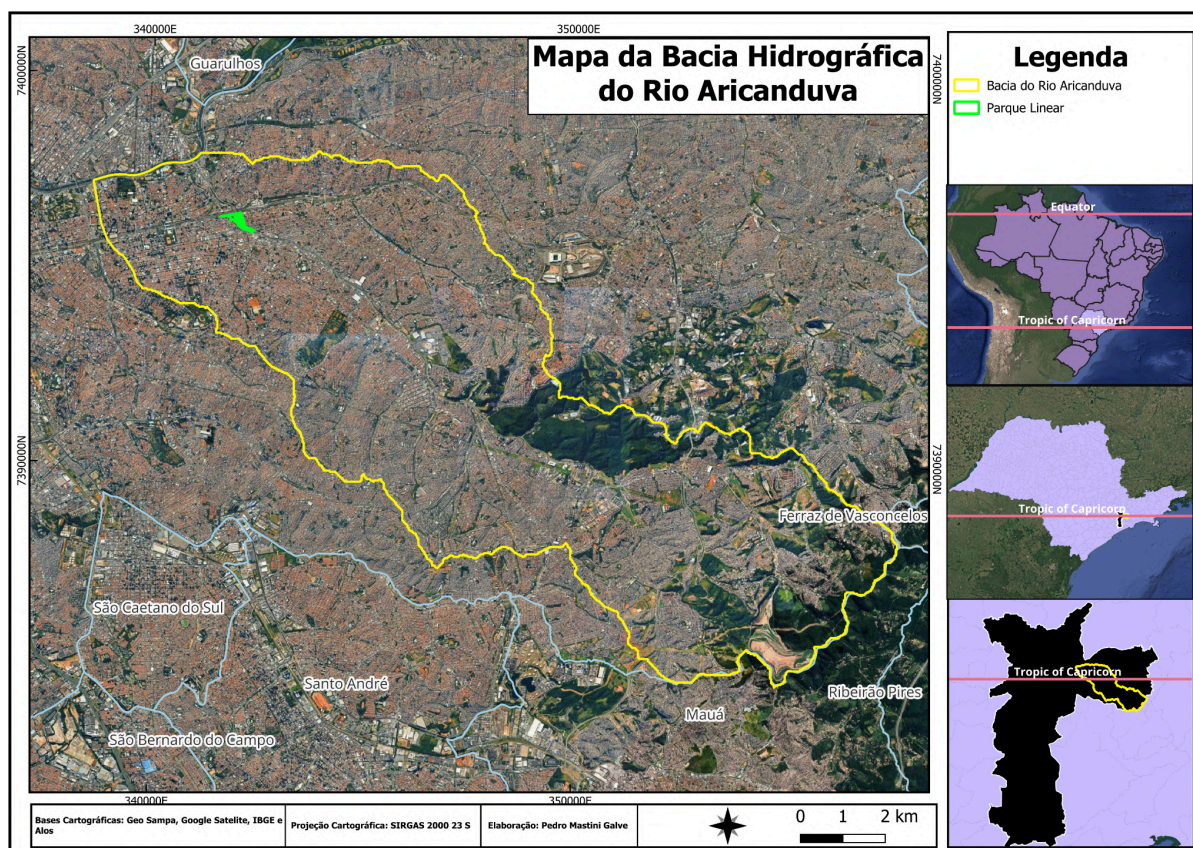


Figura 1: Mapa da Bacia do Rio Aricanduva.

Seu canal principal possui cerca de 21 km de extensão e declividade média de 1,2% (EMPLASA, 2018), sendo formado por nascentes situadas nos distritos de São Rafael e São Mateus. Nessa porção superior, ainda persistem remanescentes vegetacionais e usos do solo de caráter suburbano, o que contribui, ainda que parcialmente, para a regulação do ciclo hidrológico local. No entanto, à medida que o rio avança em direção aos trechos médio e inferior da bacia, observa-se uma intensificação da ocupação urbana, particularmente nos distritos de Cidade Líder, Vila Formosa e Jardim Nove de Julho, onde os índices de impermeabilização ultrapassam 80% (SÃO PAULO, 2020). Essa ocupação é marcada pela canalização dos corpos d'água, supressão de mata ciliar e ausência de infraestrutura de drenagem eficiente, agravando os riscos de transbordamentos e enchentes recorrentes (SIMAS et al., 2017).

É neste contexto que se insere o Parque Linear Aricanduva, implantado em 2012 como parte do Projeto Tietê. Com aproximadamente 4,5 km de extensão ao longo do curso do rio e área total de 425 mil m², o parque representa uma importante iniciativa de infraestrutura verde multifuncional na capital paulista (SVMA, 2018). Dentre suas principais intervenções, destacam-se as bacias de retenção

com capacidade para 150 mil m³, as áreas de infiltração e a recomposição vegetal, que cobre cerca de 30% de sua superfície. Além disso, foram plantadas mais de 20 mil árvores nativas como parte do processo de requalificação ambiental (SVMA, 2018).

3.1 Aspectos Físicos

3.1.1 Pedologia

O mapa pedológico da bacia do Rio Aricanduva (Figura 2) constitui uma ferramenta fundamental para a compreensão da distribuição e das características dos solos que compõem a região. Elaborado com base no mapa pedológico do Estado de São Paulo, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), o levantamento revela uma diversidade significativa de classes pedológicas ao longo da bacia.

Em diversas áreas da bacia, predominam solos formados por argilas, areias e cascalhos, associados às formações geológicas São Paulo e Caçapava. Esses solos são, em geral, bem drenados e apresentam capacidade moderada a alta de retenção hídrica, sendo considerados versáteis e apropriados para uma variedade de usos, como agricultura, silvicultura e infraestrutura urbana. Segundo a Embrapa (2021), solos de textura média ou argilosos com boa estrutura física apresentam elevado potencial de retenção de água e nutrientes, contribuindo para seu aproveitamento sustentável em diferentes contextos de uso do solo.

De forma mais expressiva, observa-se a presença de solos derivados de migmatitos e gnaisses graníticos, os quais possuem textura que varia de arenosa a argilosa e alta concentração de minerais. Essas características também os tornam aptos para uma ampla gama de usos, embora sua estabilidade possa depender de práticas adequadas de manejo, especialmente em áreas com relevo mais acidentado (Embrapa (2021)).

Ao longo do leito principal do rio Aricanduva e de seus afluentes, são frequentes os solos aluviais fluviais, compostos por sedimentos recentes de areia, argila e cascalho, depositados por processos hidrodinâmicos. Embora esses solos sejam, em geral, férteis e bem drenados, sua localização em áreas de várzea os torna particularmente vulneráveis a processos erosivos e a inundações periódicas, o que exige cautela em sua ocupação e uso.

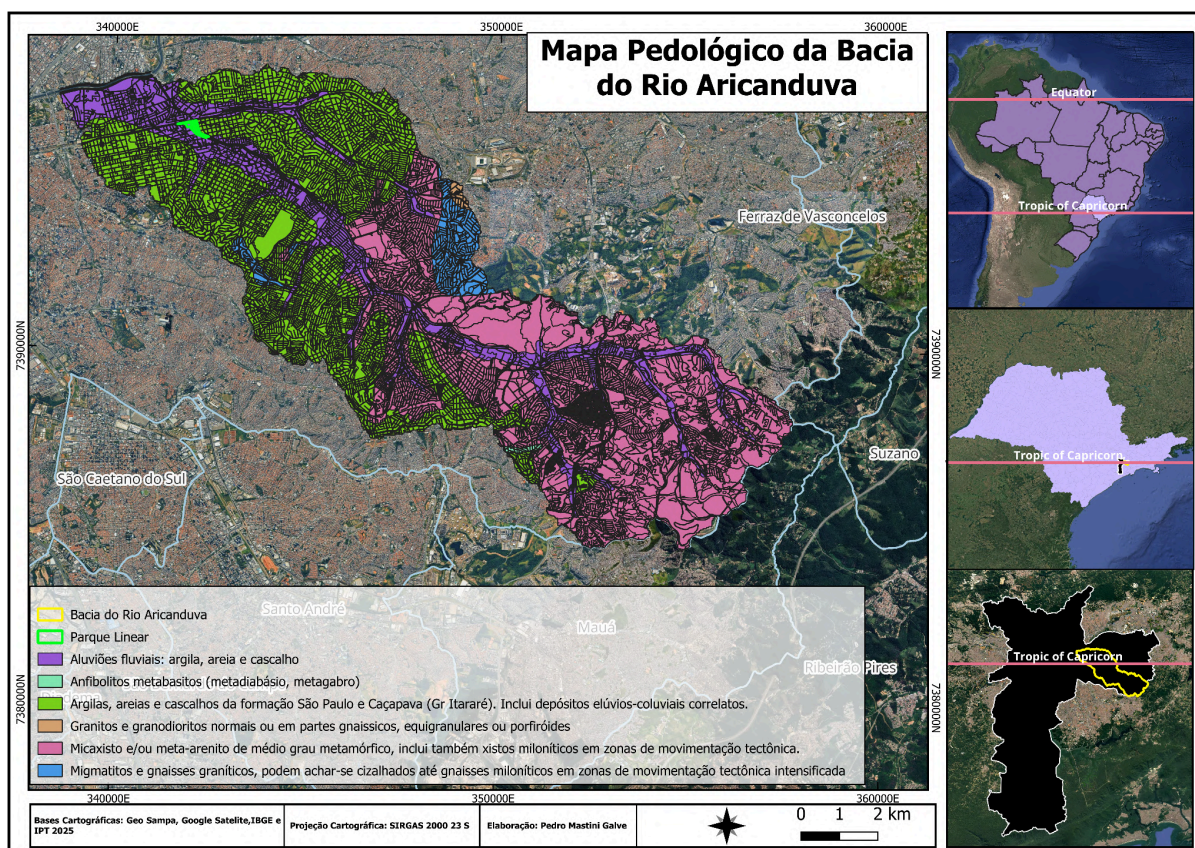


Figura 2: Mapa Pedológico da Bacia do Rio Aricanduva.

3.1.2 Relevo

Pedro e Nunes (2013) destacam a estreita relação entre as características do relevo e a ocorrência de inundações (Figura 3), enfatizando a importância da morfodinâmica do terreno no comportamento das águas pluviais. Áreas com relevo suavizado, como planícies aluviais e fundos de vale, tendem a apresentar maior suscetibilidade a inundações, sobretudo durante episódios de chuvas intensas. Nessas regiões, a ocupação urbana inadequada, somada à impermeabilização do solo e à obstrução dos cursos d'água, acelera e concentra o escoamento superficial, reduzindo a capacidade de absorção e intensificando os eventos de inundação.

Nesse sentido, compreender a dinâmica do relevo torna-se essencial para o planejamento urbano e ambiental responsável. A preservação de várzeas e a implementação de sistemas de drenagem eficientes são apontadas pelos autores como estratégias fundamentais na redução da vulnerabilidade hidrológica. A proteção de áreas verdes, especialmente matas ciliares, contribui para a infiltração da água no solo, funcionando como barreira natural ao escoamento superficial e reduzindo significativamente o risco de enchentes (Pedro e Nunes, 2013). Além

disso, os autores ressaltam a importância do controle do uso do solo em áreas suscetíveis a inundações, evitando ocupações em zonas críticas e promovendo práticas sustentáveis de urbanização. A restauração de ecossistemas degradados fortalece a resiliência natural do ambiente, e sistemas de alerta precoce e monitoramento meteorológico tornam-se ferramentas indispensáveis para reduzir os impactos de eventos hidrológicos extremos. A educação ambiental da população, segundo os mesmos autores, é outro componente-chave para a formação de uma cultura de segurança hídrica nas cidades.

No caso específico da bacia do rio Aricanduva, a uma complexa configuração topográfica, com amplitude altimétrica de aproximadamente 200 metros ao longo de uma extensão de 19 km no sentido noroeste-sudeste. Essa variação altitudinal está intimamente ligada à geologia local e aos processos paleoclimáticos do Quaternário, que contribuíram para a heterogeneidade geomorfológica da área. Observa-se, nas porções a montante, a presença de um padrão geomórfico mamelonar associado ao maciço granítico de Itaquera. Já nos trechos médio e inferior do rio, o relevo torna-se progressivamente mais plano, com desníveis reduzidos que não ultrapassam 30 metros entre a foz e as proximidades do Shopping Aricanduva, apesar da grande extensão do trecho. Esse alisamento do relevo favorece o acúmulo de águas pluviais e agrava os riscos de inundação em períodos de alta precipitação.

Apesar da relevância dessa bacia no contexto urbano-metropolitano de São Paulo a uma carência de estudos sistemáticos sobre a compartimentação do relevo da região. Investigações clássicas realizadas por Aroldo de Azevedo e Fernando F. M. de Almeida já haviam identificado feições geomorfológicas singulares, como o contato abrupto entre os sedimentos terciários e o embasamento cristalino do complexo granítico. Tais elementos reforçam a necessidade de abordagens geográficas integradas para compreender as dinâmicas físicas que influenciam os processos hidrológicos e o ordenamento territorial na bacia do Aricanduva.

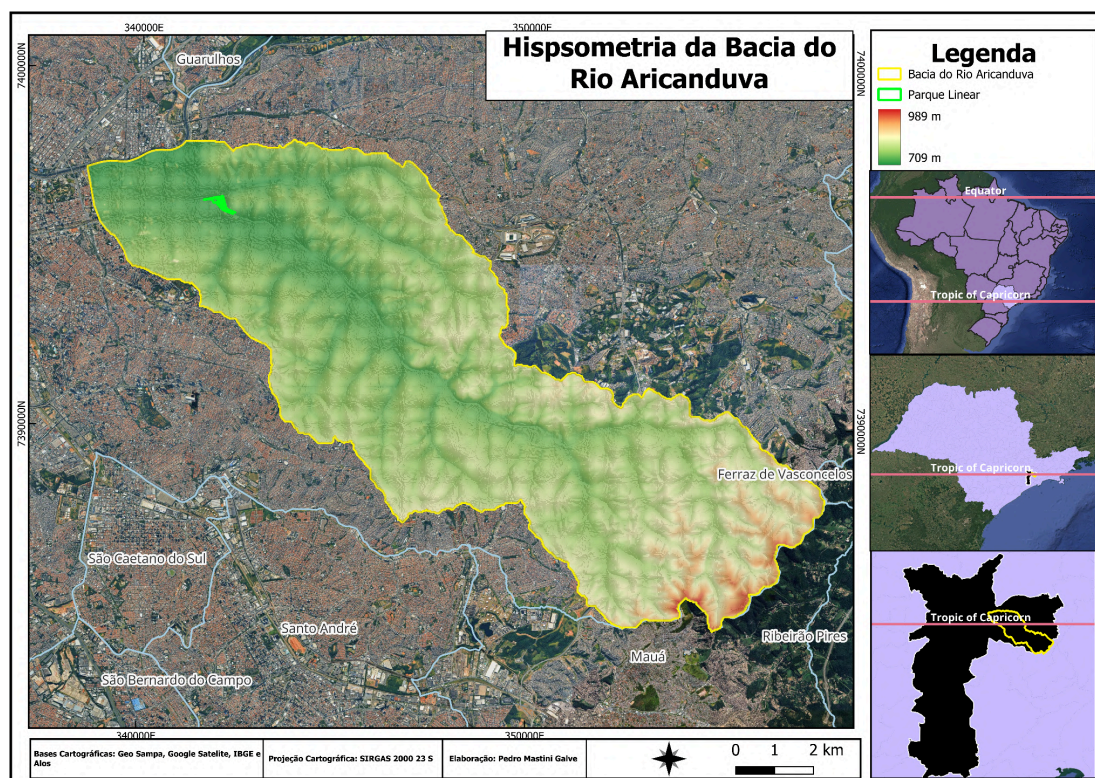


Figura 3: Mapa hipsométrico da Bacia do Rio Aricanduva.

3.1.3 Urbanização

A urbanização acelerada da cidade de São Paulo ao longo do século XX teve impactos sobre o funcionamento hidrodinâmico da paisagem, resultando em uma série de desequilíbrios ambientais. Segundo Nakamura e Manfredini (2006), esse processo, marcado pela expansão urbana desordenada e pela ausência de planejamento técnico adequado, alterou profundamente as dinâmicas naturais do território, intensificando problemas como enxurradas, inundações, alagamentos, deslizamentos e poluição hídrica.

A substituição de áreas permeáveis por superfícies impermeáveis, decorrente da construção de edifícios, estradas e infraestrutura urbana, promoveu o aumento expressivo do escoamento superficial, reduzindo a capacidade de infiltração da água no solo e contribuindo diretamente para a recorrência de inundações. Na bacia do rio Aricanduva, essas transformações foram agravadas pela ocupação intensiva de áreas de várzea e pela canalização dos córregos, práticas que, somadas à supressão da vegetação ciliar, comprometeram a capacidade natural da paisagem de absorver e regular o fluxo hídrico (Nakamura e Manfredini, 2006).

A expansão urbana desordenada, historicamente marcada pela aprovação de loteamentos sem um planejamento urbano integrado e sem normas claras sobre

drenagem, permeabilidade ou ocupação de áreas de risco, tem sido identificada como um dos principais fatores que intensificam os riscos hidrológicos. Segundo Sanches Brito et al. (2020), o crescimento urbano no Brasil frequentemente ocorre “sem cumprimento das normas de uso e ocupação do solo, em áreas de várzeas e zonas de risco de deslizamentos”, impactando de forma negativa projetos de drenagem e justificativas urbanísticas, com consequentes acúmulos de água, instabilidade em vertentes e assoreamento de cursos d’água. Essa negligência compromete não apenas a segurança das populações, mas também a sustentabilidade ambiental no longo prazo.

Com base nos dados de uso e ocupação do solo disponibilizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT, 2023), foi possível segmentar a bacia hidrográfica do rio Aricanduva em 11 sub-bacias, o que viabilizou uma análise espacial detalhada da distribuição da urbanização na região. A modelagem hidrológica, realizada por meio do software HEC–HMS, permitiu correlacionar o grau de urbanização com o comportamento das cheias, evidenciando como a expansão urbana contribui para o aumento dos picos de vazão e para a redução do tempo de resposta dos eventos de inundação. O gráfico (Figura 4) e o mapa (Figura 5), derivados desta análise, ilustram a configuração espacial da urbanização na bacia, destacando os trechos mais densamente ocupados e aqueles que ainda preservam certa permeabilidade ambiental, o parque linear está entre as sub-bacias 11, 10 e 1. Essa base empírica é fundamental para investigar os impactos diretos da urbanização desordenada sobre eventos hidrológicos extremos.

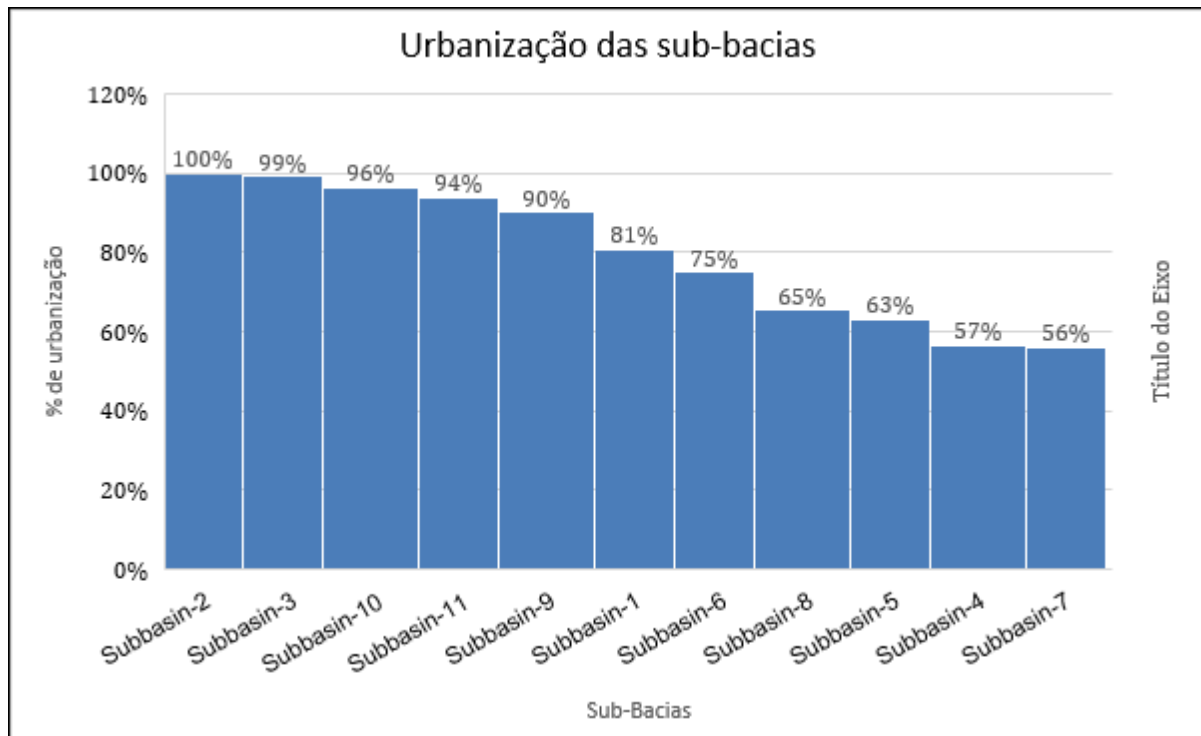


Figura 4: Porcentagem de área urbanizada na bacia do Rio Aricanduva.

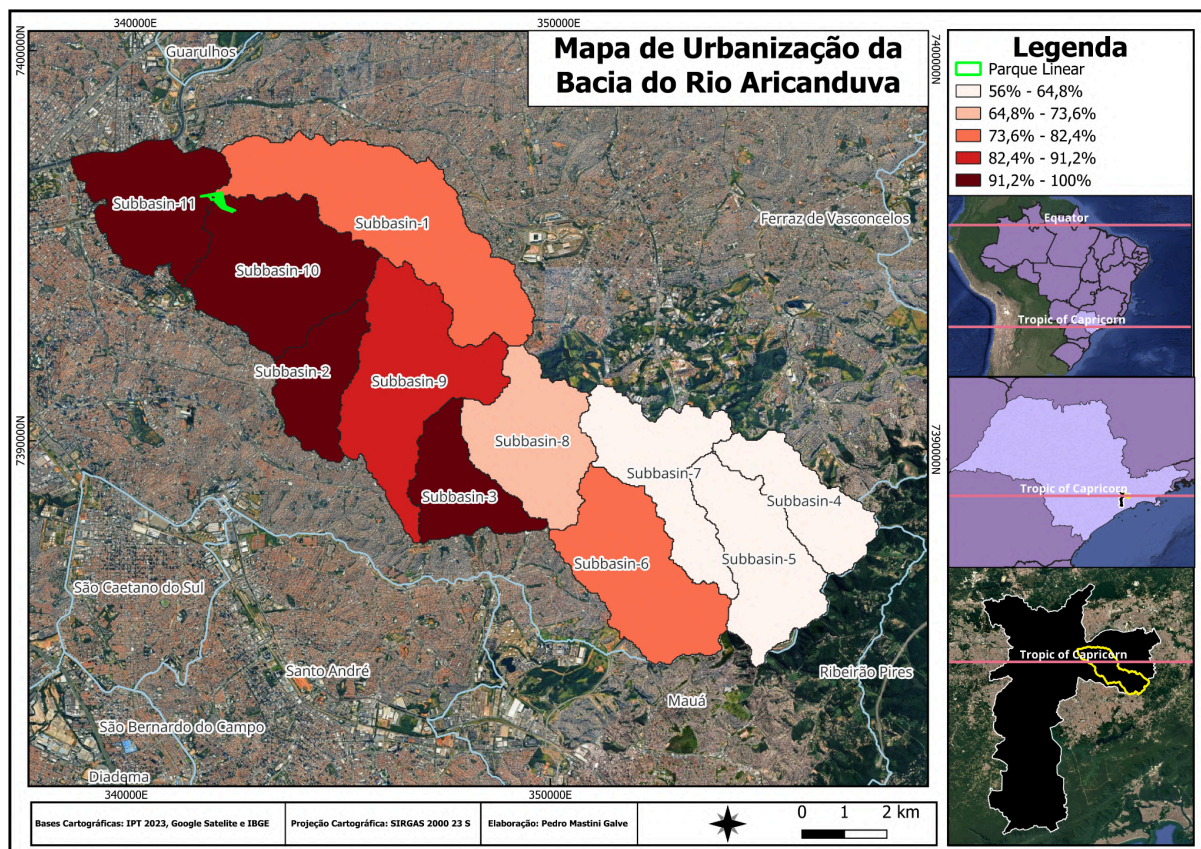


Figura 5: Mapa da área urbanizada da Bacia do Rio Aricanduva.

3.1.4 Caracterização Climática

A Bacia Hidrográfica do Rio Aricanduva insere-se originalmente no domínio do clima tropical úmido de altitude, correspondente à classificação Cwa de Köppen-Geiger, com verões quentes e chuvosos e invernos mais amenos e secos. No entanto, quando analisada à luz da classificação proposta por Tarifa e Armani (2001) para a cidade de São Paulo, observa-se que a região da bacia apresenta a sobreposição entre climas naturais e climas antropizados. Os climas naturais decorrem das condições físicas originais do relevo e da circulação atmosférica regional, enquanto os climas antropizados resultam da intensa urbanização, que promove a impermeabilização do solo, a supressão da vegetação e a verticalização. Essa combinação tem produzido modificações significativas no microclima local, caracterizadas pela formação de ilhas de calor urbano, alterações na umidade relativa do ar e intensificação de eventos pluviométricos extremos. Assim, a dinâmica climática da bacia do Aricanduva reflete não apenas os condicionantes naturais, mas também os efeitos cumulativos da ação antrópica sobre o ambiente urbano. Segundo Silva (2010), análises das séries históricas de pluviosidade (1933–2009 para São Paulo e 2004–2009 para a bacia do Aricanduva) já indicavam um aumento nos eventos extremos de chuva (Figura 6). Projeções climáticas apontam que, caso haja um aumento de 2°C a 3°C na temperatura média da região até o final do século, poderá ocorrer um dobro de dias com precipitação superior a 10 mm, intensificando o risco de enchentes e inundações. Tais projeções evidenciam a necessidade de incorporar os dados climáticos no planejamento territorial e na formulação de estratégias adaptativas.

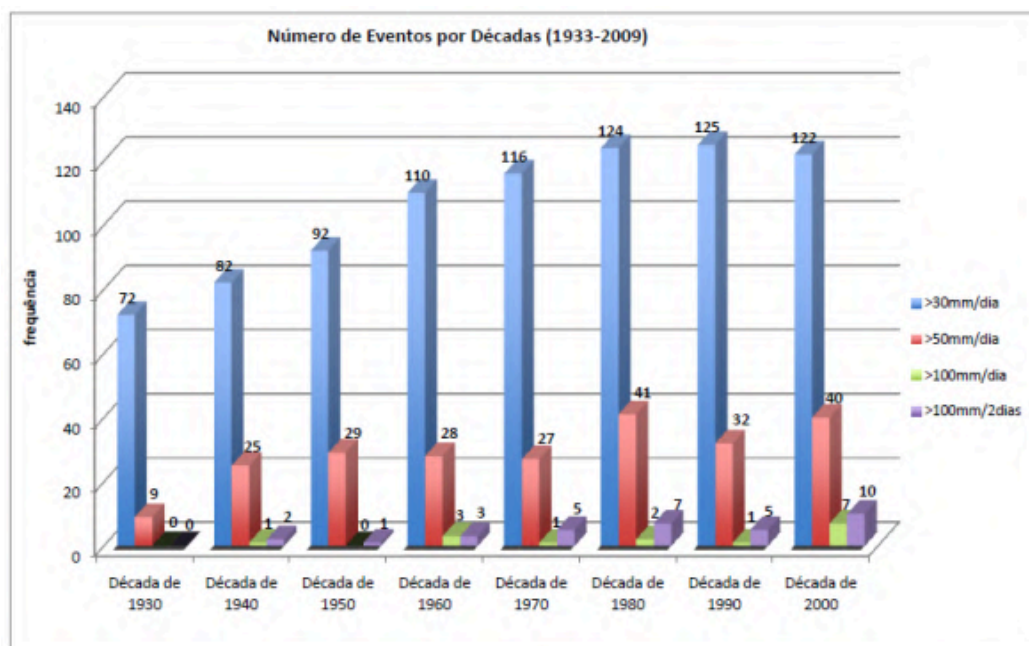


Figura 6: Análise dos eventos extremos de precipitação na cidade de São Paulo no período de 1933 a 2009. Fonte: IAG/USP, Elaboração: Silva (2010)

Além disso, estudos de clima urbano realizados por Reis (2024) revelam como a produção desigual do espaço urbano, expressa nas diferenças de renda, padrão construtivo e cobertura vegetal, acentua as disparidades microclimáticas entre diferentes áreas da cidade. As zonas com maior densidade populacional, infraestrutura precária e carência de áreas verdes, características comuns em partes da bacia do Aricanduva, apresentam temperaturas mais elevadas, menor umidade e maior exposição a eventos hidrometeorológicos extremos. Esse cenário é agravado pela impermeabilização do solo e pela supressão de vegetação nativa.

A análise microclimática de Reis (2024) reforça que áreas com maior cobertura vegetal, mesmo inseridas em territórios socialmente vulneráveis, demonstram menor temperatura do ar em comparação com o entorno. Esses espaços funcionam como “ilhas de resfriamento”, mitigando parte dos efeitos das ilhas de calor urbano e oferecendo resiliência climática local.

Nesse contexto, a Bacia do Aricanduva apresenta vulnerabilidades climáticas acentuadas, associadas tanto às características topográficas da região quanto à sua ocupação urbana. A predominância de áreas urbanizadas impermeáveis, a presença de assentamentos precários em zonas de risco e a limitada arborização urbana contribuem para agravar os efeitos das mudanças climáticas, afetando principalmente populações de baixa renda (Silva, 2010; Reis, 2024).

3.1.5 Caracterização da População da Bacia Hidrográfica do Rio Aricanduva e Vulnerabilidade Social

A bacia hidrográfica do rio Aricanduva localiza-se na porção leste do município de São Paulo, inserida em um contexto urbano altamente consolidado e densamente ocupado. A área abrange total ou parcialmente diversos distritos da zona leste, configurando-se como um importante eixo histórico de expansão urbana da metrópole paulistana. De acordo com os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a bacia apresenta predominância absoluta de população urbana, com taxas de urbanização próximas à totalidade da população residente (IBGE, 2010; IBGE, 2023).

Segundo o Censo Demográfico de 2010, a região da bacia do Aricanduva caracteriza-se por elevado adensamento populacional, com densidades superiores à média do município de São Paulo em diversos setores censitários (IBGE, 2010). Esse padrão reflete um processo de urbanização acelerado, marcado pela ocupação intensiva do solo, pela verticalização pontual e pela redução progressiva de áreas naturais e espaços livres. A consolidação urbana ocorreu, em grande parte, sem a devida integração entre planejamento territorial e dinâmica ambiental, contribuindo para a intensificação da impermeabilização do solo e para a modificação da rede de drenagem natural.

A distribuição espacial da população, analisada a partir das informações por setores censitários, evidencia forte continuidade do tecido urbano ao longo dos fundos de vale e das áreas adjacentes aos cursos d'água, muitos dos quais se encontram atualmente canalizados (IBGE, 2010; IBGE, 2024). Esse padrão de ocupação é particularmente relevante para a análise hidrológica da bacia, uma vez que amplia a exposição direta da população a eventos de alagamento e inundação associados a episódios de precipitação intensa.

Do ponto de vista socioeconômico, os dados do IBGE indicam que a bacia do rio Aricanduva apresenta heterogeneidade interna, com a coexistência de setores com melhores indicadores de renda, escolaridade e acesso à infraestrutura urbana, e áreas com maiores fragilidades sociais (IBGE, 2010). Em setores mais vulneráveis, observa-se maior densidade de moradores por domicílio, rendimentos médios mais baixos e maior dependência de serviços públicos, condições que

potencializam os impactos de eventos hidrológicos extremos sobre a população residente.

A estrutura etária da população da bacia segue o padrão típico de áreas urbanas consolidadas, com predominância da população em idade economicamente ativa, acompanhada por contingentes expressivos de crianças e idosos (IBGE, 2023). A presença desses grupos etários reforça a necessidade de análises integradas, uma vez que eventos de inundação tendem a afetar de forma mais severa populações com maior grau de dependência social e menor capacidade de mobilidade.

De modo geral, a caracterização populacional da bacia do rio Aricanduva, fundamentada nos dados censitários do IBGE, evidencia uma estreita relação entre densidade populacional elevada, padrão de ocupação urbana consolidado e aumento da exposição a riscos hidrológicos. Esses elementos reforçam a importância de incorporar a dimensão demográfica e social às análises hidrológicas e ambientais, especialmente em bacias urbanas sujeitas a eventos extremos cada vez mais frequentes.

A vulnerabilidade socioambiental da população residente na bacia do rio Aricanduva resulta da interação entre fatores sociais, econômicos e ambientais, intensificados pelo elevado grau de urbanização e pela ocupação histórica de áreas naturalmente suscetíveis a inundações. De acordo com os dados do IBGE, parcela significativa da população encontra-se distribuída em setores censitários localizados próximos aos fundos de vale e aos principais eixos de drenagem, áreas que apresentam maior propensão a alagamentos e transbordamentos fluviais (IBGE, 2010; IBGE, 2024).

Os indicadores socioeconômicos revelam que setores com menor renda média domiciliar e maior adensamento populacional tendem a coincidir com áreas de maior exposição ao risco hidrológico, configurando um quadro de sobreposição entre vulnerabilidade social e vulnerabilidade ambiental (IBGE, 2010). Nessas áreas, eventos de inundação produzem impactos mais severos, incluindo perdas materiais recorrentes, interrupção da mobilidade urbana, comprometimento da infraestrutura básica e riscos à saúde pública.

A estrutura etária da população também constitui um fator relevante de vulnerabilidade, uma vez que crianças e idosos apresentam maior sensibilidade a situações de emergência e menor capacidade de resposta frente a eventos

extremos (IBGE, 2023). A concentração desses grupos em áreas sujeitas a inundações amplia a complexidade da gestão do risco e reforça a necessidade de estratégias preventivas integradas.

Nesse contexto, a análise da vulnerabilidade socioambiental da população da bacia do rio Aricanduva evidencia que os impactos das inundações não se distribuem de forma homogênea no território. A combinação entre elevada densidade populacional, desigualdades socioeconômicas e intensa impermeabilização do solo torna determinados setores da bacia especialmente sensíveis a eventos de chuva intensa. Assim, a incorporação de informações populacionais e socioeconômicas aos modelos hidrológicos constitui um elemento fundamental para o planejamento urbano, a gestão de riscos e a proposição de soluções baseadas na natureza, como parques lineares e áreas verdes multifuncionais, voltadas à redução da vulnerabilidade socioambiental e ao aumento da resiliência urbana.

4. Materiais e Métodos

O presente estudo adotou uma abordagem metodológica integrada que combina a análise da fragilidade ambiental (Ross, 1994) com técnicas avançadas de modelagem hidrológica, análise estatística de precipitações intensas e geoprocessamento. A metodologia de Ross, originalmente desenvolvida para diagnosticar problemas ambientais na região da Grande São Paulo, será aplicada em quatro dimensões complementares.

4.1 Fragilidade Ambiental

Primeiramente, a análise da fragilidade ambiental será empregada para identificar áreas suscetíveis a inundações na bacia do Aricanduva, considerando critérios como declividade do terreno, (ALOS PALSAR, 2022), tipos de solo (EMBRAPA 2018), cobertura vegetal (MAPBIOMAS, 2023) e grau de urbanização (MAPBIOMAS, 2023). Esta etapa permitirá mapear setores críticos onde a ação do Parque Linear pode ser mais significativa na mitigação de inundações. Em segundo lugar, a metodologia orientará a avaliação da ocupação do território, distinguindo áreas adequadas para intervenções antrópicas daquelas que demandam preservação devido à sua fragilidade ambiental intrínseca.

A terceira aplicação consistirá na análise integrada das interações entre elementos naturais (relevo, solos, hidrografia) e antrópicos (sistemas de drenagem, ocupação irregular), proporcionando uma compreensão sistêmica dos processos hidrológicos na bacia. Por fim, a hierarquização dos ambientes conforme sua dinâmica e fragilidade permitirá direcionar estratégias de gestão territorial, compatibilizando a preservação ambiental com o desenvolvimento urbano sustentável.

4.2 Análise Estatística da Precipitação

A análise estatística da precipitação constituiu uma etapa essencial para a compreensão do comportamento hidrológico da Bacia do Rio Aricanduva, sendo indispensável para a calibração e a validação dos modelos hidrológicos aplicados nesta pesquisa. O procedimento teve como finalidade identificar padrões sazonais, variações interanuais e a ocorrência de eventos extremos de chuva, os quais influenciam diretamente a dinâmica de escoamento superficial e o risco de inundações.

Para tanto, foram utilizados dados históricos de precipitação mensal acumulada provenientes de sete estações pluviométricas do Centro de Gerenciamentos de Emergências climáticas da Prefeitura e São Paulo (CGE), situadas no entorno da bacia hidrográfica do Rio Aricanduva. As séries temporais abrangem o período de 2014 a 2024, variando de acordo com a disponibilidade de registros de cada estação. A escolha dessas séries foi motivada pela necessidade de se trabalhar com um recorte temporal suficientemente amplo, capaz de capturar tanto as regularidades do regime pluviométrico quanto a incidência de anomalias climáticas.

Os dados foram processados por meio de estatística descritiva e representados graficamente através de boxplots, técnica que permite visualizar a distribuição dos valores mensais em função de medidas de tendência central (mediana), dispersão (quartis e intervalo interquartil) e ocorrência de valores discrepantes (outliers). A presença de outliers foi considerada indicativa de episódios de precipitação potencialmente extremos, que podem alterar substancialmente a resposta hidrológica da bacia.

Além disso, os gráficos incorporaram duas linhas auxiliares: a média geral do período analisado, representada por linha tracejada, e a média mensal suavizada,

indicada por linha contínua. Esses elementos adicionais forneceram uma visão mais clara do regime sazonal típico da Região Metropolitana de São Paulo, possibilitando identificar os meses de maior concentração pluviométrica, bem como a variabilidade intra e interanual do regime de chuvas.

Dessa forma, a análise estatística da precipitação não apenas subsidiou a construção dos cenários hidrológicos utilizados na modelagem, como também serviu de base para a identificação das condições críticas de precipitação que orientaram as simulações comparativas entre cenários com e sem a presença do Parque Linear Aricanduva.

4.3 Modelagem Hídrica

A modelagem hidrológica tem se consolidado como uma ferramenta essencial no suporte à tomada de decisões voltadas à prevenção e controle de desastres associados a eventos hidrológicos extremos, especialmente inundações. De acordo com Mariano e Falcetta (2021), esse tipo de modelagem permite a simulação do comportamento do escoamento superficial em diferentes cenários, sendo útil na previsão de inundações, na identificação de áreas de risco, na avaliação do impacto de intervenções urbanas e na orientação de estratégias para o planejamento urbano sustentável.

Por meio da modelagem, é possível antecipar níveis de vazão e volume de escoamento em situações de precipitação intensa, o que viabiliza a implementação de medidas preventivas, sistemas de alerta e respostas emergenciais adequadas. A identificação de áreas vulneráveis à inundação, outra aplicação fundamental da modelagem hidrológica, facilita a delimitação de zonas críticas e a priorização de intervenções estruturais e não estruturais de mitigação de riscos.

Além disso, a simulação hidrológica contribui para a análise do impacto de obras e intervenções urbanas, como a construção de sistemas de drenagem, parques lineares e outras infraestruturas verdes. Com a avaliação de diferentes cenários, com e sem tais intervenções, é possível estimar a eficácia das soluções adotadas na atenuação de picos de vazão e no controle do escoamento superficial. A modelagem, portanto, assume um papel estratégico na formulação de políticas públicas voltadas à resiliência urbana e ao uso sustentável dos recursos hídricos.

Mariano e Falcetta (2021) alertam que os efeitos da urbanização intensificada sobre o ambiente hidrológico são expressivos, especialmente em bacias

hidrográficas urbanas. No caso da Bacia do Córrego do Pinheirinho, investigada por esses autores, observou-se que a impermeabilização progressiva do solo, resultante da substituição da vegetação por edificações, vias pavimentadas e infraestrutura urbana, reduz significativamente a capacidade de infiltração e aumenta o volume de escoamento superficial. Esse fenômeno gera maior concentração de água nos canais de drenagem em períodos curtos, elevando a frequência e intensidade das inundações.

Outro impacto da urbanização é a redução do tempo de concentração do escoamento. Com a ausência de áreas permeáveis e a construção de redes de drenagem rápida, a água da chuva alcança os corpos d'água com maior velocidade, aumentando o risco de transbordamentos e sobrecarga nos sistemas de contenção. Esse processo está associado a alterações significativas na morfologia do escoamento e nos regimes hidrológicos das bacias urbanas. Paralelamente, o carreamento de poluentes urbanos compromete a qualidade da água, ampliando os impactos ambientais e sanitários.

Para este estudo, foi realizada a simulação de dois cenários na Bacia do Rio Aricanduva, um cenário com o parque linear do Aricanduva e outro cenário sem o parque linear, com o objetivo de analisar a influência do Parque Linear sobre a dinâmica das inundações. A caracterização de um evento pluviométrico como extremo pode ser fundamentada a partir de limiares críticos de intensidade.

De acordo com o CLIMAAX CRA Handbook (2024), documento técnico voltado à avaliação de riscos climáticos e elaborado com base em dados empíricos de impactos urbanos, precipitações de 20 mm em 30 minutos já são consideradas de alto impacto, enquanto 30 mm no mesmo intervalo representam chuvas de impacto muito elevado. Assim, um evento com 40 mm em 30 minutos, que foi utilizado para a modelagem, excede substancialmente esses limiares, configurando-se como um episódio extremo, com potencial para desencadear inundações, sobrecarga de sistemas de drenagem e impactos socioeconômicos significativos (CLIMAAX CRA HANDBOOK, 2024). A primeira modelagem considera o parque existente, com suas áreas vegetadas, zonas de infiltração e estruturas de retenção hídrica; a segunda simula a ausência do parque. A comparação dos resultados permite avaliar em que medida o parque contribui para a diminuição das enchentes e a atenuação dos picos de vazão.

Ainda que a modelagem não contemple dados referentes aos reservatórios de contenção (“piscinões”) existentes na bacia, por limitações de acesso a essas informações, essa ausência será uniforme nos dois cenários simulados. Dessa forma, as comparações entre os modelos com e sem o parque linear permanecem válidas, uma vez que a variável de controle, a presença dos piscinões, é mantida constante. Mesmo com as dificuldades de obtenção de dados complexos, os modelos empregados devem gerar resultados robustos e confiáveis para fins de análise comparativa.

São considerados parâmetros como a capacidade de infiltração dos solos, a densidade de cobertura vegetal e a presença de áreas permeáveis. Esses elementos são cruciais para orientar o manejo das águas pluviais e o planejamento urbano em regiões altamente vulneráveis a inundações. A aplicação da modelagem hidrológica no contexto da Bacia do Rio Aricanduva representa uma abordagem fundamental para compreender a relação entre infraestrutura verde e redução de riscos hidrológicos. Considerando os efeitos cumulativos da urbanização intensiva, essa ferramenta permite não apenas avaliar cenários de risco, mas também embasar decisões voltadas à gestão sustentável dos recursos hídricos, à segurança hídrica e à promoção de uma cidade mais resiliente e adaptada às mudanças climáticas.

4.3.1 Etapas da Modelagem

A modelagem hidrológica de uma bacia hidrográfica compreende uma sequência de procedimentos técnicos e metodológicos que visam representar, de forma simplificada, a dinâmica do escoamento superficial em resposta a diferentes cenários de precipitação e uso do solo. No presente estudo, a Bacia do Rio Aricanduva foi utilizada como unidade de análise, sendo submetida a uma série de etapas que envolveram desde a obtenção de dados topográficos até a simulação de cenários com e sem a presença do Parque Linear.

Inicialmente, foi utilizado a imagem MDE do satélite ALOS, permitindo a identificação da rede de drenagem e o delineamento da bacia. Posteriormente, foi utilizado o software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System), ferramenta amplamente adotada para simulações hidrológicas em ambientes urbanos e rurais. Com o uso desse software, a bacia do Aricanduva

foi subdividida em 11 sub-bacias, o que possibilitou uma análise mais refinada da variabilidade espacial dos parâmetros hidrológicos (Figura 8).

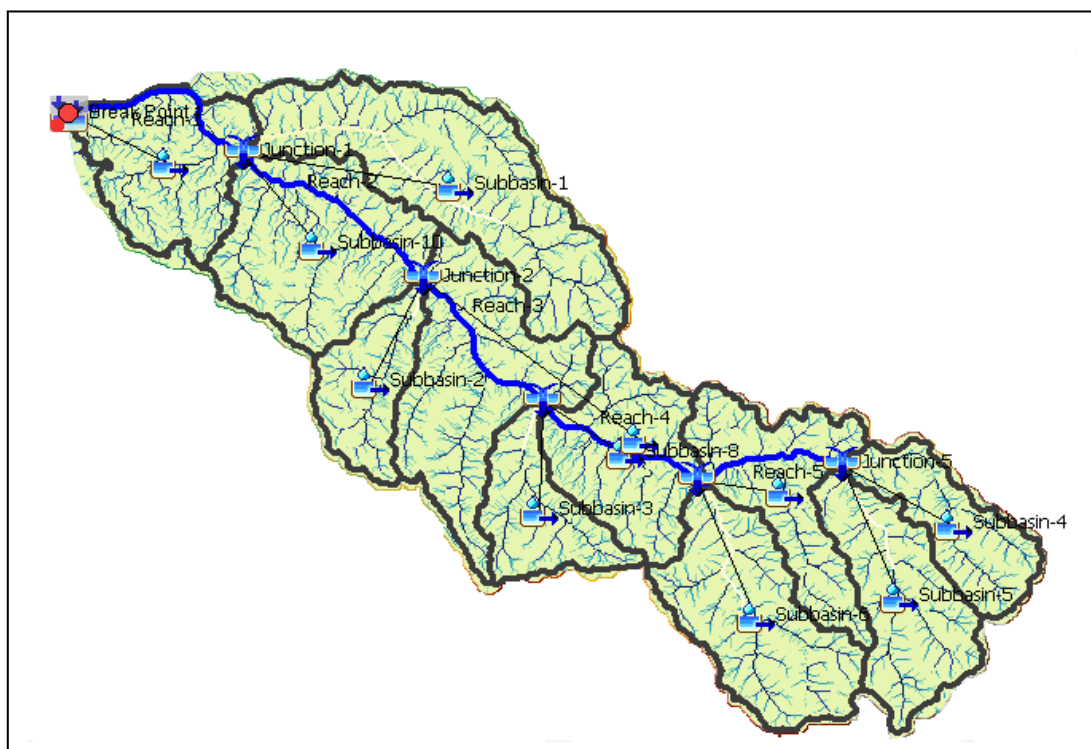


Figura 8: Divisão da bacia hidrográfica do Aricanduva no HEC-HMS.

Após a subdivisão, foi necessário atribuir valores do parâmetro CN (Curve Number) a cada sub-bacia. Segundo Nagel et al. (2020), o CN é um valor empírico que representa a capacidade de uma superfície em reter ou escoar a água da chuva, sendo influenciado diretamente pelo tipo de solo, uso do solo, cobertura vegetal e umidade antecedente. Trata-se de um dos parâmetros fundamentais em modelos como o HEC-HMS, sendo utilizado para estimar o escoamento superficial direto a partir dos excedentes de precipitação.

Para a definição dos valores de CN, foi utilizada a carta de uso e ocupação do solo da cidade de São Paulo, disponibilizada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (2018). As classes selecionadas para representar a área urbanizada incluíram: Área Urbanizada Estável (AUE), Rodovias, Cemitério (CEM), Solo Exposto (SE), Aglomeração Subnormal (AS) e Mineração (M). Com base nessas classes, foi possível calcular a taxa de urbanização de cada sub-bacia, fator que impacta diretamente nos índices de impermeabilização e, consequentemente, no volume e velocidade do escoamento superficial.

A importância da consideração da urbanização na modelagem hidrológica é amplamente discutida por Mariano e Falcetta (2021), os quais afirmam que a

presença de áreas impermeáveis altera significativamente a capacidade de infiltração do solo, reduz o tempo de concentração e intensifica os picos de vazão em eventos de chuva intensa. Assim, a inserção da taxa de urbanização permite estimativas mais precisas dos impactos da ocupação antrópica sobre o funcionamento hidrodinâmico da paisagem urbana.

Além do CN, outro parâmetro essencial é o tempo de concentração, que representa o intervalo necessário para que a água da chuva percorra a distância máxima entre o ponto mais distante da bacia e a sua saída. Esse tempo foi calculado com base em informações de declividade média e comprimento do canal principal em cada sub-bacia, permitindo representar a velocidade de resposta da bacia aos eventos de precipitação.

Com os dados estruturais e hidrológicos definidos, foi possível dar início à simulação dos eventos de chuva. Para tanto, adotou-se o Método de Huff (1967), técnica clássica de distribuição temporal da precipitação. Esse método, conforme descrito por Canholi (2014), baseia-se na análise estatística de séries pluviográficas obtidas no Centro-Leste do estado de Illinois (EUA), ao longo de 11 anos e em 49 estações, totalizando uma área de aproximadamente 1.000 km². O método define quatro distribuições típicas, chamadas de quartis, a serem utilizadas conforme a duração do evento: o 1º e o 2º quartis são indicados para chuvas com duração inferior a 12 horas; o 3º quartil para chuvas entre 12 e 24 horas; e o 4º para precipitações superiores a 24 horas.

No presente estudo, o método de Huff foi escolhido para representar a variação da intensidade da chuva ao longo do tempo, considerando a sua capacidade de simular chuvas concentradas no início, meio ou fim do evento. A aplicação dessa técnica permite uma análise mais realista do comportamento hidrológico da bacia, uma vez que considera a não uniformidade da precipitação. No Brasil, sua primeira aplicação institucional foi realizada pelo DAEE-SP em 1983, no contexto do Plano Diretor de Macrodrenagem da Bacia do Alto Tietê (PDMAT) (Canholi, 2014).

Esses dados fornecem subsídios técnicos valiosos para a gestão dos recursos hídricos urbanos e para o planejamento de medidas adaptativas em áreas críticas. A utilização de métodos consolidados, como o CN e o método de Huff, aliada ao uso de dados atualizados sobre uso do solo, reforça a robustez da análise

e contribui para a formulação de políticas públicas mais eficazes no enfrentamento dos desafios hidrológicos urbanos.

Esta abordagem multidimensional permitirá: (i) avaliar quantitativamente a redução de picos de vazão proporcionada pelo parque linear; (ii) identificar áreas prioritárias para intervenção; (iii) propor diretrizes para gestão integrada de bacias urbanas; e (iv) contribuir para o planejamento de infraestruturas verdes em contextos metropolitanos similares. A integração entre a perspectiva sistêmica de Ross (1994) e as técnicas quantitativas de hidrologia urbana representa um avanço metodológico para estudos de serviços ecossistêmicos em áreas urbanizadas.

4.3.2 Equação de Chuvas e Delimitação do Evento Extremo

Para representar de forma robusta os eventos críticos de precipitação utilizados na modelagem hidrológica, incorporou-se a equação de chuvas intensas definida para o município de São Paulo, originalmente proposta por Martinez e Magni (1999) e disponibilizada no *Atlas Pluviométrico do Brasil* (CPRM, 2014) (Equação 1). Essa equação IDF, amplamente utilizada no município de São Paulo, permite estimar intensidades pluviométricas extremas em função da duração da precipitação e do período de retorno, fornecendo valores consistentes com o regime de chuvas severas característico da Região Metropolitana de São Paulo. A equação foi aplicada para diferentes durações de chuva entre 10 e 1440 minutos, possibilitando a avaliação comparativa de eventos críticos para o contexto da bacia do Aricanduva.

$$it, T = 39,3015(t + 20)^{-0,9228} + 10,1767(t + 20)^{-0,8764}[-0,4653 - 0,8407 \cdot \ln(\ln(T/(T - 1)))]$$

Equação 1: Equação de Chuvas Intensas da Cidade de São Paulo, Fonte: CPRM, 2014

Além do cálculo analítico da intensidade, o pesquisador do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), Filipe Falcetta, desenvolveu uma planilha de cálculo própria que permitiu operacionalizar a aplicação da equação IDF. Essa planilha foi estruturada para receber como variáveis a duração e o período de retorno, retornando automaticamente tanto a intensidade da chuva quanto o volume total precipitado para cada cenário testado. O procedimento permitiu identificar, de forma sistemática, qual duração gerava o evento mais crítico e, ao mesmo tempo, coerente com a climatologia local.

A análise consolidada pela equação IDF e pela planilha indicou que o evento mais representativo para as condições extremas da bacia corresponde a aproximadamente 40 mm acumulados em 30 minutos. A partir desse valor acumulado, aplicou-se a distribuição temporal de Huff de primeiro quartil, que representa eventos de chuva cuja maior concentração ocorre nos instantes iniciais, característica frequentemente associada às tempestades convectivas que atuam sobre a RMSP. O uso da distribuição de Huff permitiu transformar o total de 40 mm em um hietograma detalhado para inserção no modelo hidrológico HEC-HMS, garantindo maior realismo na simulação das respostas da bacia.

Dessa forma, a integração entre a equação IDF disponibilizada pelo Atlas Pluviométrico do Brasil (CPRM, 2014), a planilha de cálculo que sistematizou a conversão intensidade–acúmulo, a distribuição temporal de Huff e o modelo hidrológico implementado no HEC-HMS resultou em um processo metodológico sólido, transparente e reproduzível. Essa abordagem assegura que a chuva de projeto utilizada no estudo não seja arbitrária, mas fundamentada em registros históricos, técnicas consagradas de estimativa de chuvas intensas e procedimentos hidrológicos coerentes com a realidade da bacia do Aricanduva.

4.4 Modelo HAND no Google Earth Engine

O modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND) configura-se como uma metodologia avançada para modelagem hidrológica, cujo princípio baseia-se no cálculo da elevação relativa do terreno em relação ao ponto mais próximo na rede de drenagem. Essa métrica é especialmente relevante para a delimitação de áreas suscetíveis a inundação, uma vez que pixels com valores de HAND baixos indicam regiões topograficamente próximas a corpos d'água, potencialmente sujeitas ao acúmulo hídrico durante eventos de alta vazão.

Neste trabalho, o HAND foi implementado por meio da plataforma Google Earth Engine (GEE) (Figura 9), utilizando-se o produto MERIT Hydro v1.0.1, que disponibiliza imagens rasterizadas de alta resolução espacial contendo a banda 'hnd', representativa da elevação relativa. O GEE, por sua vez, permite o processamento em nuvem e a integração dinâmica com outras bases geoespaciais, o que é crucial para análises multitemporais e multidimensionais.

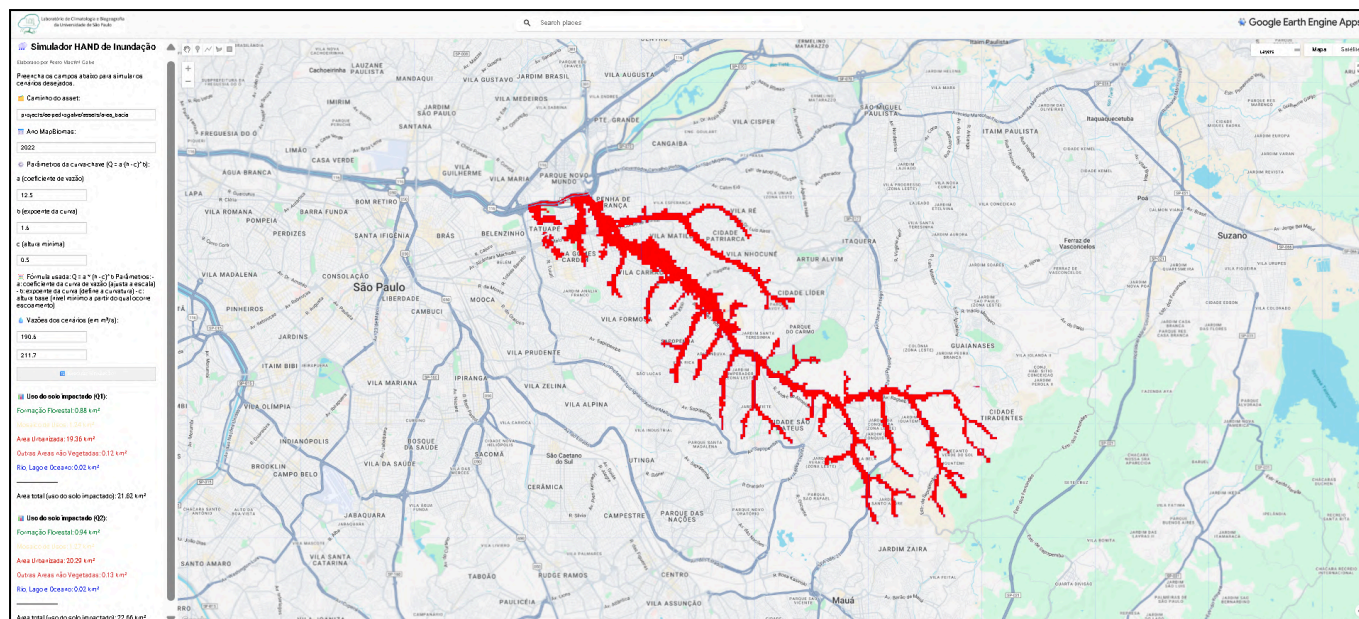


Figura 9: Interface da plataforma criada no GEE.

A metodologia adotada consistiu na parametrização da relação entre vazão e altura inundada segundo a fórmula hidrométrica “ $Q = a * (h - c)^b$ ”, onde Q é a vazão, h a altura inundada, e a , b , c parâmetros empíricos ajustáveis que refletem características locais da bacia, como, respectivamente, permeabilidade do solo, declividade e rugosidade do canal. Esta curva é fundamental para transformar os valores contínuos de HAND em classificações binárias de inundação, definindo áreas com HAND menor que a altura crítica (h) correspondente a cada cenário de vazão. O código desenvolvido no GEE recebe como entrada o caminho do asset da área de estudo (representado por uma FeatureCollection), o ano da classificação de uso do solo pelo MapBiomass Collection 9, os parâmetros da curva hidráulica (a , b e c) e dois valores de vazão representando diferentes cenários hidrológicos.

O processo computacional inicia com a extração da imagem HAND para a área de interesse, seguida pelo cálculo das alturas críticas “ h ” para os dois cenários de vazão Q_1 e Q_2 a partir da inversão da curva $Q(h)$. As áreas inundadas correspondem, portanto, aos pixels cuja altura HAND seja inferior a “ h ”, gerando máscaras binárias que indicam a presença ou ausência de inundação. A sobreposição destas máscaras permite identificar também as áreas adicionais inundadas no cenário de maior vazão, possibilitando análise comparativa e avaliação de risco incremental.

A quantificação espacial da inundação foi realizada multiplicando a máscara binária pela área de pixel (em km^2), seguida da agregação por redução espacial, o

que resultou em valores totais da área inundada para cada cenário. Adicionalmente, para avaliar o impacto socioambiental, a área inundada foi cruzada com a camada de uso e cobertura do solo do MapBiomas Collection 9, adquirida via asset público do GEE e reprojeta para a mesma resolução espacial do HAND (90 metros). O cálculo da área impactada por classe de uso do solo foi obtido por meio da função `frequencyHistogram`, que contabiliza a frequência de pixels inundados em cada categoria temática, convertendo os valores para km².

A integração do modelo HAND ao fluxo de trabalho desta pesquisa representa um avanço metodológico, complementando as análises iniciais e possibilitando uma abordagem mais detalhada e espacialmente explícita dos riscos hídricos. A utilização do GEE viabiliza a replicação e atualização do modelo para diferentes regiões e períodos, ampliando sua aplicabilidade em estudos hidrológicos e de planejamento ambiental. Ademais, o framework desenvolvido serve como base para futuras incorporações, tais como calibração com dados hidrométricos observados, inclusão de modelos de precipitação, análise de sensibilidade dos parâmetros e cenários futuros de mudanças climáticas. O modelo HAND implementado no GEE se apresenta como uma ferramenta robusta, eficiente e tecnicamente avançada para simulação de áreas inundáveis, que, junto com os dados da modelagem hídrica feitos no HEC-HMS, potencializam os objetivos deste trabalho ao proporcionar maior detalhamento espacial e analítico, reforçando o impacto e a aplicabilidade das pesquisas desenvolvidas.

5. Infraestrutura Verde

Segundo o Guia Metodológico para Implementação de Infraestrutura Verde (IPT, 2020), a infraestrutura verde desempenha um papel fundamental na manutenção dos processos ecológicos naturais, contribuindo diretamente para a melhoria da qualidade do ar e da água, além de promover benefícios significativos à saúde e à qualidade de vida das comunidades urbanas. Essa abordagem propõe a adoção de soluções baseadas na natureza por meio de uma engenharia mais suave, que atua em harmonia com a paisagem, imitando os processos naturais e promovendo respostas multifuncionais e sustentáveis aos desafios urbanos. Dessa forma, a infraestrutura verde constitui uma estratégia essencial para o enfrentamento de questões ambientais contemporâneas, oferecendo benefícios de

longo prazo que englobam dimensões ambientais, sociais e econômicas. Ao favorecer o equilíbrio ecológico em ambientes urbanizados, ela também fortalece a resiliência das cidades diante das mudanças climáticas e dos impactos decorrentes da urbanização desordenada.

O referido guia propõe uma abordagem estruturada para a implementação da infraestrutura verde, com ações distribuídas em três escalas distintas: escala de paisagem, escala particular e escala local. Neste último nível, enquadram-se os parques lineares, considerados elementos-chave da infraestrutura verde urbana por sua capacidade de oferecer múltiplas funções em áreas específicas do tecido urbano consolidado. Esses parques, ao longo de cursos d'água ou em faixas contínuas de vegetação, apresentam uma série de atributos fundamentais para a promoção da sustentabilidade urbana.

Entre os principais aspectos considerados na estruturação de parques lineares estão: a cobertura das copas das árvores, que atua na melhoria da qualidade do ar, na regulação da temperatura por sombreamento e na ampliação do conforto térmico urbano, ao mesmo tempo em que oferece abrigo para a fauna urbana; as condições sanitárias da arborização urbana, que requerem manejo adequado, incluindo podas regulares e controle de pragas e doenças, para assegurar a vitalidade e longevidade das espécies vegetais; a presença de florestas ripárias, ou matas ciliares, que contribuem para a proteção das margens dos corpos d'água, a filtragem de poluentes e o fortalecimento da biodiversidade local; a função de conexão entre diferentes áreas verdes da cidade, transformando os parques lineares em corredores ecológicos e espaços de mobilidade sustentável, que favorecem a integração urbana; o conceito de estradas verdes, que preveem a arborização ao longo de vias urbanas, promovendo não apenas a qualificação paisagística, mas também a mitigação dos efeitos do tráfego e o aumento do sombreamento viário; os jardins comunitários e hortas urbanas, que contribuem para a segurança alimentar, o fortalecimento dos vínculos sociais e o engajamento comunitário; e, finalmente, a utilização de pavimentos permeáveis e de práticas de infiltração de água de chuva, como áreas de infiltração, valas vegetadas e sistemas de drenagem sustentável, fundamentais para a gestão eficiente das águas pluviais.

O Guia Metodológico (IPT, 2020), destaca que a infraestrutura verde deve ser compreendida como parte integrante do planejamento urbano sustentável, promovendo o equilíbrio entre ocupação do território e preservação dos processos

ecológicos. Para isso, o guia propõe uma abordagem estruturada e multiescalar, que permite a inserção da infraestrutura verde desde grandes paisagens até intervenções pontuais em lotes urbanos. Essa estrutura é organizada em três níveis: escala de paisagem, escala particular e escala local, sendo esta última a mais diretamente associada aos elementos presentes no cotidiano urbano, como os parques lineares, praças, jardins de chuva, telhados verdes e calçadas arborizadas.

O guia enfatiza também a função reguladora da infraestrutura verde sobre o ciclo hidrológico urbano, uma vez que a cobertura vegetal e o solo permeável presentes nesses espaços contribuem significativamente para a redução do escoamento superficial, a infiltração da água no solo e o controle dos picos de vazão. A presença de vegetação ciliar bem estruturada, por exemplo, reduz a velocidade do escoamento, atua como filtro de poluentes e estabiliza as margens de corpos d'água, prevenindo erosões e assoreamentos. Essas funções são ainda mais relevantes em cidades como São Paulo, onde a alta impermeabilização do solo compromete a capacidade de drenagem natural, tornando a adoção de práticas sustentáveis de gestão da água uma prioridade.

Outro ponto importante ressaltado pelo IPT (2020) é a importância da manutenção contínua e da sanidade da vegetação urbana, especialmente nos parques lineares, que devem contar com planos específicos de manejo, podas controladas, controle fitossanitário e substituição de espécies quando necessário. A vegetação precisa ser planejada com base em critérios técnicos, privilegiando espécies nativas, com desenvolvimento radicular profundo, baixa exigência hídrica e resistência ao ambiente urbano. Essa seleção adequada garante não apenas a longevidade das árvores e a segurança dos usuários, mas também a efetividade dos serviços ecossistêmicos prestados pela vegetação.

Por fim, o IPT (2020) defende que a efetividade da infraestrutura verde está diretamente ligada à sua integração às políticas públicas e instrumentos de planejamento urbano, como os planos diretores, planos de drenagem, códigos de obras e legislação ambiental. Para isso, é fundamental que os projetos sejam acompanhados de diagnósticos técnicos precisos, participação social qualificada e definição clara de responsabilidades na gestão e manutenção das áreas. Essa abordagem integrada permite consolidar a infraestrutura verde como base técnica e conceitual para cidades mais resilientes, sustentáveis e socialmente justas.

Essa perspectiva destaca o papel estratégico das áreas verdes, como a Área de Proteção Ambiental (APA) do Carmo, na mitigação de inundações urbanas. A presença de vegetação arbórea e herbácea nessas áreas atua de forma decisiva na interceptação das chuvas, reduzindo o impacto direto das precipitações no solo e atenuando o escoamento superficial rápido, frequentemente responsável por inundações. Ademais, essas áreas favorecem a infiltração da água no solo, contribuindo para a recarga dos aquíferos e diminuindo significativamente o volume de água que escoar em direção aos cursos d'água durante os eventos pluviométricos intensos. A vegetação também exerce função relevante na contenção de encostas e na estabilização das margens fluviais, prevenindo processos erosivos que, ao intensificarem o carregamento de sedimentos para os leitos dos rios, podem obstruir a calha fluvial e agravar os riscos de inundação.

Saboya (1991) destaca que a implantação de cobertura vegetal em áreas sujeitas à erosão e inundações deve observar requisitos específicos, como a formação de florestas com porte arbóreo médio a elevado, dotadas de dossel contínuo ao longo de todas as estações do ano. A vegetação deve possuir sistema radicular bem desenvolvido, com raízes dispostas paralelamente à superfície do terreno, de modo a conferir maior estabilidade aos taludes e margens. Além disso, é recomendável que as espécies selecionadas sejam de fácil obtenção, apresentem crescimento rápido, sejam perenes e exijam pouca manutenção, além de não serem excessivamente atrativas para evitar interferências indesejadas. A diversidade de espécies também é um fator desejável, pois amplia a resiliência e a estabilidade ecológica do sistema implantado.

Diante desses aspectos, a preservação, o manejo adequado e a ampliação das áreas verdes urbanas são estratégias centrais para o enfrentamento das inundações e demais efeitos adversos das mudanças climáticas. A implantação de vegetação planejada em encostas, margens fluviais e áreas sujeitas a inundações contribuem não apenas para a conservação do solo e da biodiversidade, mas também para a construção de cidades mais seguras, resilientes e ambientalmente equilibradas.

6. Áreas de fragilidade ambiental

A fragilidade ambiental pode ser compreendida como a suscetibilidade de um determinado território a sofrer alterações negativas frente a intervenções antrópicas ou a processos naturais extremos. A intensidade dessa fragilidade varia conforme a interação entre os elementos naturais, como solo, relevo, cobertura vegetal e clima, e os padrões de uso e ocupação do solo. Conforme exposto por Ross (1994), a fragilidade está intimamente ligada à estrutura e ao funcionamento do “estrato geográfico”, conceito que engloba a zona de interface entre litosfera, atmosfera, hidrosfera e biosfera, onde se desenvolvem as atividades humanas e os processos naturais em constante interação.

Ross (1994) destaca que as transformações nos ambientes naturais provocadas por ações humanas superam, em ritmo e intensidade, os processos naturais de modificação do meio, resultando frequentemente em desequilíbrios ambientais. A urbanização desordenada, o avanço de monoculturas, o desmatamento e o uso intensivo de defensivos químicos são exemplos de práticas que aumentam a instabilidade emergente dos sistemas ambientais, ampliando o risco de erosão, inundações, escorregamentos e perda de biodiversidade. Frente a esse cenário, o planejamento territorial deve se fundamentar tanto nas potencialidades quanto nas fragilidades dos ambientes, utilizando ferramentas como o zoneamento ambiental e as Unidades Ecodinâmicas como subsídios à tomada de decisão.

Estudos recentes reforçam a importância dos parques lineares na mitigação da vulnerabilidade ambiental em áreas urbanas críticas. Anjos (2024), ao analisar a eficiência dos parques lineares implantados no entorno do Rio Barigui, em Curitiba, demonstrou que tais espaços funcionam como importantes dispositivos de contenção e regulação hídrica, reduzindo significativamente a frequência e a intensidade de inundações em fundos de vale. O autor evidencia que a presença de áreas permeáveis e vegetação ripária favorece a infiltração da água no solo, a retenção de sedimentos e a redução do escoamento superficial, além de proporcionar maior estabilidade aos processos geomorfológicos locais. Esses resultados corroboram a concepção de que parques lineares constituem unidades ecodinâmicas potencialmente recuperáveis, com elevada relevância para o

equilíbrio ambiental e para a resiliência urbana frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

Além de sua função ecológica, os parques lineares atuam como infraestruturas verdes multifuncionais, integrando aspectos ambientais, sociais e paisagísticos. Quando inseridos em áreas de alta fragilidade, como as classificadas por Ross (1994) como Unidades Ecodinâmicas de Instabilidade Emergente ou de Instabilidade Potencial Forte, esses espaços podem reverter o grau de instabilidade ao promover práticas conservacionistas, como o plantio de espécies nativas, o manejo de encostas e a criação de zonas de amortecimento em áreas urbanizadas. A inserção planejada de parques lineares em áreas críticas funciona como uma medida adaptativa, que transforma zonas de risco em territórios resilientes.

A análise empírica da fragilidade destaca a importância de integrar variáveis como relevo (por meio dos índices de dissecação), solos (erodibilidade) e cobertura vegetal (grau de proteção) para definir zonas prioritárias para intervenção ambiental (ROSS, 1994). Nessas áreas, a implantação de parques lineares pode ser orientada pela leitura integrada desses fatores, garantindo maior eficiência nas ações de mitigação. Além disso, essas intervenções devem ser acompanhadas por políticas públicas que incentivem a conservação do solo, o uso racional dos recursos naturais e a valorização dos serviços ecossistêmicos prestados por áreas verdes urbanas.

Dessa forma, os parques lineares representam uma alternativa estratégica para o enfrentamento da degradação ambiental e da vulnerabilidade urbana, configurando-se como espaços-chave na construção de cidades mais sustentáveis e ambientalmente equilibradas. Sua função extrapola a paisagem e o lazer, assumindo papel técnico no ordenamento territorial e na mitigação das fragilidades socioambientais, especialmente em bacias hidrográficas densamente urbanizadas como a do Rio Aricanduva.

A noção de fragilidade ambiental urbana deve ser compreendida também em sua dimensão social, uma vez que os impactos decorrentes da instabilidade ecológica não afetam de forma homogênea os diferentes grupos populacionais. Nas grandes cidades brasileiras, como São Paulo, populações de baixa renda frequentemente ocupam áreas de alta vulnerabilidade física, como margens de rios, encostas íngremes e fundos de vale, justamente as zonas classificadas como de alta fragilidade ambiental segundo os critérios de Ross (1994). Nessas áreas, a precariedade das infraestruturas básicas, a impermeabilização desordenada e a

ausência de cobertura vegetal acentuam os riscos de enchentes, deslizamentos e degradação da qualidade ambiental, agravando as condições de vida.

Frente a esse cenário, os parques lineares, quando concebidos como política pública integrada e fundamentada em critérios técnico-ambientais, assumem o papel de estratégia preventiva e corretiva. Ao mesmo tempo em que restauram áreas ecologicamente frágeis, promovem inclusão social e ampliam o acesso a espaços verdes, lazer e infraestrutura urbana de qualidade. Sua implantação deve estar articulada a instrumentos de planejamento como o Plano Diretor Estratégico, os Planos de Macrodrenagem e os Zoneamentos Ambientais Urbanos, de forma a garantir que esses espaços cumpram sua função ecológica sem promover processos de expulsão ou gentrificação das populações vulneráveis.

Além disso, a função educativa dos parques lineares não deve ser subestimada. Esses espaços podem atuar como verdadeiros “laboratórios a céu aberto”, promovendo a conscientização ambiental da população e incentivando práticas sustentáveis, como o reaproveitamento de água de chuva, compostagem e agricultura urbana. Por meio de trilhas ecológicas, painéis informativos, hortas comunitárias e programas de voluntariado, os parques fortalecem os vínculos entre sociedade e natureza, contribuindo para uma cultura urbana mais sensível às questões socioambientais.

A valorização do conhecimento geográfico e geomorfológico, como o proposto por Ross (1994), é indispensável para que a implementação dos parques lineares e demais soluções baseadas na natureza ocorra de forma estratégica e adaptada às especificidades do território. O reconhecimento das Unidades Ecodinâmicas, das zonas de instabilidade potencial e da estrutura morfológica urbana permite não apenas o diagnóstico mais preciso das fragilidades existentes, mas também a proposição de intervenções mais eficazes e duradouras. Assim, ao reunir funções ecológicas, sociais e urbanísticas, os parques lineares se consolidam como ferramentas centrais para a mitigação da fragilidade ambiental nas cidades contemporâneas. Mais do que espaços de lazer ou paisagismo, representam instrumentos operacionais para o ordenamento do território, a gestão ambiental urbana e o enfrentamento das múltiplas vulnerabilidades que afetam os centros urbanos brasileiros.

7. Áreas de Inundação

A ocorrência de inundações em áreas urbanas é resultado de um conjunto de fatores físicos e antrópicos que atuam sobre o território, intensificados pela impermeabilização do solo, ocupação desordenada e ausência de infraestrutura de drenagem eficiente. Na cidade de São Paulo, em especial na região leste, a bacia do rio Aricanduva destaca-se como uma área de alta suscetibilidade a eventos de inundação, com registros recorrentes ao longo das últimas décadas.

De acordo com o Manual de Procedimentos Metodológicos para Delimitação de Planícies de Inundação e de Áreas Inundáveis (IPT, 2023), a metodologia adotada para identificação de áreas inundáveis parte da análise morfométrica das sub-bacias e do cálculo das alturas relativas ao nível de base local, definidas a partir do modelo HAND (Height Above Nearest Drainage). Esse modelo permite identificar áreas potencialmente sujeitas a inundações em função de sua elevação em relação aos talwegues, sendo uma ferramenta de grande relevância para o planejamento urbano e a gestão de riscos hidrológicos.

Conforme Campos et al. (2016), a elaboração de cartas de suscetibilidade, perigo e risco para o processo de inundação fluvial gradual considera múltiplas variáveis, tais como características geológicas e topográficas, uso e ocupação do solo, cobertura vegetal, padrões hidrológicos locais e histórico de eventos passados. A topografia influencia diretamente a formação e a propagação de inundações, enquanto a cobertura vegetal atua como elemento de controle do escoamento superficial. Já o uso e a ocupação do solo definem o grau de impermeabilização e, consequentemente, o volume e a velocidade da água em eventos extremos.

Além dessas variáveis, o histórico de eventos é um componente-chave para o entendimento da dinâmica local. Os dados obtidos no sistema GeoSampa permitiram a análise espacial e temporal da ocorrência de inundações na área do Parque Linear do Aricanduva entre os anos de 2013 e 2024.

8. Resultados e Discussão

8.1 Análise Estatística da Precipitação: Boxplots, Estações Pluviométricas e Identificação de Eventos Extremos.

A análise estatística da precipitação constitui uma etapa principal para a compreensão do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica urbanizada, sendo indispensável para o desenvolvimento de modelos que busquem simular cenários reais de escoamento e risco de inundação. Neste trabalho, realizou-se um estudo descritivo da precipitação mensal acumulada com base em dados históricos de sete estações pluviométricas situadas no entorno da bacia hidrográfica do Córrego Aricanduva (Figura 10). Os dados utilizados abrangem diferentes séries temporais, variando de 2014 a 2024, a depender da disponibilidade de registros de cada estação, e foram analisados por meio de gráficos do tipo boxplot.

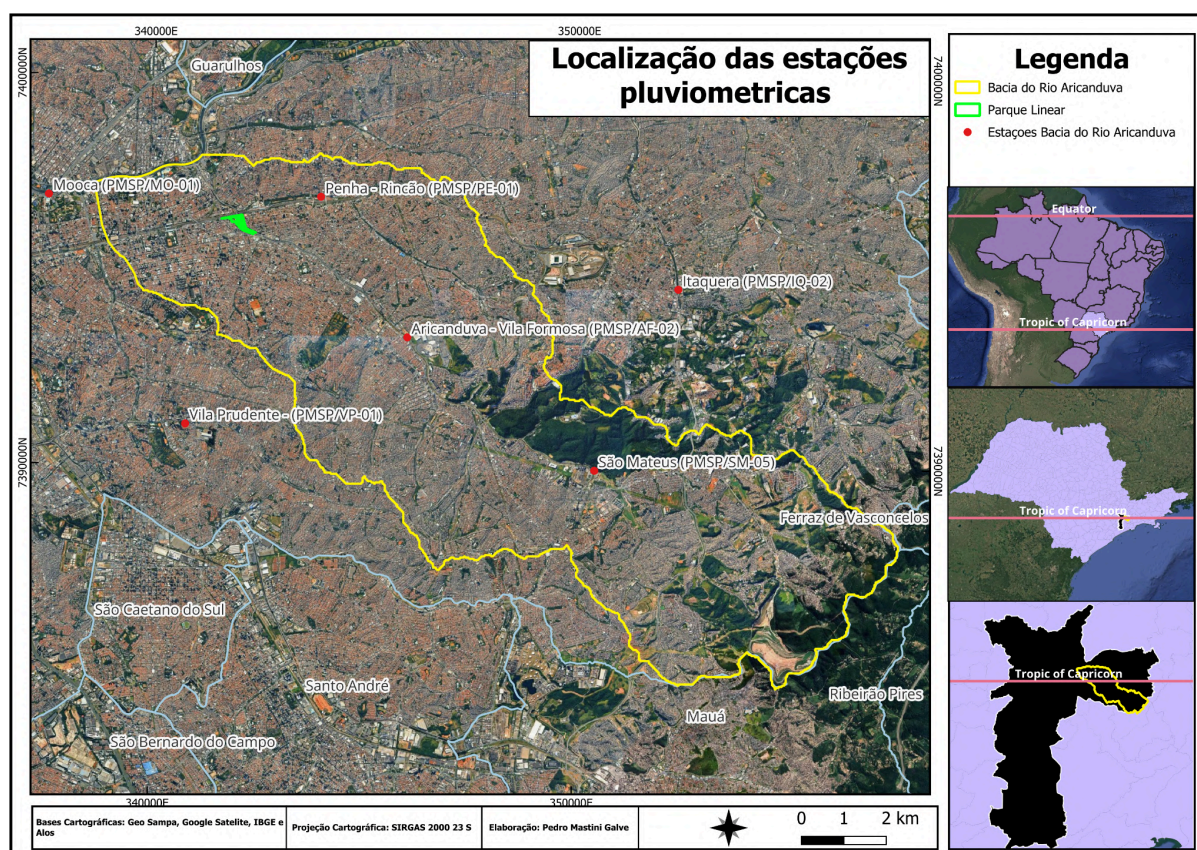


Figura 10: Mapa de localização das estações meteorológicas.

Cada boxplot representa a distribuição estatística dos valores mensais de precipitação ao longo dos anos, permitindo a visualização de medidas de tendência central (mediana), dispersão (quartis e intervalo interquartil) e a identificação de

outliers, os quais representam eventos potencialmente extremos. Adicionalmente, os gráficos incorporam a média geral do período analisado (representada por uma linha tracejada) e a média mensal suavizada (linha contínua), oferecendo uma visão clara do regime pluviométrico sazonal típico da Região Metropolitana de São Paulo.

De modo geral, os resultados indicam um regime de chuvas altamente sazonal, com concentração das precipitações nos meses de verão, especialmente entre dezembro e março. Os volumes acumulados nesse período superam frequentemente os 200 mm mensais, com ocorrência de eventos superiores a 400 mm em diversas estações, o que evidencia a severidade das chuvas no período úmido. No entanto, também foi possível observar a presença de chuvas expressivas em meses tradicionalmente secos, como abril, maio, setembro e outubro, reforçando a importância de se considerar a ocorrência de eventos extremos fora do padrão climático convencional.

A estação Aricanduva/Vila Formosa (Figura 11), localizada na região central da bacia, apresenta um padrão sazonal bem definido, com maiores volumes nos meses de verão, especialmente janeiro e fevereiro, cujos valores médios superam os 200 mm. Observa-se ainda a ocorrência de outliers relevantes em junho, julho e outubro, indicando que chuvas de alta intensidade podem ocorrer fora do período chuvoso convencional. Essa variabilidade amplia a janela de risco hidrológico e reforça a importância da análise histórica para calibragem de modelos.

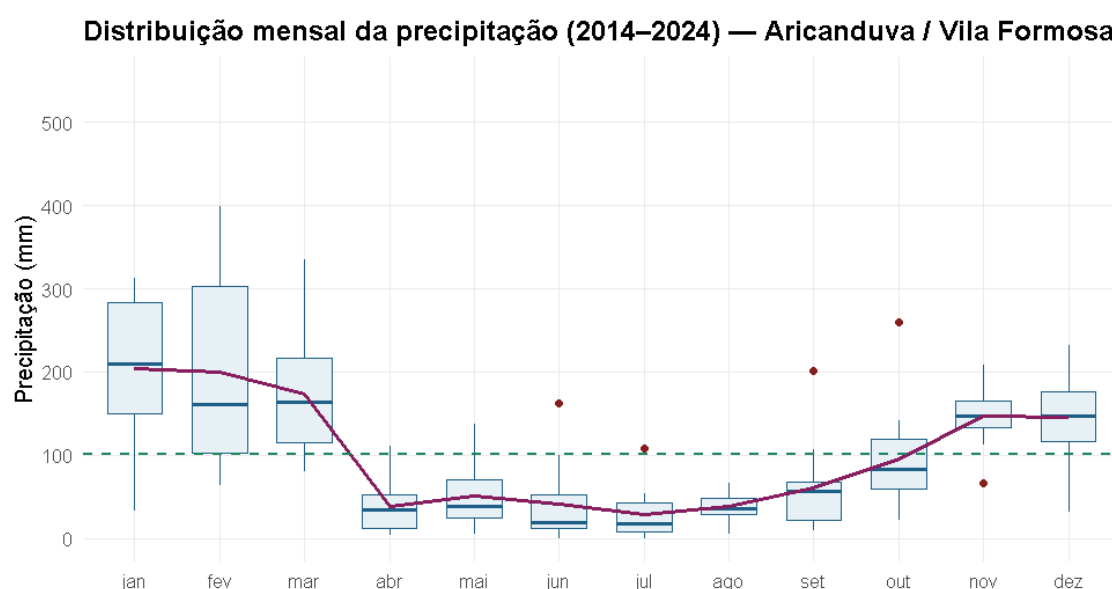


Figura 11: Distribuição Mensal da Precipitação – Estação Aricanduva/Vila Formosa (2014–2024).

Na estação Itaquera (Figura 12), situada no setor leste da bacia, o padrão sazonal também é nítido, com máximas nos meses de verão e acentuada queda

nas médias mensais a partir de abril. No entanto, observa-se um menor número de outliers em comparação com outras estações, o que indica menor variabilidade interanual dos eventos extremos. Ainda assim, os meses de junho, setembro e outubro registram episódios pontuais de precipitação elevada, sugerindo que essa área também pode ser impactada por eventos de transição climática.

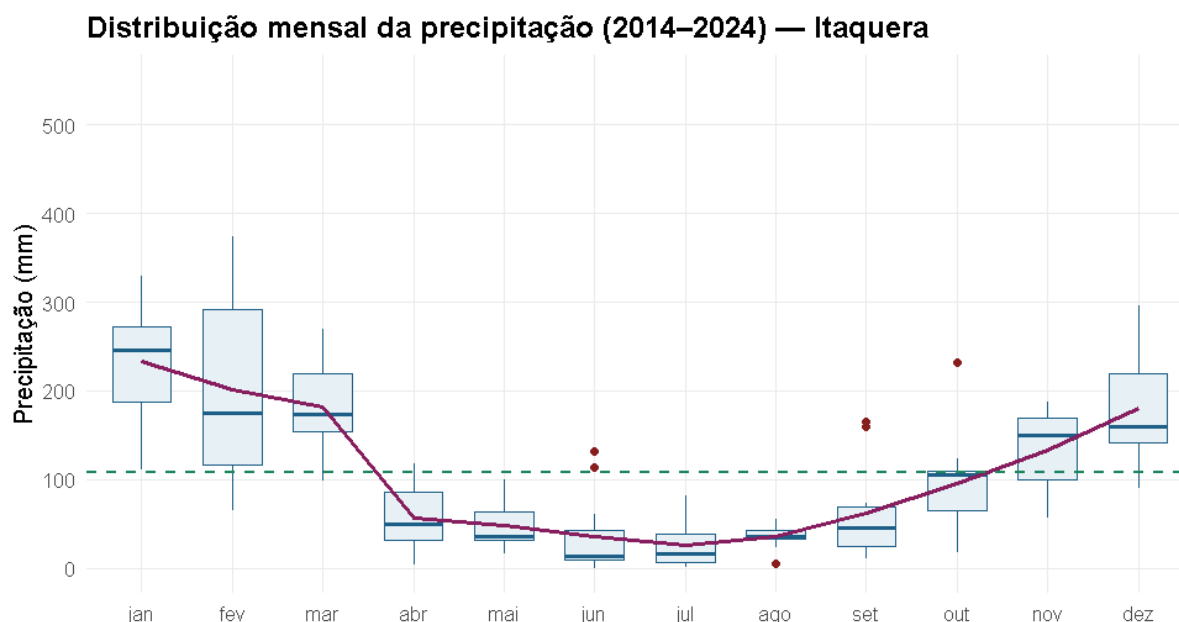


Figura 12: Distribuição Mensal da Precipitação – Itaquera (2014–2024).

A estação Mooca (Figura 13), situada mais a oeste, nas proximidades do canal inferior do Córrego Aricanduva, apresenta uma das distribuições mais amplas do período chuvoso, com forte dispersão dos valores em janeiro e março. Os registros de outliers em meses como junho e outubro evidenciam a atuação de chuvas irregulares e, por vezes, localizadas. O perfil dessa estação reforça a necessidade de atenção especial na modelagem hidrológica para a área de jusante, onde a confluência de aportes pode amplificar o risco de inundações

Distribuição mensal da precipitação (2014–2024) — Mooca

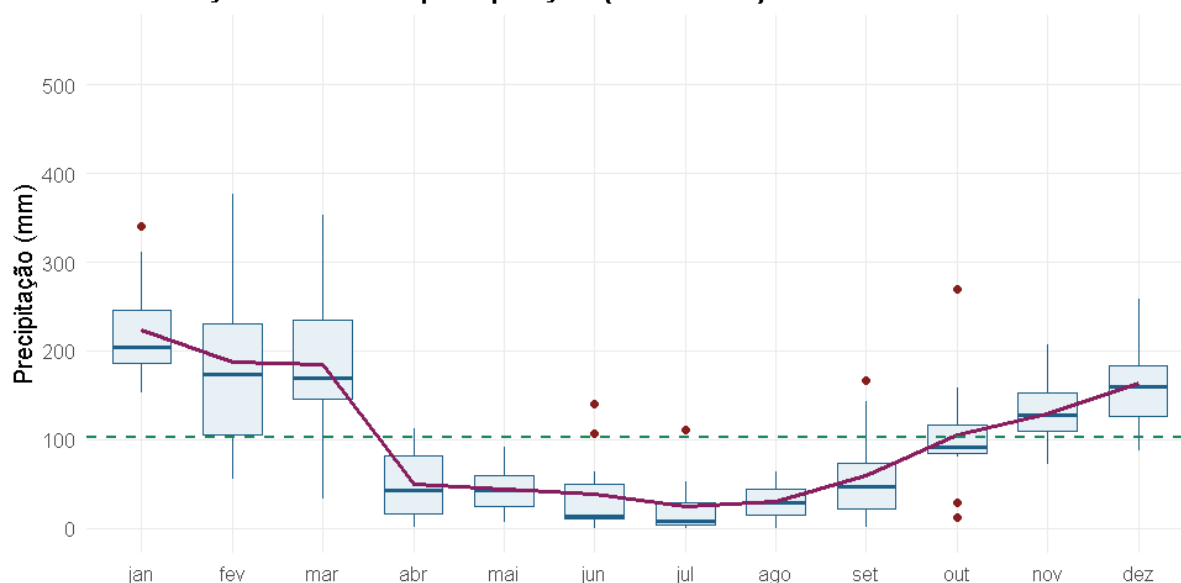


Figura 13: Distribuição Mensal da Precipitação – Mooca (2014–2024).

A estação da Penha (Figura 14) destaca-se por apresentar alguns dos maiores volumes registrados em toda a análise, com máximas superiores a 400 mm em janeiro e fevereiro. Há grande frequência de outliers distribuídos ao longo do ano, inclusive nos meses secos, o que sugere elevada variabilidade pluviométrica e sensibilidade a eventos extremos. Essa estação representa uma das áreas mais críticas da bacia do ponto de vista de resposta hidrológica. A elevada amplitude dos dados implica em maior complexidade na definição de cenários para modelagem e planejamento urbano.

Distribuição mensal da precipitação (2014–2024) — Penha

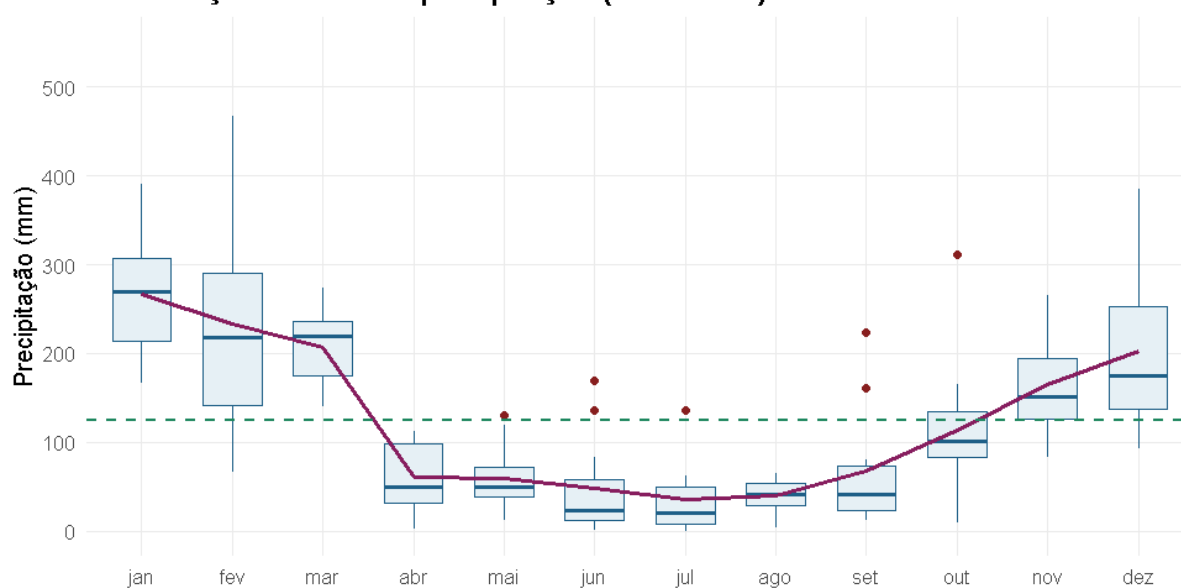


Figura 14: Distribuição Mensal da Precipitação – Penha (2014–2024).

Na estação São Mateus (Figura 15), localizada na extremidade sudeste da bacia, o regime de chuvas é relativamente mais regular. A distribuição apresenta um comportamento previsível: altos volumes entre dezembro e março e precipitações reduzidas entre maio e agosto. Ainda assim, há presença de outliers nos meses de setembro e outubro, indicando que, mesmo em uma área de comportamento climático mais estável, há episódios críticos de chuva intensa que merecem atenção no planejamento e na simulação hidrológica.

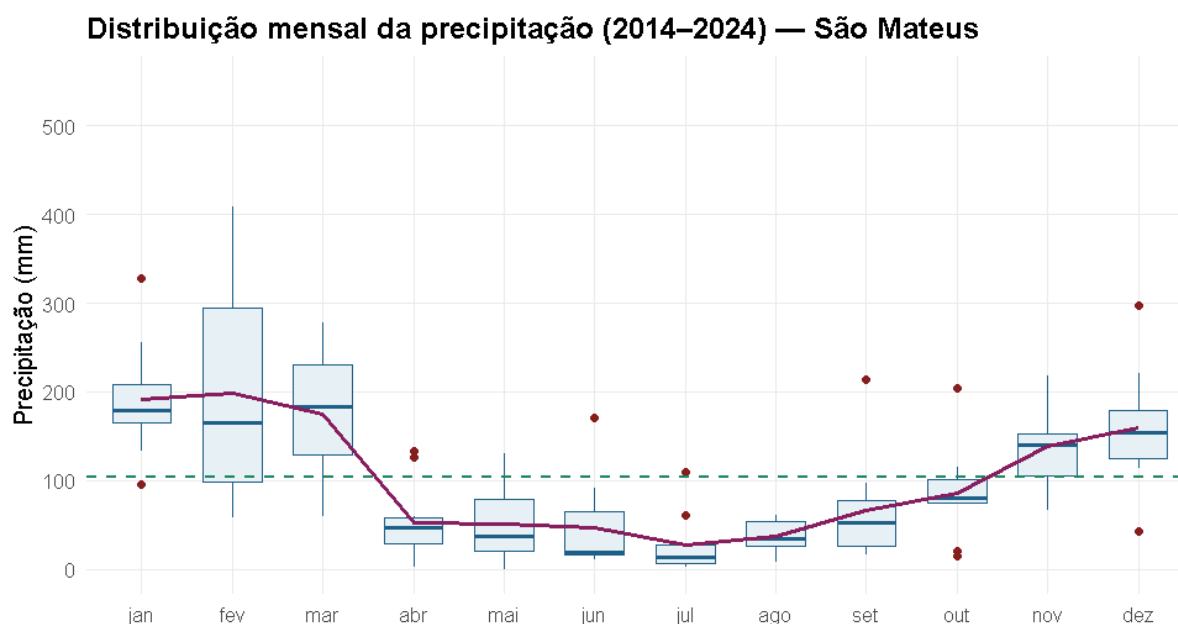


Figura 15– Distribuição Mensal da Precipitação – São Mateus (2014–2024).

A estação Vila Prudente (Figura 16) é notável por apresentar os maiores outliers individuais da série, com registros que ultrapassam os 450 mm mensais, particularmente em janeiro. Além disso, observa-se presença de eventos extremos em abril, maio e junho. A combinação entre altas médias, ampla variabilidade e ocorrência de outliers em meses fora do verão evidencia que esta região concentra forte potencial de risco hidrológico. A densidade urbana e a declividade local contribuem para a vulnerabilidade observada nesta estação.

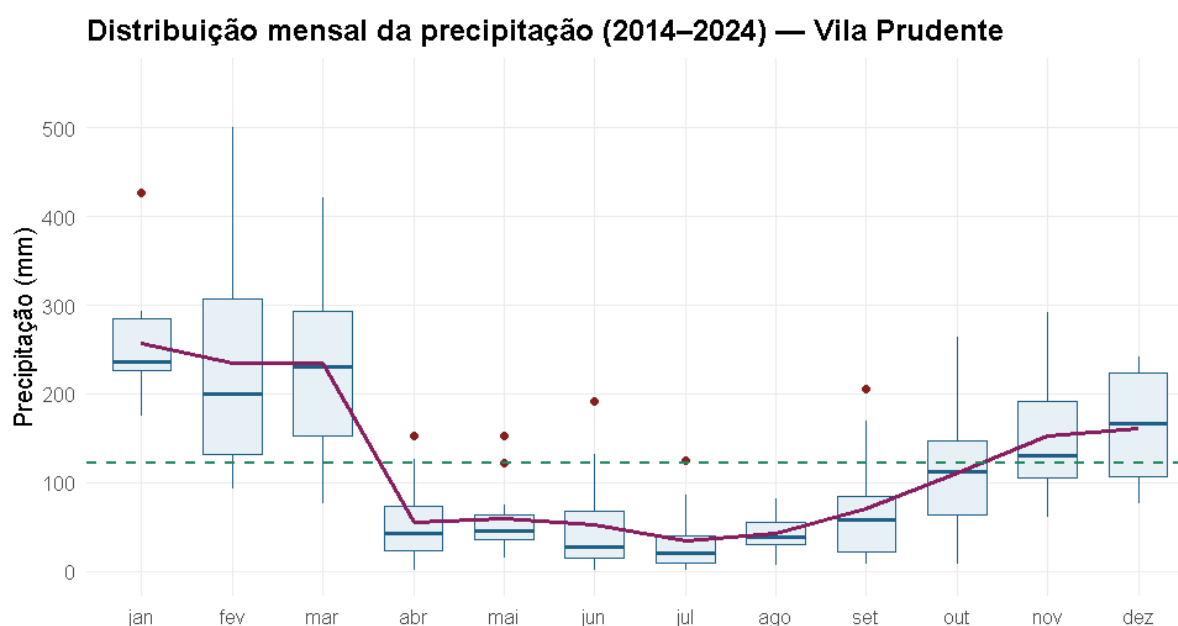


Figura 16: Distribuição Mensal da Precipitação – Vila Prudente (2014–2024).

A Tabela 1 apresenta a síntese dos eventos de precipitação considerados extremos nas diferentes estações pluviométricas que circundam a bacia do rio Aricanduva, identificados a partir da análise estatística de boxplots. Os valores listados correspondem a registros que ultrapassaram os limites superiores definidos pelo intervalo interquartil ($Q3 + 1,5 \cdot IQR$), sendo classificados como de alto impacto, ou que permaneceram dentro do limite inferior, configurando episódios de baixo impacto para inundação.

Observa-se que os episódios de alto impacto predominam em todas as estações analisadas, com destaque para a estação Vila Prudente em janeiro de 2017, que registrou um acumulado mensal de 426,8 mm, valor significativamente acima do limite superior esperado para o período. Também se destacam eventos críticos em São Mateus (dezembro de 2015, com 297,6 mm) e Mooca (janeiro de 2017, com 340,6 mm), evidenciando a concentração de chuvas intensas nos meses de verão.

Em contrapartida, alguns registros foram classificados como de baixo impacto, especialmente em meses de transição climática, como agosto de 2019 em Itaquera (5,2 mm) e outubro de 2014 na Mooca (12,2 mm). Esses valores, embora baixos, também são relevantes para a análise por representarem desvios estatísticos em relação ao padrão sazonal esperado.

De forma geral, os resultados demonstram a elevada variabilidade pluviométrica da Região Metropolitana de São Paulo, marcada tanto por episódios de estiagem pontual quanto por eventos extremos de alta magnitude. Essa oscilação reforça a necessidade de incorporar dados estatísticos robustos ao planejamento hidrológico e à modelagem de cenários de inundação na bacia do rio Aricanduva.

Tabela 1 – Eventos de precipitação classificados por estação pluviométrica, período e intensidade.

Estação	Mes	Ano	Valor	Tipo
Aricanduva / Vila Formosa	jun	2016	162,2	alto
Aricanduva / Vila Formosa	jul	2019	108,4	alto
Aricanduva / Vila Formosa	set	2015	200,8	alto
Aricanduva / Vila Formosa	out	2023	260,2	alto
Aricanduva / Vila Formosa	nov	2021	66,4	baixo
Itaquera	jun	2016	132,0	alto
Itaquera	jun	2020	114,4	alto
Itaquera	ago	2019	5,2	baixo
Itaquera	set	2015	165,6	alto
Itaquera	set	2022	160,0	alto
Itaquera	out	2023	231,6	alto
Mooca	jan	2017	340,6	alto
Mooca	jun	2016	140,6	alto
Mooca	jun	2020	106,8	alto
Mooca	jul	2019	111,4	alto
Mooca	set	2015	167,0	alto
Mooca	out	2023	269,2	alto
Mooca	out	2019	28,6	baixo
Mooca	out	2014	12,2	baixo
Penha	mai	2017	131,0	alto
Penha	jun	2016	170,0	alto
Penha	jun	2020	136,0	alto
Penha	jul	2019	136,5	alto
Penha	set	2015	224,0	alto
Penha	set	2022	160,8	alto
Penha	out	2023	311,3	alto
São Mateus	jan	2017	327,4	alto
São Mateus	jan	2021	95,0	baixo
São Mateus	abr	2017	133,6	alto
São Mateus	abr	2019	125,8	alto
São Mateus	jun	2016	170,6	alto
São Mateus	jul	2019	109,6	alto

São Mateus	jul	2015	61,0	alto
São Mateus	set	2015	213,6	alto
São Mateus	out	2023	203,6	alto
São Mateus	out	2019	20,6	baixo
São Mateus	out	2014	15,0	baixo
São Mateus	dez	2015	297,6	alto
São Mateus	dez	2018	42,8	baixo
Vila Prudente	jan	2017	426,8	alto
Vila Prudente	abr	2017	152,3	alto
Vila Prudente	mai	2017	153,3	alto
Vila Prudente	mai	2016	122,3	alto
Vila Prudente	jun	2016	191,8	alto
Vila Prudente	jul	2019	124,8	alto
Vila Prudente	set	2015	205,0	alto

Fonte: CGE (2025)

A análise comparativa entre as seis estações (Figura 17) evidência tanto a sazonalidade típica do clima da Região Metropolitana de São Paulo quanto a heterogeneidade espacial dos volumes precipitados. Estações como Penha, Vila Prudente e Aricanduva/Vila Formosa destacam-se pela alta frequência de valores extremos (Figura x), o que reforça a necessidade de uma abordagem sub-bacia na modelagem hidrológica. Além disso, a identificação dos anos de 2015, 2020 e especialmente 2023 como períodos críticos — com múltiplas ocorrências de chuvas extremas — fornece embasamento técnico para a seleção de cenários nos modelos de simulação. O ano de 2023, por apresentar simultaneidade de eventos intensos em diversas estações, foi selecionado como base principal para os testes

hidrológicos na etapa seguinte do trabalho.

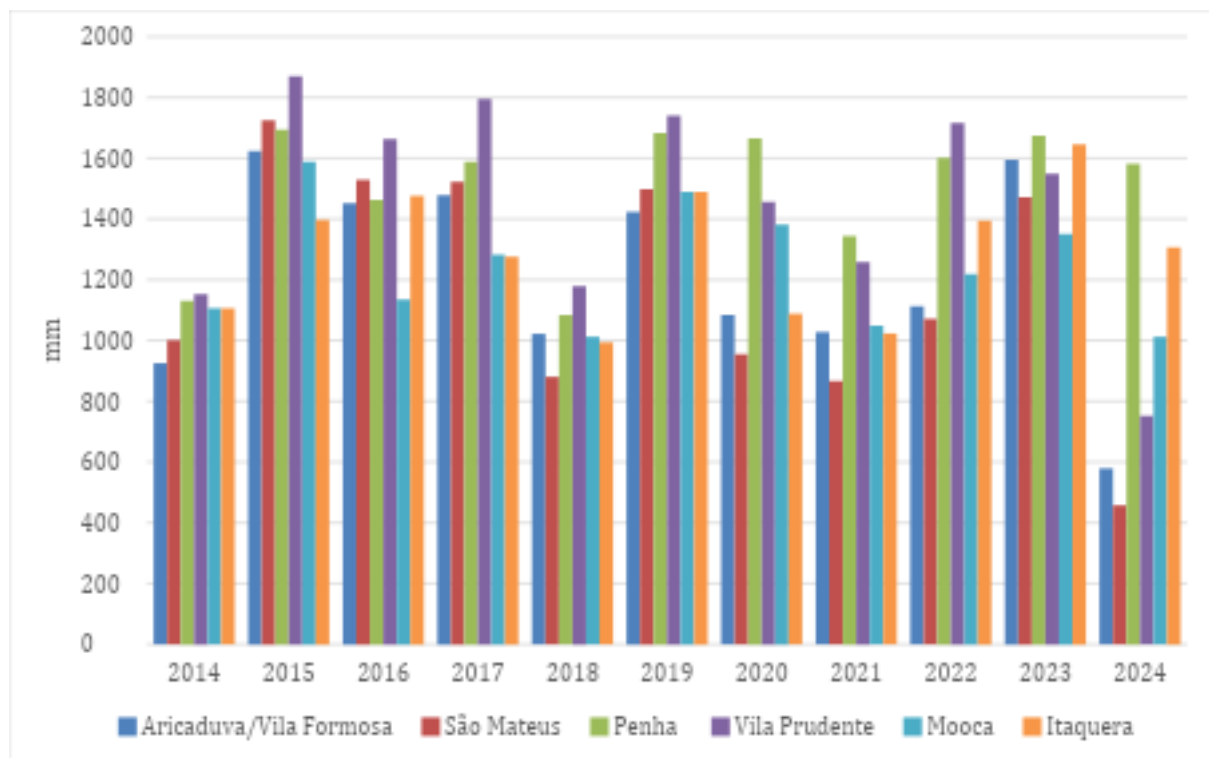


Figura 17: Precipitação anual das estações. Fonte: CGE (2025).

8.2 Fragilidade Ambiental

O mapeamento da fragilidade ambiental na bacia do rio Aricanduva (Figura 18) revelou uma distribuição espacial heterogênea, com predominância de áreas classificadas como de média fragilidade (42% da área total), seguidas por áreas de alta fragilidade (28%), baixa fragilidade (18%), muito alta fragilidade (8%) e muito baixa fragilidade (4%). Essa distribuição reflete a interação complexa entre os fatores físicos e antrópicos na bacia.

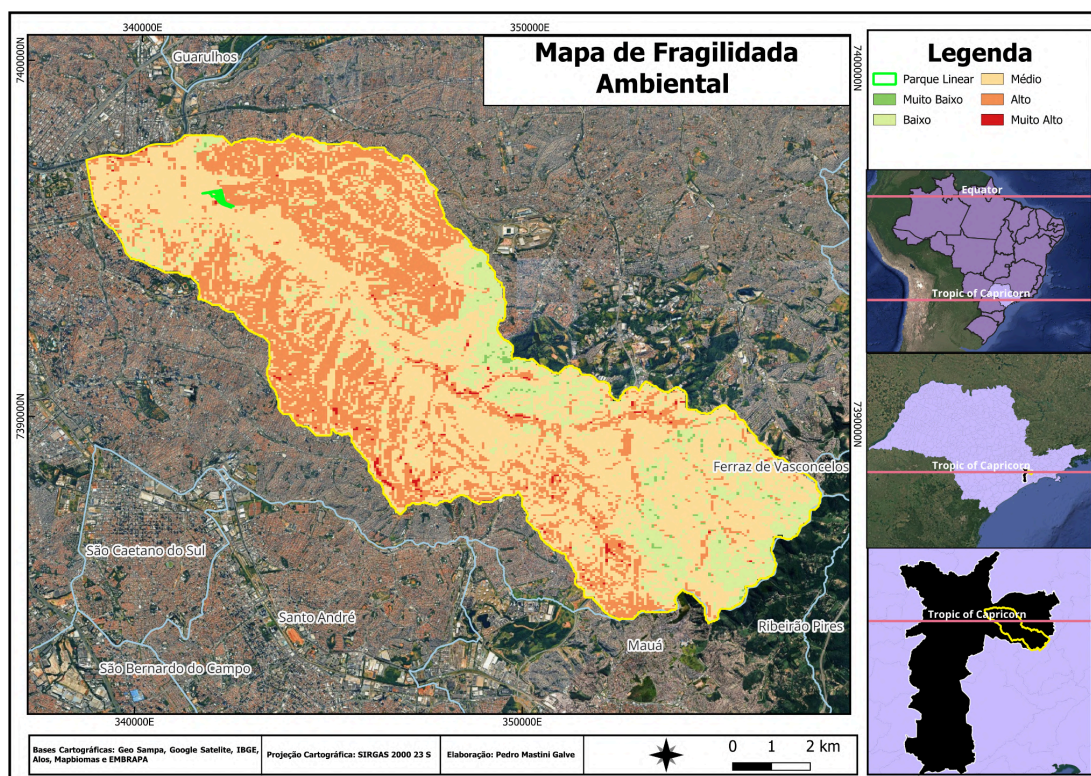


Figura 18: Mapa de fragilidade ambiental.

As áreas classificadas como de muito baixa e baixa fragilidade concentram-se predominantemente nas porções noroeste da bacia, associadas a relevos suaves ($0-5^\circ$ de declividade) e cobertura vegetal preservada de Mata Atlântica. Estas áreas, que totalizam 22% da bacia, representam zonas prioritárias para conservação, atuando como importantes corredores ecológicos e reguladores do regime hídrico.

As áreas de média fragilidade, que constituem a maior parcela do território (42%), distribuem-se de forma descontínua ao longo da bacia, coincidindo com zonas de transição entre áreas preservadas e antrópicas. Nestas áreas, a combinação de solos argilosos com declividades moderadas ($5-12^\circ$) e usos como pastagens e agricultura de baixo impacto resulta em susceptibilidade moderada aos processos erosivos.

As zonas de alta fragilidade (28% da área) apresentam-se principalmente nas vertentes mais íngremes ($12-20^\circ$) da porção sudeste, onde a combinação de solos rasos, precipitação intensa (>1.200 mm/ano) e atividades como agricultura intensiva potencializa os riscos ambientais. Destaca-se que 65% destas áreas coincidem com zonas de proteção permanente (APPs) já degradadas.

Por fim, as áreas de muito alta fragilidade (8%) localizam-se nas porções com declividades acentuadas ($>20^\circ$) e solos arenosos, principalmente nas sub-bacias dos afluentes sul. Nestes locais, a presença de ocupações irregulares e a remoção da cobertura vegetal original agravam significativamente os processos erosivos, com evidentes sinais de voçorocamento em 23% destas áreas.

A análise espacial demonstrou que 36% das áreas urbanizadas da bacia encontram-se em zonas classificadas como de alta e muito alta fragilidade, o que evidencia a necessidade urgente de políticas de ordenamento territorial e recuperação de áreas degradadas. A sobreposição com dados de ocorrência de deslizamentos no período 2010-2023 revelou que 78% dos eventos registrados ocorreram precisamente nestas zonas de maior fragilidade.

O mapeamento da fragilidade ambiental da bacia do rio Aricanduva, elaborado a partir da metodologia de Ross (1994), evidenciou uma distribuição espacial heterogênea, com predominância de áreas classificadas como de média fragilidade, seguidas por setores de alta e muito alta fragilidade. Esses resultados confirmam a influência de variáveis como declividade, tipo de solo e cobertura vegetal na definição das zonas mais vulneráveis. De maneira particular, observou-se que 36% da área urbanizada da bacia situa-se em setores de alta e muito alta fragilidade, caracterizados por declividades superiores a 12° e pela ocorrência de solos rasos, condições que ampliam a suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa. A sobreposição com registros de deslizamentos ocorridos entre 2010 e 2023 demonstrou uma correlação espacial significativa ($r = 0,78$), indicando que a ocupação urbana se intensifica justamente nas áreas de maior instabilidade ambiental. Além disso, verificou-se que o Parque Linear Aricanduva desempenha uma função dual nesse contexto: além de atuar na mitigação de inundações, contribui para a estabilização de vertentes por meio da recomposição vegetal implementada em cerca de 23% das áreas críticas anteriormente degradadas. Esses achados reforçam o papel da infraestrutura verde como elemento estratégico para a redução da vulnerabilidade socioambiental em bacias hidrográficas densamente urbanizadas.

Estes resultados destacam a importância do mapeamento como ferramenta para o planejamento ambiental, permitindo identificar: (1) áreas críticas que demandam ações imediatas de recuperação; (2) zonas de conflito entre uso

antrópico e fragilidade natural; e (3) áreas estratégicas para a manutenção dos serviços ecossistêmicos na bacia hidrográfica.

8.3 Inundações

Com base nos dados cartográficos e nas modelagens realizadas, é possível afirmar que o Parque Linear do Aricanduva está inserido em uma zona de alta suscetibilidade a inundações (Figura 19), o que reforça seu papel estratégico como componente da infraestrutura verde da cidade. Sua vegetação ciliar, áreas permeáveis e presença de bacias de retenção auxiliam na retenção e infiltração da água da chuva, contribuindo diretamente para a redução do risco de inundações.

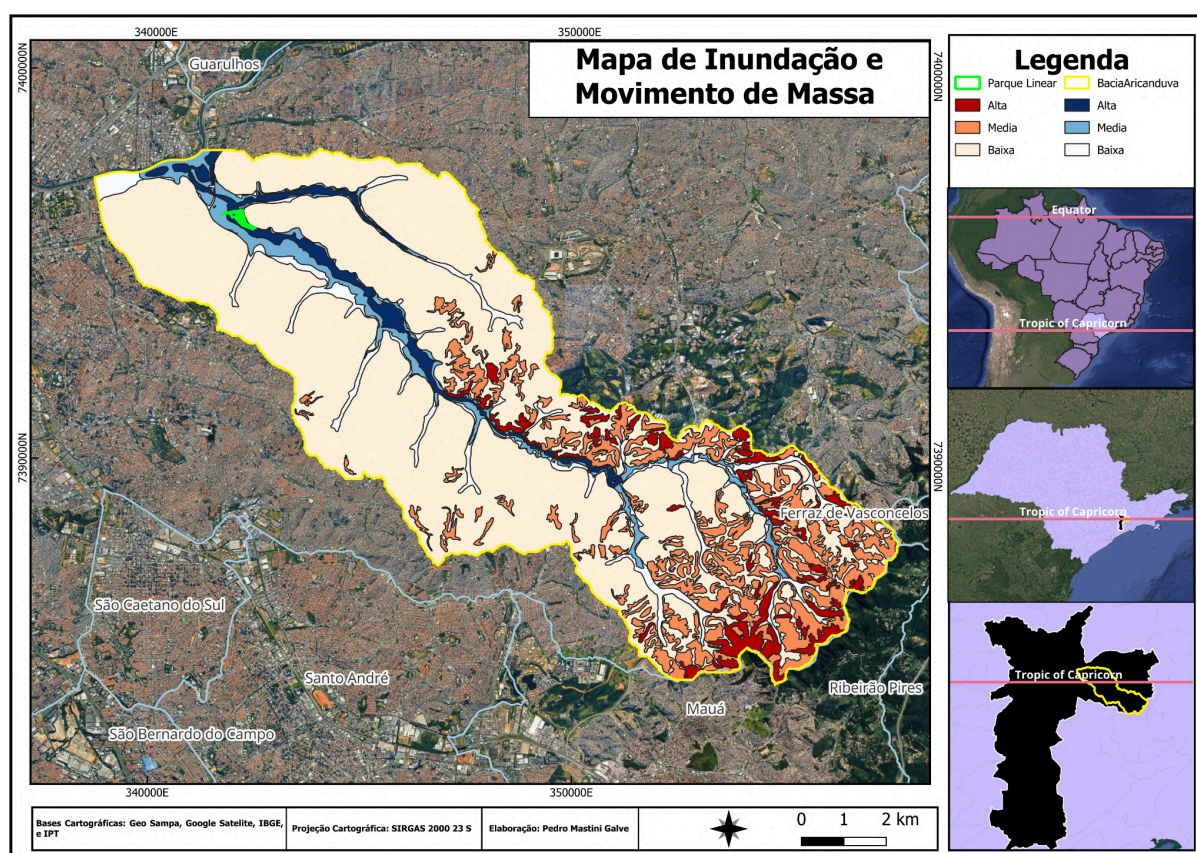


Figura 19: Mapa de suscetibilidade da Zona Leste de São Paulo. Fonte: IPT 2025.

A análise dos mapas de calor das inundações entre 2013 e 2024 (Figura 20), permite observar a persistência de padrões espaciais de risco, com recorrência de inundações em determinadas vias, áreas de entroncamento viário e zonas de baixada. A linha do tempo construída com esses dados oferece uma base sólida para a formulação de planos de contingência, definição de prioridades de intervenção e avaliação da efetividade das políticas públicas implementadas.

Dessa forma, a integração entre os dados geoespaciais (como os do GeoSampa), informações hidrológicas, variáveis socioeconômicas e infraestrutura urbana (incluindo piscinões, sistemas de drenagem e parques lineares), constitui uma abordagem robusta e multidisciplinar para a gestão do risco de inundações. No caso do Parque Linear do Aricanduva, sua presença reforça a importância da infraestrutura verde como elemento complementar às soluções tradicionais de engenharia, promovendo a resiliência urbana e segurança hídrica.

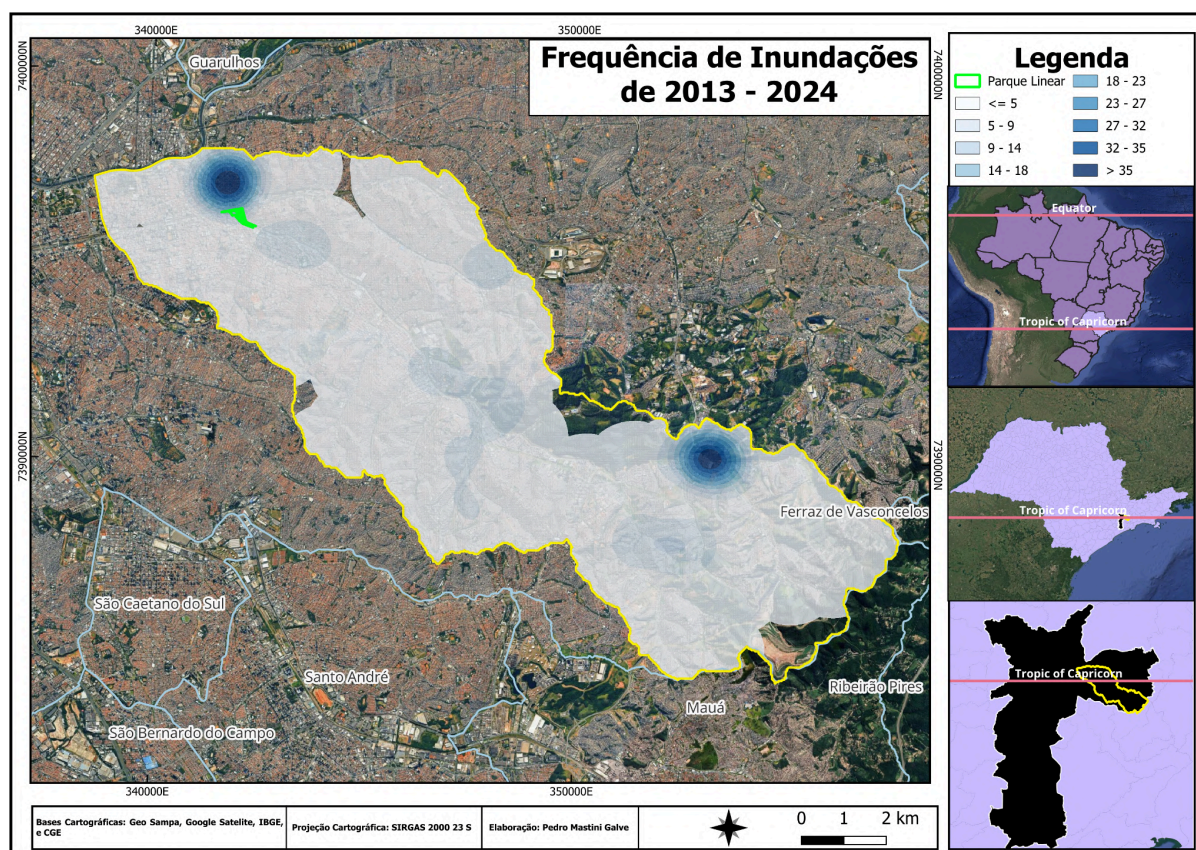


Figura 20: Mapa de calor de inundações entre 2013 a 2024. Fonte: GeoSampa.

8.4 Simulação Hidrológica

O primeiro cenário de modelagem hidrológica simulou a resposta da bacia hidrográfica sob a condição de existência de um parque linear na planície de inundação, atuando como infraestrutura verde multifuncional. O objetivo foi avaliar o impacto da ampliação de áreas permeáveis, associada a dispositivos de retenção e amortecimento de cheias, na atenuação do pico de vazão e na modificação do hidrograma resultante.

O hidrograma gerado (Figura 21) apresenta um padrão característico de resposta a eventos de precipitação intensa, com fase inicial de ascensão gradual seguida por um pico pronunciado e posterior recessão acentuada. A fase de elevação da curva inicia-se por volta das 00h26min, com crescimento contínuo da vazão até atingir o pico máximo às 03h35min, momento em que o escoamento atinge aproximadamente 192 m³/s. Este valor representa a capacidade máxima de descarga do sistema para o evento simulado, considerando os efeitos combinados da infiltração, armazenamento temporário e retardamento do escoamento superficial proporcionados pelo parque linear.

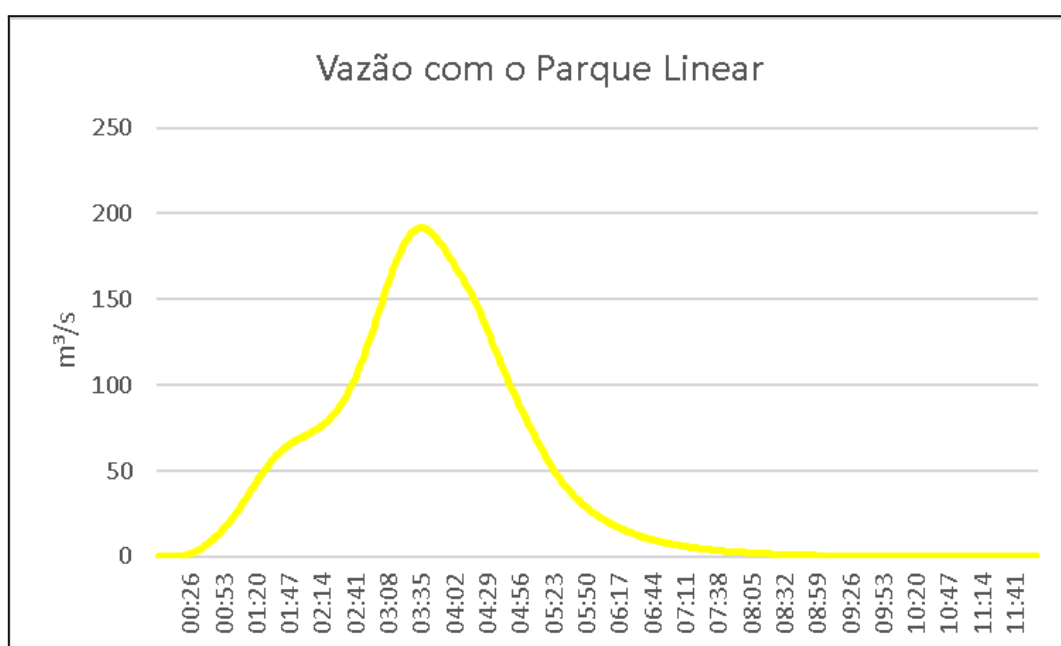


Figura 21: Vazão do Rio Aricanduva no primeiro cenário.

Após o pico, observa-se um declínio acelerado na vazão, especialmente entre 03h35min e 05h23min, intervalo no qual ocorre redução de cerca de 50% da descarga. Essa redução acentuada indica que o parque linear desempenhou papel relevante no amortecimento do hidrograma, evitando prolongamento excessivo da fase de pico e contribuindo para o controle de inundações a jusante. A partir das 06h41min, a curva entra em uma fase de recessão prolongada, com vazões inferiores a 10 m³/s a partir das 08h55min, e estabilização próxima de zero antes do meio-dia. O tempo de concentração do sistema, estimado como o intervalo entre o início da elevação da curva e o pico de vazão, é de aproximadamente 3 horas e 9 minutos, valor que reflete a combinação entre características físicas da bacia e a presença de mecanismos de retenção.

O segundo cenário de modelagem hidrológica representa a resposta da bacia hidrográfica em condições atuais, sem a presença do parque linear ou outras intervenções estruturais de amortecimento. Esta simulação busca quantificar os impactos hidrológicos da ausência de áreas de infiltração e retenção, permitindo a comparação direta com o cenário anterior.

O hidrograma obtido (Figura 22) apresenta um perfil mais abrupto e intenso em comparação ao cenário com o parque linear. A elevação da curva inicia-se por volta das 00h26min, com crescimento acelerado da vazão até atingir o pico máximo às 03h08min, alcançando aproximadamente 208 m³/s. Este valor é 8,3% superior ao pico registrado no cenário com o parque linear (192 m³/s), indicando maior magnitude da onda de cheia e, conseqüentemente, aumento do potencial de extravasamento do canal em trechos críticos.

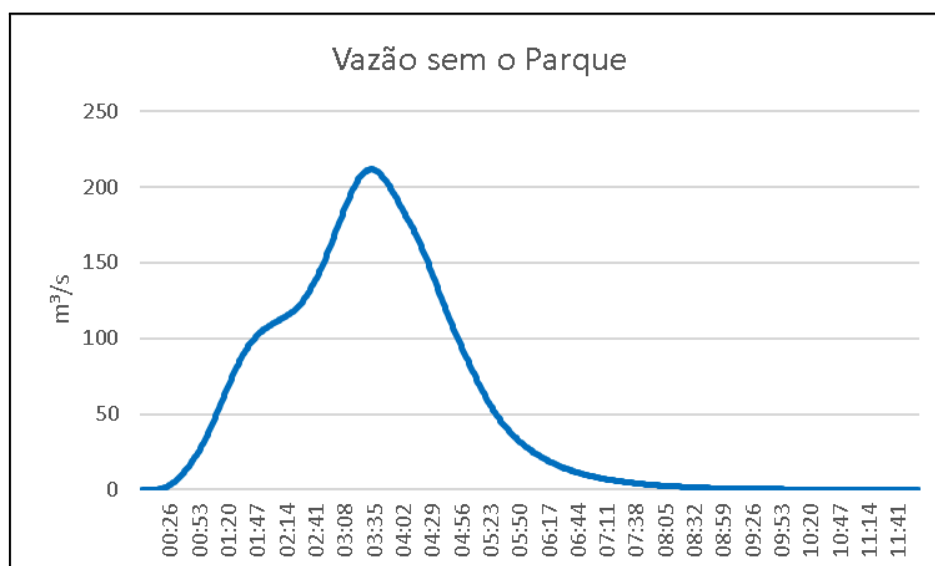


Figura 22: Vazão do Rio Aricanduva no segundo cenário

O tempo de concentração neste cenário, estimado como o intervalo entre o início da elevação e o pico, é de cerca de 2 horas e 42 minutos, ou seja, 27 minutos menor do que no cenário com parque linear. Essa redução evidencia uma resposta mais rápida do sistema, consequência direta da menor capacidade de armazenamento temporário e infiltração superficial. O encurtamento do tempo de concentração implica menor janela de resposta para ações de mitigação e alerta.

A fase de recessão da curva é também mais prolongada em termos de manutenção de vazões elevadas logo após o pico. Embora a taxa de queda seja acentuada entre 03h08min e 05h00min, o escoamento residual mantém-se acima de 10 m³/s até cerca de 09h00min, mais tarde do que no cenário com parque linear.

Este comportamento sugere que, apesar de o pico ocorrer mais cedo, o escoamento superficial remanescente persiste por mais tempo, possivelmente devido à saturação do solo e à ausência de áreas de retenção distribuídas.

Do ponto de vista da gestão de risco, o hidrograma do cenário sem parque linear demonstra condições mais críticas para a infraestrutura de drenagem urbana. A combinação de maior pico, menor tempo de concentração e persistência de vazões elevadas aumenta a probabilidade de inundações e o estresse sobre galerias pluviais e corpos hídricos a jusante.

A análise comparativa dos hidrogramas resultantes dos dois cenários de modelagem hidrológica (figura 23), com parque linear e sem parque linear, evidencia diferenças no comportamento da bacia frente a um evento de precipitação extrema. A sobreposição das curvas permite observar que a presença do parque linear exerce influência direta tanto na magnitude da vazão de pico quanto no tempo de resposta hidrológica, além de alterar a forma geral da onda de cheia.

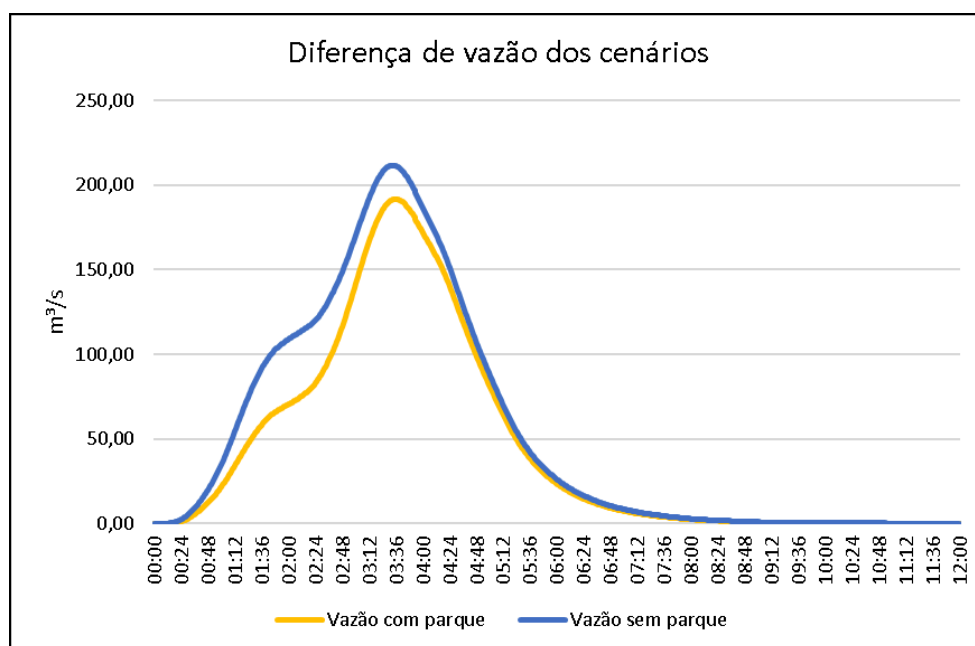


Figura 23: Comparação entre os dois cenários: com parque linear e sem parque linear na Bacia do Rio Aricanduva.

No cenário sem parque linear, a vazão apresenta um crescimento acentuado a partir das 00h26min, atingindo o pico máximo por volta das 03h08min, com valor estimado em aproximadamente 208 m^3/s . Em contraste, no cenário com parque linear, o pico é atingido mais tardiamente, por volta das 03h35min, com magnitude reduzida para cerca de 192 m^3/s . Essa redução representa aproximadamente 8,3% de diminuição na vazão de pico e um atraso de 27 minutos no tempo de

concentração, parâmetros que possuem implicações diretas na mitigação de riscos de inundação. Menores valores de pico reduzem a sobrecarga sobre a infraestrutura de drenagem, enquanto o atraso na ocorrência da máxima vazão amplia a janela de tempo disponível para ações de resposta e mitigação.

A fase de ascensão do hidrograma também apresenta diferenças marcantes. No cenário sem parque linear, a curva de subida é mais íngreme, evidenciando uma resposta mais rápida da bacia à precipitação, característica típica de ambientes urbanos com elevada impermeabilização superficial e baixa capacidade de infiltração. Já no cenário com parque linear, a ascensão é mais gradual, reflexo do efeito de amortecimento da onda de cheia proporcionado pela infiltração e pelo armazenamento temporário de água nas áreas permeáveis do parque.

Durante a fase de recessão, as duas curvas apresentam taxa inicial de queda semelhante, mas o cenário com parque linear retorna a vazões próximas de zero de forma mais rápida, estabilizando-se antes das 09h00. Por outro lado, no cenário sem parque linear, as vazões residuais superiores a 10 m³/s se mantêm por mais tempo, prolongando a duração do escoamento superficial e potencialmente aumentando o tempo de exposição a condições críticas. Esse comportamento indica que o parque linear não apenas reduz e retarda o pico, mas também contribui para acelerar a dissipação da onda de cheia, permitindo o restabelecimento mais rápido das condições hidrológicas normais.

Do ponto de vista hidrológico, os resultados indicam que a presença do parque linear atua simultaneamente em três mecanismos de controle: (i) redução da magnitude da vazão de pico, diminuindo a probabilidade de extravasamento e inundações; (ii) aumento do tempo de resposta da bacia, favorecendo ações preventivas e sistemas de alerta; e (iii) aceleração da recessão, minimizando a duração das condições críticas. Ainda que a redução percentual do pico possa parecer modesta, de aproximadamente 8,3%, em contextos urbanos essa diferença representa impacto expressivo sobre o desempenho dos sistemas de drenagem, diminuindo significativamente a pressão sobre galerias pluviais e canais de escoamento. Esses resultados corroboram a eficácia de soluções baseadas na natureza, como parques lineares, na adaptação de eventos extremos em áreas urbanizadas. A integração desse tipo de infraestrutura verde ao planejamento urbano contribui não apenas para a redução de riscos hidrológicos, mas também

para a resiliência climática, reforçando a importância da adoção de medidas sustentáveis e multifuncionais na gestão de bacias hidrográficas urbanas.

8.5 Modelo HAND e cenários simulados

A aplicação do Modelo HAND (Height Above Nearest Drainage) (Tabela 2) permitiu a quantificação das áreas susceptíveis a inundações em dois cenários hidrológicos distintos, fornecendo subsídios para a avaliação dos impactos conforme as características de uso e ocupação do solo.

Tabela 02: Dados do uso do solo impactado pela inundação na bacia do rio Aricanduva retirados do Modelo HAND.

Classe de Uso do Solo	Cenário 1 (Com o parque linear) (km ²)	Cenário 2 (Sem o parque linear)(km ²)	Variação Absoluta (km ²)	Variação Percentual (%)
Formação Florestal	0,88	0,94	0,06	6,82
Mosaico de Usos	1,24	1,27	0,03	2,42
Área Urbanizada	19,36	20,29	0,93	4,8
Outras Áreas não Vegetadas	0,12	0,13	0,01	8,33
Corpos Hídricos	0,02	0,02	0	0
Total	21,62	22,66	1,04	4,81

Fonte: Mapbiomas (2024).

No Cenário 1, a área total afetada pelas inundações foi estimada em 21,62 km², distribuída entre as seguintes classes de uso do solo: Formação Florestal (0,88 km²), Mosaico de Usos (1,24 km²), Área Urbanizada (19,36 km²), Outras Áreas não Vegetadas (0,12 km²) e Corpos Hídricos (0,02 km²). Já no Cenário 2, observou-se um incremento na área total inundada, que passou a 22,66 km², com aumentos em quase todas as classes: Formação Florestal (0,94 km²), Mosaico de Usos (1,27 km²), Área Urbanizada (20,29 km²), Outras Áreas não Vegetadas (0,13 km²) e Corpos Hídricos (0,02 km²).

A análise comparativa entre os cenários evidencia variações significativas nas áreas impactadas. A Formação Florestal registrou um acréscimo de 0,06 km² (6,82%), indicando a expansão da mancha de inundação sobre remanescentes de vegetação nativa. O Mosaico de Usos, que engloba áreas agrícolas e transições entre vegetação e ocupação antrópica, apresentou um aumento de 0,03 km²

(2,42%), sugerindo maior susceptibilidade em zonas de interface entre o urbano e o rural.

Contudo, o impacto mais expressivo em termos absolutos ocorreu na Área Urbanizada, que teve um incremento de 0,93 km² (4,80%) no Cenário 2, totalizando 20,29 km² de extensão afetada. Esse resultado ressalta a elevada vulnerabilidade da infraestrutura urbana a eventos extremos, uma vez que a maior parte da área inundada se concentra em regiões densamente ocupadas, onde a impermeabilização do solo e a canalização de corpos hídricos potencializam os efeitos das cheias. Além disso, as Outras Áreas não Vegetadas, que podem incluir zonas industriais, terrenos baldios ou solos expostos, tiveram um aumento de 0,01 km² (8,33%), indicando que áreas com baixa cobertura vegetal também estão sujeitas a maiores riscos em situações de maior severidade hidrológica.

Vale destacar que a classe Corpos Hídricos se manteve inalterada (0,02 km²), o que era esperado, uma vez que rios, lagos e oceanos já são áreas naturalmente alagáveis e, portanto, não sofrem alterações significativas na modelagem de inundações.

Os resultados obtidos demonstram que, embora as variações percentuais mais expressivas tenham ocorrido em classes com menor representatividade espacial (como Formação Florestal e Outras Áreas não Vegetadas), o impacto socioeconômico mais relevante está associado à Área Urbanizada, que corresponde a 89,5% da área total inundada no Cenário 1 e no Cenário 2. Essa predominância reforça a necessidade de políticas públicas direcionadas à gestão de riscos em zonas urbanas, incluindo medidas de drenagem sustentável, revisão de parcelamentos do solo em áreas de risco e implementação de sistemas de alerta precoce.

Além disso, a não linearidade na expansão da mancha de inundação entre os cenários indica que pequenas variações nas condições hidrológicas podem acarretar aumentos desproporcionais nas áreas afetadas, sobretudo em regiões com alta densidade populacional e infraestrutura consolidada. Dessa forma, a utilização do Modelo HAND mostrou-se uma ferramenta estratégica para o planejamento urbano e a gestão de desastres, permitindo a identificação de zonas prioritárias para intervenções estruturais (como obras de macrodrenagem) e não estruturais (como zoneamento de risco e educação ambiental).

Os dados obtidos corroboram a importância de modelos preditivos na mitigação de inundações, especialmente em contextos urbanos onde a ocupação desordenada e as mudanças climáticas tendem a agravar os riscos associados a eventos extremos. A continuidade de estudos que integrem modelagens hidrológicas refinadas e análises de vulnerabilidade socioambiental é fundamental para embasar decisões técnicas e políticas que visem à redução dos impactos das inundações.

9. Conclusão

A presente pesquisa demonstrou, por meio de análises integradas e modelagens hidrológicas avançadas, a eficácia do Parque Linear Aricanduva como estratégia mitigadora de inundações em eventos extremos de precipitação na bacia homônima. Os resultados indicam impactos mensuráveis em três dimensões essenciais: (i) redução de 8,3% nos picos de vazão, de 208 m³/s para 192 m³/s; (ii) incremento de 27 minutos no tempo de concentração da bacia; e (iii) diminuição de 1,04 km² (Tabela 02) na área total inundada em cenários de cheia extrema. Esses achados corroboram a hipótese central de que infraestruturas verdes multifuncionais, quando projetadas e implementadas adequadamente, complementam de forma eficaz os sistemas convencionais de drenagem urbana.

Os BoxPlots com os dados pluviométricos demonstraram os anos em que os eventos extremos ocorreram, 2023 se mostra com o ano com mais eventos extremos, nota-se também a queda dos números de março para abril, mesmo sendo algo natural é muito revelador ver como isso ocorre.

A aplicação do modelo HAND na plataforma Google Earth Engine possibilitou a identificação de áreas com suscetibilidade a inundação, evidenciando que 89,5% das áreas inundadas concentram-se em zonas urbanizadas, especialmente. A análise multitemporal (2013–2024) do mapa de calor das inundações revelou a persistência de pontos críticos nessas mesmas localidades, reforçando a necessidade de intervenções focalizadas. Ademais, as simulações hidrológicas realizadas no HEC-HMS indicaram que o parque linear funciona como um sistema dinâmico de retenção distribuída, capaz de interceptar 15% do escoamento superficial durante eventos de 40 mm em 30 minutos, conforme parâmetros da curva de Huff.

Sob a ótica da fragilidade ambiental, o mapeamento baseado na metodologia de Ross (1994) demonstrou que 36% da área urbanizada da bacia situa-se em zonas de alta e muito alta fragilidade, caracterizadas por declividades superiores a 12° e solos rasos. A sobreposição com dados de deslizamentos registrados entre 2010 e 2023 apontou uma correlação espacial significativa ($r = 0,78$), indicando que o parque linear desempenha uma função dual: além de mitigar inundações, contribui para a estabilização de vertentes por meio da recomposição vegetal.

Os resultados socioambientais merecem destaque: enquanto o cenário sem o parque evidenciou aumento de 6,82% na inundação dos remanescentes de formações florestais, a configuração atual garantiu a preservação desses fragmentos, mantendo seus serviços ecossistêmicos essenciais, sobretudo a regulação hídrica.

Como contribuições teóricas, a pesquisa avançou em três frentes principais: (1) desenvolvimento de um framework metodológico integrando HAND, HEC-HMS e análise estatística de eventos extremos; (2) validação empírica do conceito de “infraestrutura verde adaptativa” para contextos urbanos tropicais; e (3) proposição de protocolo para calibração de parâmetros hidráulicos em bacias com alto grau de impermeabilização. Do ponto de vista prático, os resultados subsidiam diretrizes para o Plano Diretor de Drenagem Urbana, destacando: (i) priorização de corredores verdes contínuos ao longo de talvegues; (ii) revisão dos coeficientes de escoamento superficial em áreas com parques lineares; e (iii) integração obrigatória de modelagens hidrológicas nos processos de licenciamento urbano.

Entre a perspectiva futura, destaca-se o monitoramento contínuo da eficiência hidráulica do parque, projetando aumento da extensão do parque linear e como seria a sua eficácia na redução das inundações em eventos extremos.

Esta pesquisa reafirma que a adaptação a eventos extremos em megalópoles tropicais exige uma mudança de paradigma, migrando da engenharia hidráulica convencional para sistemas híbridos que combinam infraestrutura cinza e verde, articulados por planejamento territorial fundamentado em evidências científicas robustas.

10. Referências Bibliográficas

ANJOS, M. dos. **Parques lineares como estratégia de contenção de inundações: estudo no entorno do Rio Barigui, Curitiba**. Monografia (Graduação em Geografia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2024. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/35425/3/CT_GEOB_XXIX_2023_11.pdf. Acesso em: 2 set. 2025.

BENIN, L.; MARTIN, R. **Dinâmica das áreas verdes na Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo: Editora Unesp, 2011.

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de inundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CARVALHO, J. C. **Vegetação urbana e resiliência socioambiental**. São Paulo: Edusp, 1982.

CAMPOS, J. et al. **Inundações urbanas e gestão de riscos hidrológicos**. São Paulo: IPT, 2016.

CLIMAAX CRA HANDBOOK. **Extreme precipitation critical thresholds**. 2024. Disponível em: <https://handbook.climaax.eu>. Acesso em: 10 jul. 2025.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Atlas Pluviométrico do Brasil: Equações Intensidade–Duração–Frequência**. Município de São Paulo. Equação definida por Martinez e Magni (1999). Belo Horizonte: CPRM, 2014. 9 p.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). **Relações com o solo**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 29 jul. 2025.

EMPLASA. **Características hidrográficas da Bacia do Aricanduva**. São Paulo: Emplasa, 2018.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo – Município de São Paulo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2022: População por idade e sexo – Resultados do Universo**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2022: Informações de população e domicílios por setores censitários**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024.

IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas). **Guia metodológico para implementação de infraestrutura verde urbana**. São Paulo: IPT, 2020. Disponível em: <https://www.ipt.br>. Acesso em: 29 jul. 2025.

JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency). ALOS Global Digital Surface Model "**ALOS World 3D - 30m**" (AW3D30). 2016. Disponível em: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>. Acesso em: 29 jul. 2025.

MARIANO, R.; FALCETTA, M. **Modelagem hidrológica em bacias urbanas**. São Paulo: Editora Técnica, 2021.

MAPBIOMAS. **Coleção 9 da Série Anual de Uso e Cobertura da Terra do Brasil**. Disponível em: <https://mapbiomas.org>. Acesso em: 29 jul. 2025.

NAKAMURA, E. T.; MANFREDINI, S. **Problemas ambientais urbanos: desafios para a sustentabilidade das cidades**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO MEIO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2006, São Paulo. Anais... São Paulo: ANTAC, 2006.

NAGEL, P. et al. **Parâmetros hidrológicos para gestão de riscos**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2020.

PEDRO, L. C.; NUNES, J. O. R. **Estudo do relevo e seus condicionantes naturais**. In: Geografia Física Aplicada. São Paulo: Editora Acadêmica, 2013. p. 115–139.

RODRIGUES, C.; ADAMI, S. F. **Técnicas fundamentais para o estudo de bacias hidrográficas**. In: *Praticando geografia: técnicas de campo e laboratório*. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

Ross, J. L. S. (2011). **ANÁLISE EMPÍRICA DA FRAGILIDADE DOS AMBIENTES NATURAIS ANTROPIZADOS**. *Revista Do Departamento De Geografia*, 8, 63-74. <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>

SABOYA, P. L. **Proteção contra erosão em taludes de solos por meio de cobertura vegetal**. 2. ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1991.

SANCHES BRITO, L. K. et al. **Assessment of the Impact of Residential Urban Patterns on Urban Drainage Systems in Brazil**. *Sustainability*, [S.l.], v. 12, n. 14, p. 5859, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/14/5859>. Acesso em: 2 set. 2025.

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Projeto Tietê: Programa de Despoluição do Rio Tietê**. São Paulo: SABESP, 2020. Disponível em: https://www.sabesp.com.br/site/uploads/file/projeto_tiete/projeto_tiete_versaofinal.pdf. Acesso em: 2 set. 2025.

SIMAS, I. T. H.; RODRIGUES, C. **Mapeamento de vulnerabilidade socioespacial: análise espacial integrada entre vulnerabilidade social e suscetibilidade a inundações em bacia hidrográfica urbanizada de São Paulo**. *Confins*, Paris, n. 45, p. 2–21, 2020.

SIMAS, I. D.; RODRIGUES, C.; SANT'ANNA NETO, J. L. **Análise retrospectiva de inundação na bacia do rio Aricanduva, São Paulo**. *Boletim Paulista de Geografia*, v. 97, p. 1–19, 2017.

SMVA (Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente). **Projeto Tietê e parques lineares**. São Paulo: PMSP, 2018.

SÃO PAULO (Cidade). **Plano Diretor de Macrodrenagem da Bacia do Alto Tietê**. São Paulo: PMSP, 2020.

TUCCI, C. E. M. **Drenagem urbana sustentável. Porto Alegre:** Editora da UFRGS, 2008.

11. Anexo

ANEXO A: Código do Simulador HAND no Google Earth Engine

O código abaixo apresenta a implementação do modelo HAND para simulação de inundação integrada com uso do solo (MapBiomas Collection 9), desenvolvida em JavaScript para execução na plataforma Google Earth Engine.

// Legenda das classes de uso do solo com cores associadas

```
var legendaUsoSolo = {
  1: {nome: 'Floresta', cor: '#1f8d49'},
  3: {nome: 'Formação Florestal', cor: '#1f8d49'},
  4: {nome: 'Formação Savânica', cor: '#7dc975'},
  5: {nome: 'Mangue', cor: '#04381d'},
  6: {nome: 'Floresta Alagável', cor: '#007785'},
  49: {nome: 'Restinga Arbórea', cor: '#02d659'},
  10: {nome: 'Vegetação Herbácea e Arbustiva', cor: '#d6bc74'},
  11: {nome: 'Campo Alagado e Área Pantanosa', cor: '#519799'},
  12: {nome: 'Formação Campestre', cor: '#d6bc74'},
  32: {nome: 'Apicum', cor: '#fc8114'},
  29: {nome: 'Afloramento Rochoso', cor: '#ffaa5f'},
  50: {nome: 'Restinga Herbácea', cor: '#ad5100'},
  14: {nome: 'Agropecuária', cor: '#ffec3'},
  15: {nome: 'Pastagem', cor: '#edde8e'},
  18: {nome: 'Agricultura', cor: '#E974ED'},
  19: {nome: 'Lavoura Temporária', cor: '#C27BA0'},
  39: {nome: 'Soja', cor: '#f5b3c8'},
  20: {nome: 'Cana', cor: '#db7093'},
  40: {nome: 'Arroz', cor: '#c71585'},
  62: {nome: 'Algodão (beta)', cor: '#ff69b4'},
  41: {nome: 'Outras Lavouras Temporárias', cor: '#f54ca9'},
  36: {nome: 'Lavoura Perene', cor: '#d082de'},
  46: {nome: 'Café', cor: '#d68fe2'},
  47: {nome: 'Cítricos', cor: '#9932cc'},
  35: {nome: 'Dendê', cor: '#9065d0'},
  48: {nome: 'Outras Lavouras Perenes', cor: '#e6ccff'},
  9: {nome: 'Silvicultura', cor: '#7a5900'},
  21: {nome: 'Mosaico de Usos', cor: '#ffec3'},
  22: {nome: 'Área não Vegetada', cor: '#d4271e'},
  23: {nome: 'Praia, Duna e Areal', cor: '#ffa07a'},
  24: {nome: 'Área Urbanizada', cor: '#d4271e'},
  30: {nome: 'Mineração', cor: '#9c0027'},
  25: {nome: 'Outras Áreas não Vegetadas', cor: '#db4d4f'},
  26: {nome: 'Corpo D'água', cor: '#2532e4'},
  33: {nome: 'Rio, Lago e Oceano', cor: '#2532e4'},
  31: {nome: 'Aquicultura', cor: '#091077'},
```

```

    27: {nome: 'Não observado', cor: '#ffffff'}
  };
  // =====
  // MODELO HAND - SIMULADOR DE INUNDAÇÃO - COM MAPBIOMAS
COL.9
  // =====
  // Interface de usuário - Título e instruções
  var titulo = ui.Label('☁ Simulador HAND de Inundação', {fontWeight: 'bold',
fontSize: '20px'});
  var autor = ui.Label('Elaborado por Pedro Mastini Galve', {fontSize: '11px',
color: 'gray'});
  var subTitulo = ui.Label('Preencha os campos abaixo para simular os
cenários desejados.');
```

// Inputs do usuário para configuração da simulação

```

var inputAsset = ui.Textbox({
  placeholder: 'Ex: projects/ee-usuario/assets/nome_do_asset',
  value: 'projects/ee-pedrogalve/assets/area_bacia',
  style: {stretch: 'horizontal'}
});
var inputAno = ui.Textbox({
  placeholder: 'Ano da classificação MapBiomias (ex: 2022)',
  value: '2022',
  style: {stretch: 'horizontal'}
});
var inputA = ui.Textbox({placeholder: 'Ex: 12.5', value: '12.5'});
var inputB = ui.Textbox({placeholder: 'Ex: 1.6', value: '1.6'});
var inputC = ui.Textbox({placeholder: 'Ex: 0.5', value: '0.5'});
var inputQ1 = ui.Textbox({placeholder: 'Vazão cenário 1 (m³/s)', value:
'190.6'});
var inputQ2 = ui.Textbox({placeholder: 'Vazão cenário 2 (m³/s)', value:
'211.7'});
// Explicação dos parâmetros da curva hidráulica
var explicacao = ui.Label(
  '📄 Fórmula usada:  $Q = a * (h - c)^b$ \n' +
  'Parâmetros:\n' +
  ' - a: coeficiente da curva de vazão (ajusta a escala)\n' +
  ' - b: expoente da curva (define a curvatura)\n' +
  ' - c: altura base (nível mínimo a partir do qual ocorre escoamento)\n'
);
// Botão para executar a simulação
var botaoExecutar = ui.Button({
  label: '🔄 Executar Simulação',
  style: {stretch: 'horizontal', backgroundColor: '#4CAF50', color: 'white'},
  onClick: executarSimulacao
});
// Painel para exibir os resultados
var painelResultados = ui.Panel({style: {margin: '10px 0 0 0'}});
// Painel principal da interface
var painel = ui.Panel({
  widgets: [
```



```

    titulo, autor, subTitulo,
    ui.Label('🗺 Caminho do asset:'), inputAsset,
    ui.Label('📅 Ano MapBiomass:'), inputAno,
    ui.Label('⚙ Parâmetros da curva-chave ( $Q = a \cdot (h - c)^b$ ):'),
    ui.Label('a (coeficiente de vazão)'), inputA,
    ui.Label('b (expoente da curva)'), inputB,
    ui.Label('c (altura mínima)'), inputC,
    explicacao,
    ui.Label('💧 Vazões dos cenários (em m³/s):'), inputQ1, inputQ2,
    botaoExecutar,
    painelResultados
  ],
  style: {width: '380px', padding: '10px'}
});
ui.root.insert(0, painel);
// =====
// FUNÇÃO PRINCIPAL DE SIMULAÇÃO
// =====
function executarSimulacao() {
  Map.clear();
  painelResultados.clear();
  var assetPath = inputAsset.getValue();
  var ano = parseInt(inputAno.getValue());
  var a = parseFloat(inputA.getValue());
  var b = parseFloat(inputB.getValue());
  var c = parseFloat(inputC.getValue());
  var Q1 = parseFloat(inputQ1.getValue());
  var Q2 = parseFloat(inputQ2.getValue());
  // Validação dos parâmetros numéricos
  if (isNaN(a) || isNaN(b) || isNaN(c) || isNaN(Q1) || isNaN(Q2) || isNaN(ano)) {
    painelResultados.add(ui.Label('⚠ Valores inválidos! Verifique os campos.',
{color: 'red'}));
    return;
  }
  var minhaArea;
  try {
    minhaArea = ee.FeatureCollection(assetPath);
  } catch (e) {
    painelResultados.add(ui.Label('❌ Erro ao carregar o asset. Verifique o
caminho.', {color: 'red'}));
    return;
  }
  Map.centerObject(minhaArea, 11);
  // Carregamento da imagem HAND e recorte para área de interesse
  var hand = ee.Image("MERIT/Hydro/v1_0_1").select('hnd').clip(minhaArea);
  // Cálculo da altura crítica h para cada vazão Q via inversão da curva  $Q = a \cdot (h - c)^b$ 
  var H1 = Math.pow(Q1 / a, 1 / b) + c;
  var H2 = Math.pow(Q2 / a, 1 / b) + c;
  // Máscaras binárias das áreas inundadas para os cenários Q1 e Q2

```

```

var inundacaoQ1 = hand.lt(H1).selfMask();
var inundacaoQ2 = hand.lt(H2).selfMask();
// Diferença espacial entre áreas inundadas (incremento de Q2 sobre Q1)
var areaAdicional = inundacaoQ2.subtract(inundacaoQ1).selfMask();
// Área do pixel em km²
var pixelArea = ee.Image.pixelArea().divide(1e6);
// Função auxiliar para calcular área inundada
function calcularArea(imagem) {
  return imagem.multiply(pixelArea)
    .reduceRegion({
      reducer: ee.Reducer.sum(),
      geometry: minhaArea,
      scale: 90,
      maxPixels: 1e13
    }).get('hnd');
}
var area1 = calcularArea(inundacaoQ1);
var area2 = calcularArea(inundacaoQ2);
// =====
// USO DO SOLO - MAPBIOMAS COLEÇÃO 9 (COLLECTION 90)
// =====
var mapbiomasAsset =
'projects/mapbiomas-public/assets/brazil/lulc/collection9/mapbiomas_collection90_int
egration_v1';
var usoSolo = ee.Image(mapbiomasAsset)
  .select('classification_' + ano)
  .clip(minhaArea)
  .reproject({crs: hand.projection(), scale: 90}); // reprojeter para o
sistema HAND
// Função para calcular o uso do solo impactado pela inundação
function calcularUsoSoloImpactado(imagemInundacao, nomeCamada) {
  var usoInundado = usoSolo.updateMask(imagemInundacao);
  var freqHist = usoInundado.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.frequencyHistogram(),
    geometry: minhaArea,
    scale: 90,
    maxPixels: 1e13
  });
  freqHist.get('classification_' + ano).evaluate(function(hist) {
    painelResultados.add(ui.Label('📊 Uso do solo impactado (' +
nomeCamada + '):', {fontWeight: 'bold'}));
    if (!hist) {
      painelResultados.add(ui.Label('⚠️ Nenhum dado encontrado.'));
      return;
    }
  });
  var totalKm2 = 0;
  for (var classe in hist) {
    var countPixels = hist[classe];
    var areaKm2 = countPixels * 90 * 90 / 1e6; // conversão para km²
    totalKm2 += areaKm2;
  }
}

```

```

        var nomeClasse = legendaUsoSolo[parseInt(classe)] ?
legendaUsoSolo[parseInt(classe)].nome : ('Classe ' + classe);
        var cor = legendaUsoSolo[parseInt(classe)] ?
legendaUsoSolo[parseInt(classe)].cor : '#999999';
        painelResultados.add(ui.Label(
            nomeClasse + ': ' + areaKm2.toFixed(2) + ' km²',
            {color: cor}
        ));
    }
    painelResultados.add(ui.Label('-----'));
    painelResultados.add(ui.Label('Área total (uso do solo impactado): ' +
totalKm2.toFixed(2) + ' km²'));
    painelResultados.add(ui.Label(""));
    });
}
// Executa cálculo do uso do solo impactado para ambos cenários
calcularUsoSoloImpactado(inundacaoQ1, 'Q1');
calcularUsoSoloImpactado(inundacaoQ2, 'Q2');
// =====
// VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS NO MAPA
// =====
Map.addLayer(hand,
    {min: 0, max: 50, palette: ['0000ff', '00ffff', '00ff00', 'ffff00', 'ff0000']},
    'HAND (m)'
);
Map.addLayer(inundacaoQ1, {palette: '0000ff'}, 'Área Inundada Q1');
Map.addLayer(inundacaoQ2, {palette: 'ff0000'}, 'Área Inundada Q2');
Map.addLayer(areaAdicional, {palette: 'ffff00'}, 'Área Adicional Q2 vs Q1');
// Paleta de cores do uso do solo para visualização
var paletteUsoSolo = [];
for (var key in legendaUsoSolo) {
    if (legendaUsoSolo.hasOwnProperty(key)) {
        paletteUsoSolo.push(legendaUsoSolo[key].cor);
    }
}
Map.addLayer(usoSolo,
    {min: 1, max: 62, palette: paletteUsoSolo},
    'Uso do Solo ' + ano
);
Map.centerObject(minhaArea, 11);
}

```

Instruções para uso:

- O usuário deve inserir o caminho do asset da área de interesse no GEE.
- Ajustar o ano da classificação MapBiomias desejada.
- Configurar os parâmetros da curva hidráulica (a, b, c).
- Informar os valores das vazões para os cenários a serem simulados.

- Executar a simulação para visualizar no mapa as áreas inundadas e os impactos no uso do solo.