

## **SOLEIRAS DE FUNDO SÃO SOLUÇÕES EFETIVAS EM BACIAS URBANIZADAS?**

*Kauê Leocádio Gomes<sup>1\*</sup>; Álvaro Luiz Marcolino Mateus<sup>1</sup>; Mateo Hernández Sánchez<sup>1</sup> & Eduardo Mario Mendingo<sup>1</sup>*

**RESUMO** - O Rio Aricanduva (SP) possui um histórico de inundações, motivando a instalação de soleiras para dissipação de energia. Este estudo avalia a eficácia atual dessas estruturas na atenuação de cheias. A metodologia integrou imagens de satélite e Modelo Digital de Elevação (MDE) para representar o canal. Simulações hidrodinâmicas 2D em regime não permanente foram conduzidas no software HEC-RAS para um evento de TR 25 anos, comparando cenários com e sem as soleiras. A abordagem de análise comparativa garantiu a validade dos resultados frente às incertezas do modelo. Os resultados indicam que as estruturas reduziram a vazão de pico em apenas 4,9%, sem atrasar sua ocorrência. Ademais, ampliaram a área alagada em 0,087 km<sup>2</sup> (aumento de 19,63%), agravando inundações marginais. Conclui-se que as soleiras não cumprem plenamente sua função dissipadora, evidenciando a necessidade de repensar essas infraestruturas cinzas.

**Palavras-Chave:** Infraestrutura Cinza, HEC-RAS 2D, Inundação Urbana.

**ABSTRACT** - The Aricanduva River (SP) has a history of flooding, leading to the installation of energy dissipation sills. This study evaluates the current effectiveness of these structures in flood attenuation. The methodology integrated satellite imagery and a Digital Elevation Model (DEM) to represent the channel. 2D unsteady-flow hydrodynamic simulations were conducted using HEC-RAS software for a 25-year return period event, comparing scenarios with and without the sills. A comparative analysis approach ensured result validity despite model uncertainties. Results indicate that the structures reduced peak flow by only 4.9%, with no delay in timing. Furthermore, they expanded the flooded area by 0.087 km<sup>2</sup> (a 19.63% increase), worsening marginal flooding. It is concluded that the sills do not fully fulfill their dissipative function, highlighting the need to rethink these gray infrastructures.

**Key Words:** Gray Infrastructure, HEC-RAS 2D, Urban Flooding.

<sup>1</sup>) Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento, São Carlos, SP, Brasil

\*) Autor Correspondente: (13) 996662599, [kauelg@usp.br](mailto:kauelg@usp.br)

## INTRODUÇÃO

A urbanização acelerada e frequentemente desordenada nos países em desenvolvimento, intensificada a partir da década de 1970, resultou em profundas alterações no ciclo hidrológico local, notadamente pelo aumento da frequência e intensidade das inundações urbanas (TUCCI, 2004). Agravando esse cenário, as mudanças climáticas globais projetam um aumento na presença de dias chuvosos e mais severos de precipitações extremas para o curto prazo (2021-2040) (IPCC, 2023). Esse cenário torna a adaptação e a manutenção da drenagem urbana prioridades urgentes para a resiliência das cidades.

Inserida nesse contexto crítico, a sub-bacia hidrográfica do Rio Aricanduva localizada na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e pertencente à UGRHI 6, constitui a terceira maior bacia do município de São Paulo, apresentando aproximadamente 100,4 km<sup>2</sup> de área de drenagem e atuando como afluente direta do Rio Tietê (SILVA; GOUVEIA, 2024). A região caracteriza-se por uma consolidação urbana densa, estimando-se que 73% de sua superfície total encontre-se impermeabilizada (SÃO PAULO, 2022). Essa severa alteração no uso e ocupação do solo reduz drasticamente a capacidade de infiltração natural, resultando em um incremento expressivo dos deflúvios superficiais e das vazões de pico de projeto durante eventos pluviométricos sazonais.

Consequentemente, a bacia convive com um histórico crônico de inundações que, apesar das diversas intervenções de engenharia aplicadas ao longo das últimas décadas, persistem. Análises da evolução dos eventos de inundação entre 1990 e 2020 demonstram que a construção de grandes estruturas de contenção no início dos anos 2000 foi insuficiente para mitigar os alagamentos de forma consistente a longo prazo (SANTOS, 2025). Preocupantemente, o estudo indicou uma alteração recente no padrão de resposta hidrológica da bacia: volumes médios de chuva menores têm sido capazes de causar inundações de proporções iguais ou superiores às históricas, evidenciando a potencial ineficiência do atual sistema de macro e microdrenagem frente ao adensamento urbano contínuo e às novas pressões climáticas.

Historicamente, as respostas do poder público para o controle de cheias no Rio Aricanduva são pautadas na construção de infraestruturas cinzas. Entre 1981 e 1988, o rio foi canalizado; em 2002, foram inaugurados oito reservatórios de retenção ao longo de seu curso, totalizando uma capacidade de armazenamento de 1,6 milhão de metros cúbicos (SANTOS, 2025). Também começando em 2002, foram instaladas 15 soleiras de dissipação de energia ao longo de um trecho classificado como "canal-reservatório" (FCTH, 2022). O propósito dessas soleiras é atuar como estrangulamentos hidráulicos para atenuar o pico de cheia a jusante. Entretanto, não há na literatura

recente estudos hidrodinâmicos detalhados que comprovem como esse canal-reservatório atua no atual contexto hidrológico, restando a dúvida se essas soleiras ainda cumprem sua função de controle ou se geram efeitos de remanso que agravam as inundações locais nas margens adjacentes a montante das estruturas. Diante dessa lacuna científica e operacional, é necessário um diagnóstico preciso do atual funcionamento hidráulico dessas intervenções.

O presente trabalho tem como objetivo caracterizar a geometria das estruturas de dissipação de energia localizadas no canal do Rio Aricanduva, no trecho compreendido entre o pontilhão da Avenida Aricanduva e o cruzamento com a Avenida Itaquera, e avaliar a sua efetividade hidrodinâmica na atenuação de ondas de cheia. Por meio da elaboração de uma modelagem computacional e simulação em regime não permanente, avaliou-se o comportamento do fluxo e a extensão das áreas alagadas sob um cenário de precipitação com tempo de retorno de 25 anos, comparando as condições com e sem as estruturas. Dessa forma, a pesquisa fornece uma discussão sobre o impacto real dessas infraestruturas cinzas para repensar futuras tomadas de decisão na gestão de inundações do município.

## METODOLOGIA

Para avaliar o impacto hidrodinâmico das estruturas de dissipação do Rio Aricanduva, a pesquisa foi estruturada em três etapas principais: levantamento de dados espaciais e geométricos, configuração e refinamento do modelo computacional, e simulação em regime não permanente de cenários de escoamento comparativos. O detalhamento operacional deste fluxo de trabalho está sintetizado na Figura 1.

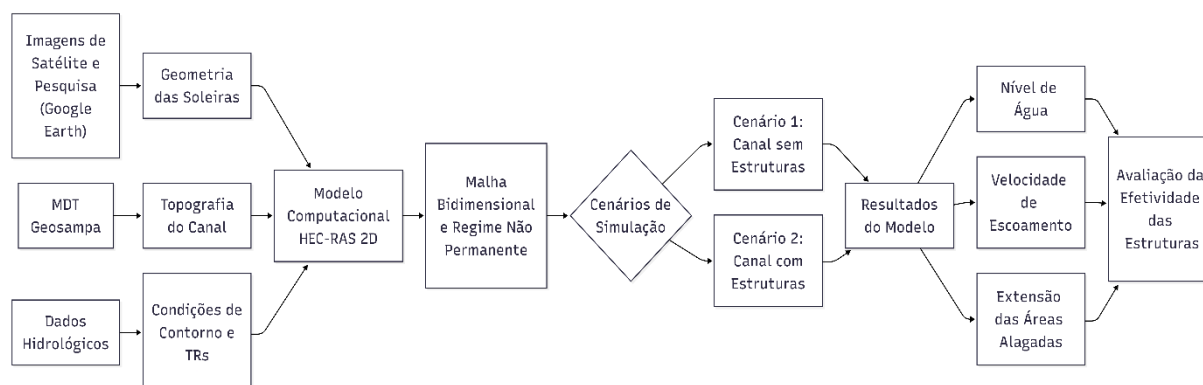


Figura 1 - Fluxograma Síntese da Metodologia do Trabalho. Fonte: Elaboração dos autores

A área de estudo compreende o trecho do Rio Aricanduva (Figura 2) definido como "canal-reservatório", situado entre os reservatórios de retenção Aricanduva III e Taboão. Conforme estabelecido pelo Caderno de Bacia Hidrográfica do Rio Aricanduva (SÃO PAULO, 2022),

adotou-se para este trecho uma seção transversal trapezoidal teórica, composta por uma base inferior de 13 metros, profundidade de 5 metros e base superior de 30 metros.

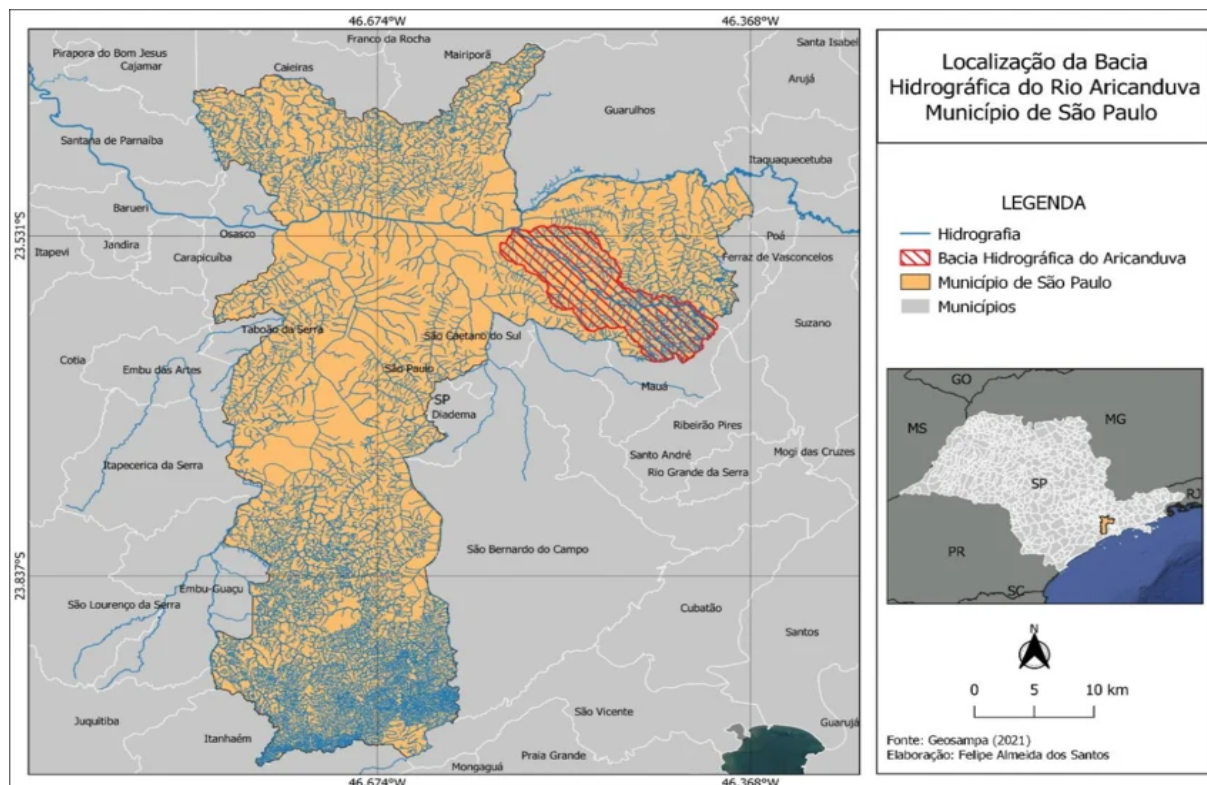


Figura 2 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Aricanduva. Fonte: SANTOS, 2025

A representação espacial do canal e o mapeamento das 15 soleiras foram realizados via imagens de satélite (Google Earth) e pesquisa bibliográfica. Devido à ausência de documentação original contendo a geometria exata e os parâmetros de projeto dessas estruturas, a caracterização geométrica foi realizada de forma indireta, com uma aproximação de 0,5 metro. As soleiras possuem duas formas, uma com vão central livre, e outra com vão lateral tendo como base o próprio fundo do canal. As coordenadas e dimensões obtidas para os 15 estrangulamentos estão anexadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Estrangulamentos (soleiras de dissipação) identificados no rio Aricanduva.

| Est. | Lat.       | Lon.       | Largura a Esquerda (m) | Vão (m) | Largura a direita (m) | Comprimento de Crista (m) | Taxa de Área Reduzida pela Soleira (%) |
|------|------------|------------|------------------------|---------|-----------------------|---------------------------|----------------------------------------|
| E1   | -23,559780 | -46,512989 | 0,00                   | 5,00    | 9,50                  | 13,00                     | 27,25                                  |
| E2   | -23,561095 | -46,511694 | 9,00                   | 5,00    | 0,00                  | 11,00                     | 20,04                                  |
| E3   | -23,562447 | -46,509843 | 0,00                   | 5,00    | 13,00                 | 13,00                     | 15,01                                  |
| E4   | -23,567629 | -46,505766 | 7,00                   | 5,00    | 0,00                  | 7,50                      | 11,75                                  |
| E5   | -23,570217 | -46,504173 | 0,00                   | 5,00    | 6,50                  | 11,00                     | 20,01                                  |

|     |            |            |      |      |      |       |       |
|-----|------------|------------|------|------|------|-------|-------|
| E6  | -23,573267 | -46,504062 | 5,00 | 5,00 | 4,00 | 7,00  | 9,56  |
| E7  | -23,576703 | -46,501629 | 5,00 | 5,00 | 5,00 | 8,00  | 29,15 |
| E8  | -23,578508 | -46,498711 | 0,00 | 6,00 | 9,50 | 8,50  | 18,13 |
| E9  | -23,579676 | -46,493253 | 3,00 | 5,00 | 5,00 | 7,00  | 14,80 |
| E10 | -23,583050 | -46,490409 | 4,50 | 3,00 | 4,50 | 10,50 | 32,46 |
| E11 | -23,586848 | -46,486500 | 3,00 | 5,00 | 4,50 | 12,00 | 26,12 |
| E12 | -23,587306 | -46,482290 | 0,00 | 3,50 | 9,00 | 10,50 | 29,06 |
| E13 | -23,589895 | -46,479201 | 3,50 | 3,00 | 5,00 | 7,00  | 28,59 |
| E14 | -23,591139 | -46,476397 | 5,00 | 3,00 | 4,50 | 10,50 | 35,73 |
| E15 | -23,592665 | -46,473196 | 4,00 | 3,00 | 5,00 | 11,50 | 24,27 |

Fonte: Google Earth, 2026

A representação espacial do terreno foi elaborada no software HEC-RAS 2D a partir de um MDE LiDAR obtido na plataforma Geosampa, com resolução espacial de 1 metro. Inconsistências de elevação identificadas na calha original do MDE foram tratadas e corrigidas por meio do editor geométrico do software, permitindo a implementação da geometria trapezoidal teórica para regularizar o canal. A adaptação do MDE para reinserir as características reais do local seguiu procedimentos específicos de modelagem computacional:

1. **Canal Principal:** Modificado por meio do comando “channel” com a opção de substituição total (“replace terrain value”), aplicando a largura do fundo e a declividade média extraídas do CBH. Nas encostas, utilizou-se o mesmo comando com a largura superior e inclinação dos taludes, aplicando-se, contudo, a substituição parcial (“lower (Terrain/User) Value”). Esta decisão fundamentou-se em imagens de satélite, que demonstraram que as cristas superiores não seguem perfeitamente a geometria teórica do CBH, preservando-se assim as características topográficas marginais originais do MDE.
2. **Afluentes:** Foram modelados 15 afluentes contribuintes ao trecho. Aplicou-se o comando “channel” com substituição total para os trechos dotados de seção artificializada e substituição parcial para os canais de seção natural.
3. **Estruturas de Fundo (Soleiras):** As 15 estruturas de dissipação foram inseridas matematicamente utilizando a ferramenta “weir”. Para cada estrutura, traçou-se o eixo central perpendicular ao canal, associando as dimensões de comprimento longitudinal, largura das soleiras, altura e vãos livres. O coeficiente do vertedor (“weir coefficient”) foi mantido no valor padrão de 1,66.

A região de estudo foi delimitada por uma zona de escoamento bidimensional (2D Flow Area) abrangendo as áreas baixas adjacentes ao canal, adotando-se uma malha computacional com células base de 10x10 metros. No eixo do canal principal e de seus afluentes, foram introduzidas breaklines para refinar a malha em células de 5x5 metros, garantindo o alinhamento das faces computacionais com o fluxo preferencial da água. A adoção da malha de 5x5 metros na calha representou um compromisso entre a precisão hidrodinâmica e o tempo de processamento computacional, embora malhas ainda mais refinadas sejam recomendadas para mitigar potenciais instabilidades locais. Para a representação do revestimento em concreto do canal, adotou-se o coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) de 0,02.

As simulações hidrodinâmicas foram executadas em regime de escoamento não permanente. As entradas de vazão foram introduzidas por linhas de condição de contorno externas à malha computacional, contabilizando os 15 afluentes no transcurso do canal. A vazão de montante do canal principal representa o escoamento até a saída do reservatório Aricanduva III, considerando os reservatórios on-line presentes na montante da bacia, aplicando a metodologia de simulação descrita em SÁNCHEZ (2025). A condição de jusante se determinou na seção do canal a 20 metros depois da última soleira de dissipação.

Os hidrogramas contribuintes foram construídos implementando o método do SCS, por meio do cálculo do parâmetro do número de curva em condições antecedentes de umidade tipo II e usando as curvas de intensidade-duração-frequência do CBH (SÃO PAULO, 2022) para definir as chuvas de projeto. Para avaliar o efeito das soleiras no canal, adotou-se um evento de projeto com um Tempo de Retorno (TR) de 25 anos, duração do evento de 360 minutos e distribuição hietográfica temporal de Huff no 2º quartil. Adicionalmente, para diminuir as instabilidades da modelagem, definiu-se uma simulação de aquecimento compreendida de um evento de projeto com as mesmas características do anterior, mas com um TR de 2 anos. Os hidrogramas resultantes foram inseridos em intervalos discretos de 10 minutos e numa janela de simulação de 24 horas.

A condição de contorno de jusante foi configurada como profundidade normal (*“normal depth”*). Em todas as linhas de contorno de entrada e saída, a declividade para distribuição da vazão foi fixada em 0,003 m/m, condizente com as declividades do trecho final do Rio Aricanduva (menores que 0,005 m/m segundo SÃO PAULO, 2022).

Para a resolução das equações hidrodinâmicas, selecionou-se o conjunto de equações de águas rasas com momento estrito (SWE-EM - Stricter Momentum), limitando-se a um número máximo de 40 iterações por passo de tempo. O intervalo de tempo computacional (time step) foi ajustado de

forma dinâmica em função do número de Courant (variando entre 0,2 e 1,0), estabelecendo-se um passo de tempo base de 0,2 segundos, oscilando dinamicamente entre os limites de 0,01 e 6,4 segundos. Como simplificação metodológica frente ao escopo computacional, o sistema complexo de reservatórios de retenção da bacia e sua dinâmica interna de fluxos não foram incorporados na modelagem.

A avaliação de efetividade consistiu no processamento e comparação direta de dois cenários operacionais: Cenário 1 (Canal Liso): Calha regularizada sem as estruturas de dissipação de energia. Cenário 2 (Base): Calha operando com a inserção das 15 soleiras de dissipação. A análise baseia-se em uma abordagem comparativa relativa. Como ambos os cenários foram submetidos de forma idêntica às mesmas premissas, simplificações, inconsistências do MDE e condições de contorno hidrológicas. Dessa forma, é isolado o impacto físico gerado exclusivamente pelas estruturas de dissipação no escoamento, validando as conclusões obtidas sobre a eficiência e o comportamento do remanso, a despeito das incertezas dos dados de entrada.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A modelagem computacional executada no ambiente HEC-RAS 2D permitiu avaliar o comportamento do fluxo sob regime não permanente para o evento crítico de projeto com tempo de retorno de 25 anos, como visto na Figura 3.

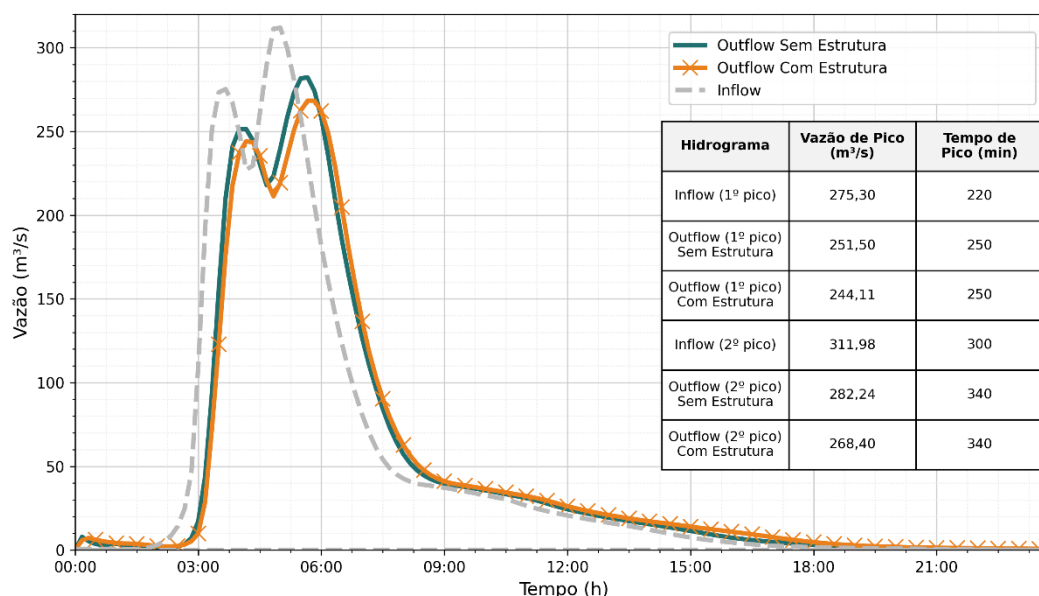


Figura 3 – Série Temporal da comparação do hidrograma de entrada com os hidrogramas de saída do canal. Fonte: Elaboração dos autores (2026)

Os resultados gerados para o cenário de referência (Cenário A – Canal Liso), demonstram a resposta natural da calha regularizada. Sob essas condições, o hidrograma de saída registra um primeiro pico de vazão de 251,50 m³/s às 04:10 horas do tempo de simulação, associado a um pico

inicial de entrada de 275,30 m<sup>3</sup>/s ocorrido às 03:40 horas. O segundo e mais crítico pico de entrada, alcança a magnitude de 311,98 m<sup>3</sup>/s às 05:00 horas, gerando uma vazão máxima de saída no canal liso de 282,24 m<sup>3</sup>/s às 05:40 horas.

Com a inserção das soleiras no modelo (Cenário B – Real), o comportamento do escoamento sofreu alterações sutis na sua descarga. O primeiro pico de saída foi reduzido para 244,11 m<sup>3</sup>/s, mantendo-se o tempo de ocorrência às 04:10 horas. Para o segundo pico, o Cenário B apresentou uma vazão máxima de jusante de 268,40 m<sup>3</sup>/s, manifestando-se exatamente no mesmo horário observado no cenário de referência (05:40 horas).

A comparação entre os cenários indica que as soleiras reduziram a vazão de pico em apenas 4,9%, sem induzir atraso temporal na onda de cheia. Conforme escrito no caderno do CBH, o canal-reservatório do Rio Aricanduva foi originalmente projetado para mitigar os picos de inundação a jusante por meio das soleiras de dissipação que induzem a reserva temporária do volume escoado ao longo da própria calha. Contudo, a redução observada foi inferior a 5% e nenhum retardo no deslocamento da vazão máxima, evidenciando que, para a magnitude de um evento com TR de 25 anos, o propósito principal dessas estruturas não está sendo atendido com a demanda da sub-bacia.

A simulação bidimensional evidenciou que a inserção das estruturas (Cenário B) resultou em um acréscimo das manchas de inundação (Figura 4). Essa expansão ocorreu principalmente nas margens laterais do canal, agravando o alagamento em vias que já haviam sido atingidas no cenário de referência (Cenário A).

Quantitativamente, a área de inundação do cenário base, sem as estruturas, foi de 0,447 km<sup>2</sup>. A presença das soleiras gerou um incremento de 0,087 km<sup>2</sup>, representando um aumento expressivo de aproximadamente 19,63% da área total alagada no trecho de estudo.

Na literatura, Czarnecki et al. (2014) concluem que soleiras de baixo desnível (low-grade weirs) instaladas em canais de drenagem agrícola de leito natural, atuam apenas na retenção da água por um período mais longo dentro das calhas de drenagem, sem aumentar o potencial de extravasamento. Contudo, os resultados obtidos para o córrego Aricanduva evidenciam o oposto, demonstrando que nessa bacia urbanizada contendo um canal revestido em concreto e hidraulicamente regularizado, onde a rugosidade reduzida favorece a propagação do remanso e a perda de área de armazenamento lateral, o estrangulamento do fluxo provocado pelas soleiras gerou um efeito de remanso que superou a capacidade da calha, aumentando a área alagada na Avenida Aricanduva.

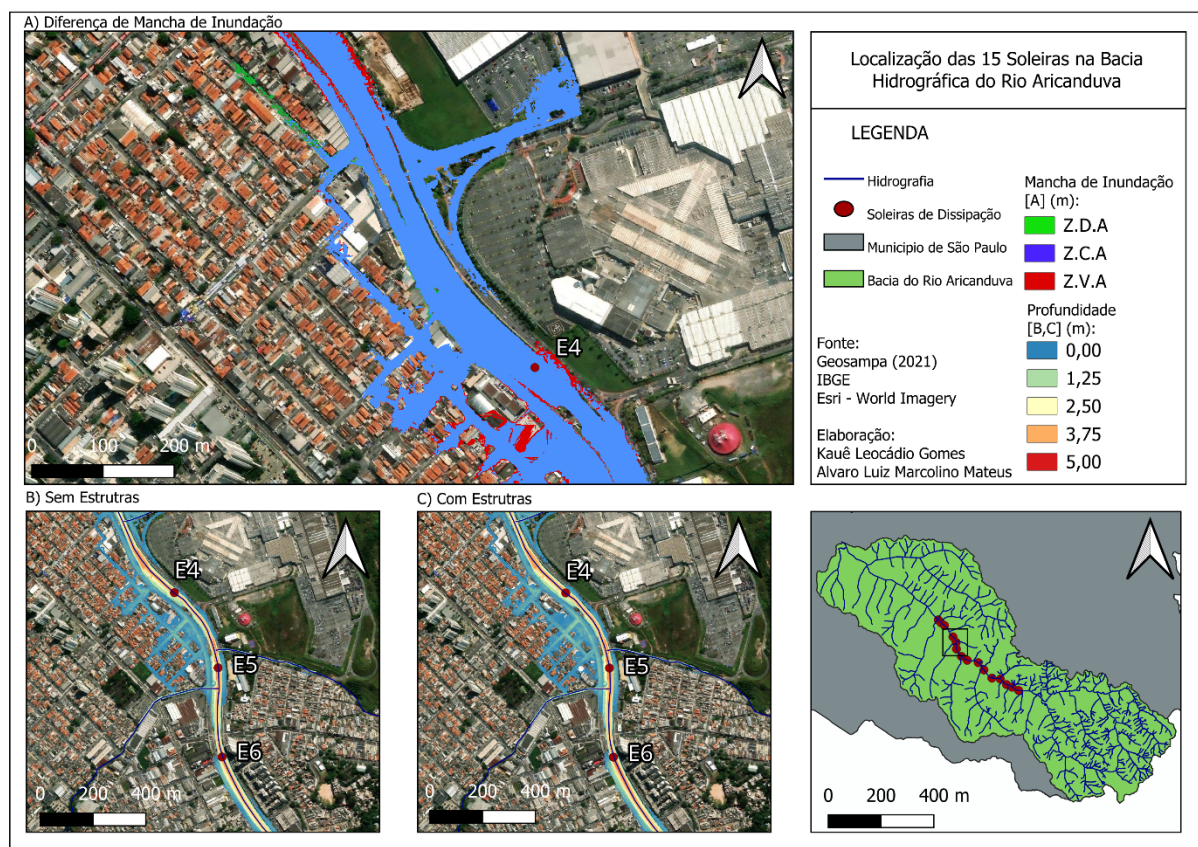


Figura 4 – Mapa da localização das Estruturas 4, 5 e 6, com a demonstração da propagação da mancha de inundação: (A) Mostra a comparação de manchas de inundação entre os cenários, onde mostram as Zonas que Deixaram de ser Alagadas (verde), Zonas que Continuam Alagadas (azul) e Zonas Viraram Alagadas (vermelho) com a inserção das soleiras na calha (B) Mostra a mancha de inundação no cenário 1; (c) Mostra a mancha de inundação no cenário 2. Fonte: Elaboração dos autores (2026)

## CONCLUSÃO

Este estudo avaliou a eficácia hidrodinâmica das soleiras de dissipação de energia instaladas no canal-reservatório do Rio Aricanduva, utilizando modelagem bidimensional no software HEC-RAS 2D para um evento crítico com tempo de retorno de 25 anos. Os resultados demonstraram que as estruturas não estão cumprindo plenamente o seu propósito de controle de cheias, visto que promoveram uma atenuação de apenas 4,9% na vazão de pico, sem ocasionar nenhum atraso em seu tempo de ocorrência. Pelo contrário, a presença das soleiras induziu um extravasamento que resultou em um acréscimo de 0,087 km<sup>2</sup> (19,63%) na extensão da área alagada, agravando inundações em vias marginais. Conclui-se, portanto, que a infraestrutura cinza analisada, conhecida como canal-reservatório, apresentou um comportamento ineficiente para: (i) a diminuição da mancha de inundação e (ii) o aumento do desfasamento temporal da vazão pico no cenário analisado. Este estudo fornece informação técnica necessária para tomadas de decisão na gestão e adaptação do sistema de drenagem frente ao contínuo risco de inundações no município.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a análise de malhas computacionais mais refinadas na calha do rio para evitar potenciais instabilidades numéricas e avaliar a sensibilidade da modelagem. Por outro lado, é sugerido a realização de levantamentos topográficos e batimétricos locais para aferir a geometria exata das soleiras, reduzindo as incertezas da atual caracterização por satélite e das suposições ao inserir estas estruturas ao modelo. Adicionalmente, sugere-se a incorporação explícita da dinâmica hidráulica dos reservatórios de retenção off-line encontradas na parte central da bacia (Aricanduva V e Inhumas) tanto no modelo de terreno, quanto nas operações como condições de contorno internas, pois este é de extrema importância para a área de estudo analisada. A simulação de múltiplos cenários pluviométricos englobando diferentes tempos de retorno é recomendada para expandir a compreensão sobre a resiliência do sistema do Rio Aricanduva frente a eventos climáticos extremos.

## REFERÊNCIAS

- IPCC (2023). Intergovernmental Panel on Climate Change. *Relatório síntese do sexto relatório de avaliação (AR6)*. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2023. Disponível em: [https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy\\_of\\_IPC\\_C\\_Longer\\_Report\\_2023\\_Portugues.pdf](https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPC_C_Longer_Report_2023_Portugues.pdf), pp.116-117. Acesso em: 30 mar. 2026.
- PRINCE CZARNECKI, J.M.; BAKER, B.H.; BRISON, A.M.; KRÖGER, R. Evaluating flood risk and alterations to hydraulic patterns following installation of low-grade weirs in agricultural systems. *Agricultural Water Management*, [S.l.], v. 146, p. 69–74, dez. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.018>. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.018>.
- SANTOS, F. (2025). “*Evolução dos episódios de inundação na Bacia do Aricanduva (1995-2020)*”, *Município de São Paulo – SP*. Espaço em Revista 27(1), pp. 127 – 153.
- SILVA, N.; GOUVEIA, I. (2024). “*O uso da cartografia histórica na análise das modificações da paisagem na bacia hidrográfica Rio Aricanduva/SP*” in *Anais do XV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental*, [S.l.], Nov. 2024.
- TUCCI, CARLOS. Gerenciamento integrado das inundações urbanas no Brasil. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 59–73, 2004. DOI: <https://doi.org/10.21168/rega.v1n1.p59-73>. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21168/rega.v1n1.p59-73>.
- Sánchez, M. H. (2025). *A novel framework for flood vulnerability assessment and fuzzy-controlled reservoir optimization in data-scarce urban watersheds* (Dissertation, Universidade de São Paulo).
- SÃO PAULO (Município). Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras; FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA. *Caderno de bacia hidrográfica: bacia do córrego Aricanduva*. 2. ed. São Paulo: FCTH/SIURB, 2022. 278 p.