

Parametric Analysis of Flood Mitigation Policies in Brazilian Climate Action Plans

Iago Longue Martins¹, Cristina Engel de Alvarez¹

¹ Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brazil
iago.martins@ufes.br; cristina.engel@ufes.br

Abstract. Climate change has been increasing the vulnerability of cities to extreme weather events, especially those related to environmental dynamics already observed in each area. Considering that South America is one of the subcontinents that suffer the most from flooding, it is important to analyze how its cities have been preparing to face such extreme conditions. This paper aims to investigate the strategies indicated in climate action plans for mitigation and adaptation to flooding through the application of a parametric tool. To achieve this end, the methodology comprises five steps – from data collection to digital simulation. The results attained demonstrate that the strategies indicated in the plans are still very generic and incipient, so that the application of parametric methodologies of analysis and simulation can contribute to the searching for more effective and relevant actions.

Keywords: Design Based on Nature, Climate Change, Rainfall Flood, Parametric Tools.

1 Introdução

A partir da Revolução Industrial, período em que a interferência humana sobre o ambiente teve sua escala e intensidade ampliada, as intervenções antrópicas e seu modo de produção do espaço construído vêm impactando as dinâmicas ambientais. Esse processo é entendido como uma nova fase geológica do planeta, chamada de Antropoceno, e uma de suas expressões mais fortes são as mudanças climáticas (Steffen et al., 2015). Nesse contexto, observa-se um acirramento na ocorrência de eventos climáticos extremos (Alvarez et al., 2021), gerando uma demanda por resiliência através da implementação de medidas para mitigação e adaptação aos seus efeitos.

O Acordo de Paris, ratificado em 2015, foi um passo importante na tomada de compromissos para limitação do aumento da temperatura média global em até 1.5°C em relação aos níveis pré-industriais – faixa com impactos controláveis para a humanidade e o meio ambiente (UN, 2015; Hoegh-Guldberg et al., 2019). O delineamento desses compromissos se constitui

como um processo de governança multinível, abrangendo nações, estados e municípios. Porém, cabe especificamente aos municípios a adoção de medidas mais complexas pela sua própria vinculação ao território urbano (De Macedo et al., 2023). Assim, as estratégias indicadas pelos municípios para o âmbito das mudanças climáticas são, geralmente, reunidas e apresentadas por meio de um plano de ação climática. No caso do Brasil, apenas quatro cidades desenvolveram seus planos até a elaboração desta pesquisa, demonstrando o desafio que o país ainda tem por superar. Essas cidades são Curitiba, Salvador, São Paulo e Rio de Janeiro, sendo que as duas primeiras lançaram seus planos no final do ano de 2020 e, as duas últimas, no ano de 2021, tratando-se, pois, de iniciativas recentes considerando o panorama mundial.

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, os subcontinentes da América do Sul e Central, do qual o Brasil faz parte, são os mais afetados pelos riscos associados aos alagamentos (IPCC, 2022). Ao verificar a ocorrência geral de alagamentos no país, verifica-se que entre 2015 e 2018, o Brasil sofreu com 1.424 alagamentos, afetando 6,2 milhões de brasileiros, principalmente nas regiões Sudeste, Nordeste e Sul (ANA, 2018). Com a perspectiva de acirramento de eventos climáticos extremos potencializados pelas mudanças climáticas, espera-se que essa tendência observada exponha ainda mais as cidades brasileiras aos riscos relacionados a essa tipologia de desastre. Com isso, é importante compreender como as cidades brasileiras vêm se preparando para enfrentar tais cenários.

Com isso, o presente artigo se propõe a analisar, através de simulações paramétricas, a efetividade de políticas voltadas à mitigação de alagamentos indicadas nos planos de ação climática de cidades brasileiras. A aplicação das metodologias paramétricas nesse tipo de análise pretende demonstrar como tal abordagem pode contribuir para tornar mais efetiva a adoção de medidas para mitigar os efeitos das mudanças climáticas. A premissa defendida é de que as simulações e análises paramétricas permitem antecipar os resultados de políticas e estratégias aplicadas no planejamento urbano, permitindo ajustes antes mesmo de sua implementação e melhorando, assim, a atuação dos governos diante de temáticas sensíveis (Rabite de Almeida et al., 2023), como é o caso das mudanças climáticas.

1.1 Alagamentos Urbanos e Medidas Compensatórias

As dinâmicas hidrológicas são influenciadas por variáveis relacionadas tanto ao território quanto ao clima. As variáveis vinculadas ao território se expressam através das características da bacia hidrográfica, como o tipo de solo, sua cobertura, sendo ela vegetal ou construída, e sua área de abrangência. A parte relacionada ao clima, por sua vez, compreende a intensidade de precipitação que atinge o local (Pruski et al., 2014).

Os impactos da urbanização sobre essas dinâmicas se dão, principalmente, por meio da impermeabilização do solo (Tucci, 2000), que resulta da remoção da cobertura vegetal e da instalação de infraestruturas construídas. Quanto

mais impermeáveis forem os materiais aplicados, maior será o volume de escoamento superficial gerado. Visando reduzir esses impactos da urbanização sobre as dinâmicas hidrológicas, uma série de estratégias compensatórias vem sendo exploradas nas últimas décadas. Tais estratégias se utilizam de mecanismos baseados na natureza, aproveitando dos serviços ecossistêmicos prestados pela vegetação e por alguns materiais, atuando a partir de duas vertentes principais: do incremento à permeabilidade do solo e à interceptação pluvial.

O aumento da permeabilidade do solo se dá através da utilização de materiais porosos, que permitem a infiltração da água da chuva no solo, como blocos intertravados, e da distribuição de forrações vegetais (Pruski et al., 2014). A questão da interceptação pluvial, por sua vez, é um dos serviços ecossistêmicos oferecidos pela vegetação, capaz de reter em sua estrutura parte do volume precipitado, reduzindo, consequentemente, o volume de escoamento superficial gerado através da diminuição da intensidade da precipitação que atinge o solo (Fazio, 2010).

Diante desses aspectos, considerando que as mudanças climáticas atuam sobre as dinâmicas descritas, principalmente, através do aumento da intensidade de precipitação pela ocorrência de eventos climáticos extremos, as medidas compensatórias emergem como estratégias possíveis transformar as cidades em um ambiente mais resiliente.

2 Metodologia

A metodologia delineada para esta pesquisa (Figura 1) comprehende cinco etapas principais: (1) identificação dos parâmetros relevantes para análise, (2) seleção de dados para alimentação dos parâmetros, (3) designação de dados para modulação dos contextos simulados, (4) simulação e (5) análise dos resultados obtidos.

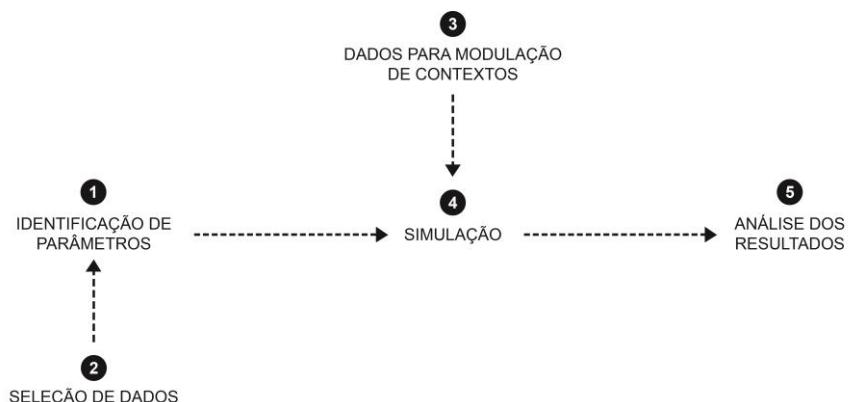


Figura 1. Sistematização da metodologia. Fonte: Os autores, 2023.

Como as simulações paramétricas dependem de fatores quantificáveis, a primeira etapa desta pesquisa é orientada a partir das demandas expressas pelo método de cálculo definido para quantificar e qualificar as análises pretendidas. Nesse sentido, o método de cálculo selecionado consiste numa adaptação do Método Racional para estimativa do volume de escoamento superficial. O método visou incluir parâmetros vinculados à interceptação pluvial pela vegetação, permitindo uma análise integrada de medidas compensatórias para controle de alagamentos através da ferramenta paramétrica intitulada *Parametree* (Martins & Lyra, 2022). Isso justifica a sua incorporação como um dos processos delineados para esta pesquisa, já que combina tanto a questão dos materiais utilizados em meio urbano quanto da distribuição de vegetação.

A segunda etapa metodológica consiste na seleção de dados para alimentação dos parâmetros identificados anteriormente. Tais dados serão obtidos a partir da análise dos planos de ação climática desenvolvidos por cidades brasileiras, mapeando as estratégias indicadas para mitigação e/ou adaptação à problemática dos alagamentos pluviais. Nesse processo, será observada a indicação de índices ou metas para que seja possível simular a sua efetividade diante de contextos de precipitação de alta intensidade.

A terceira etapa corresponde à designação de dados para modulação das simulações paramétricas para reprodução de contextos de precipitação de alta intensidade. Assim, serão consideradas chuvas com período de retorno de 100 anos para simular condições extremas de precipitação provocadas pelas mudanças climáticas. Essa estratégia, inclusive, já vem sendo aplicada pela cidade de São Paulo no planejamento dos sistemas de drenagem urbana, visando superar a sua tendência natural de obsolescência frente à intensificação da frequência de eventos climáticos extremos (PMSP, 2021).

A quarta etapa metodológica consiste no desenvolvimento das simulações digitais, as quais serão empreendidas por meio do software Rhinoceros e de seu *plug-in* Grasshopper, aplicando a ferramenta paramétrica *Parametree* (Martins & Lyra, 2022) em recortes urbanos que sintetizam as condições de cada uma das cidades mencionadas anteriormente. Os resultados obtidos para o volume de escoamento superficial gerado no recorte urbano atual e no contexto simulado com a aplicação das estratégias previstas nos planos de ação climática serão comparados e analisados, contemplando, então, a quinta e última etapa metodológica.

3 Resultados

3.1 Identificação de Parâmetros Relevantes para Análise

Conforme mencionado, o método de cálculo escolhido para a realização das análises orienta a identificação das variáveis relevantes para as

simulações. Isso ocorre, pois são as equações que estabelecem relações entre as variáveis necessárias para interpretação do contexto. Nesse caso, a equação adaptada do Método Racional, proposta por Martins & Lyra (2022) e aplicável em simulações paramétricas através da ferramenta *Parametree* considera como dado de entrada as áreas ocupadas por diferentes tipologias de material e feição do ambiente construído, como gramados, edificações e asfalto, e, também, por variadas tipologias de arborização, além dos dados de modulação climática específicos do local analisado (Figura 2).

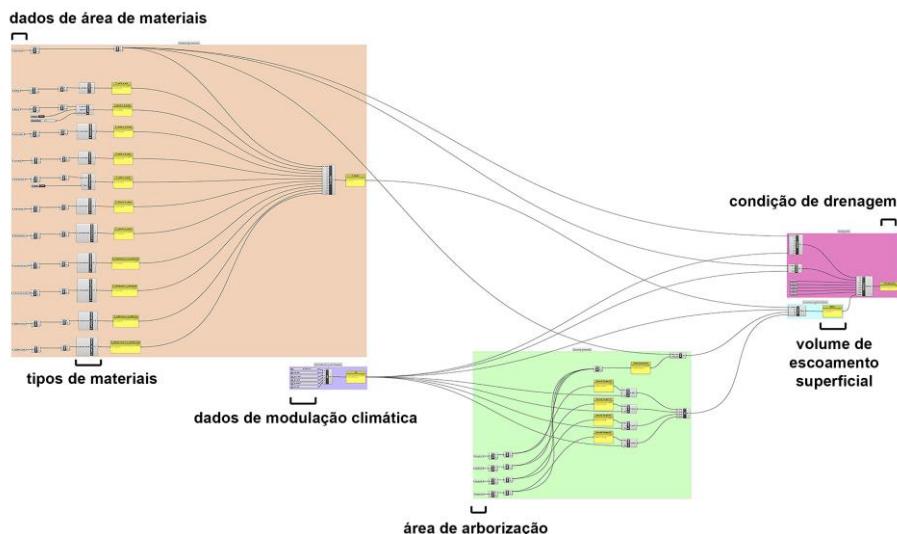


Figura 2. Estruturação da ferramenta. Fonte: Adaptado de Martins & Lyra (2022).

Assim, são essas as variáveis de área, tanto de materiais quanto de distribuição de vegetação, que devem ser trabalhadas nas etapas subsequentes de levantamento de dados, observando as estratégias propostas pelos planos de ação climática para mitigação da problemática dos alagamentos. Os dados de modulação climática, por sua vez, serão obtidos através de levantamentos direcionados às cidades selecionadas para análise.

3.2 Análise de Planos de Ação Climática

Ao realizar um estudo das estratégias apresentadas pelos planos de ação climática (Tabela 1) desenvolvidos pelas cidades de Curitiba, Rio de Janeiro, São Paulo e Salvador, notou-se que apenas Salvador e Rio de Janeiro avançaram em suas propostas sugerindo índices para expansão de áreas verdes e de espaços urbanos permeáveis, ainda que de maneira genérica. Já as cidades de Curitiba e São Paulo demonstraram a intenção de expandir as áreas permeáveis nos espaços públicos municipais e incentivar a implantação de soluções baseadas na natureza promovendo uma drenagem urbana

sustentável, porém sem indicar quais índices deverão ser perseguidos nesse processo, além das estratégias voltadas para expansão de áreas verdes. Por esse motivo, tais cidades serão desconsideradas na etapa de coleta de dados climáticos e nas simulações paramétricas, por não fornecerem um detalhamento adequado para a análise de suas propostas.

Tabela 1. Estratégias delineadas para mitigação de alagamentos urbanos potencializados pelas mudanças climáticas.

Cidades	Estratégias Previstas
Curitiba	Implementação de soluções baseadas para drenagem urbana
Rio de Janeiro	Aumento da área verde urbana Implantação de 300 km de sistemas naturais de drenagem nas ruas
Salvador	Aumento da taxa de área verde urbana de 30 m ² /habitante para 36 m ² /habitante Aplicação de sistemas naturais de drenagem urbana
São Paulo	Aumento da taxa de permeabilidade urbana Aumento da oferta de área verde urbana

Fonte: Os autores, 2023.

3.3 Modulação de Variáveis Climáticas

A intensidade da precipitação é mais um aspecto importante para as simulações por interferir na capacidade de interceptação pluvial da vegetação (Capiella et al., 2005; Alves, 2015), bem como na efetividade das propostas de aumento da permeabilidade do solo, já que taxas altas de pluviosidade tendem a pressionar os sistemas de drenagem instalados.

Assim, como as mudanças climáticas se refletem no aumento da ocorrência de eventos climáticos extremos, espera-se que índices de pluviosidade raros, ou seja, com períodos de retorno muito longos, tornem-se cada vez mais recorrentes. Por esse motivo, justifica-se a decisão de considerar uma faixa temporal de 100 anos para o período de retorno aplicado nas simulações.

O Método Racional, procedimento de cálculo adotado para mensurar o volume de escoamento superficial gerado em meio urbano, é composto por um conjunto de equações que incluem variáveis relacionadas à modulação dos dados de precipitação obtidos para determinada localidade. A equação responsável por esse processo (Pruski et al., 2014) é indicada a seguir.

$$i_m = \frac{K \cdot T^a}{(t + b)^c} \quad (1)$$

Conforme demonstrado pela equação, i_m representa a intensidade máxima de precipitação obtida para o contexto geoclimático selecionado; T se relaciona ao período de retorno de precipitações; t considera o tempo de concentração da bacia hidrográfica; e as variáveis K , a , b e c são fatores adimensionais de modulação de dados climáticos, os quais dependem da localização da cidade. Com isso, tais variáveis apresentam valores diferentes a depender da localização da área de análise. Assim, as variáveis condicionadas respectivamente para as cidades do Rio de Janeiro e Salvador são apresentadas a seguir, na Tabela 2.

Tabela 2. Compilado de variáveis climáticas para as cidades selecionadas.

Cidades	K	a	b	c
Rio de Janeiro	99,154	0,217	26	1,15
Salvador	1065,55	0,163	24	0,743

Fonte: Adaptado de Festi, 2011.

3.4 Simulações Paramétricas

A partir da coleta de dados realizada nas etapas metodológicas anteriores, foram realizadas simulações para cada um dos contextos pretendidos para as cidades do Rio de Janeiro e Salvador utilizando a ferramenta *Parametree*. Os recortes urbanos selecionados para representação da ambiência atual das cidades do Rio de Janeiro e Salvador estão representados na Figura 3.



Figura 3. Recortes urbanos selecionados para as cidades do Rio de Janeiro e Salvador. Fonte: Os autores, 2023.

Ressalta-se que a escolha de um trecho da Rua Voluntários da Pátria, em Botafogo, no Rio de Janeiro, se justifica por ser um ponto recorrente de

alagamentos (COR-RIO, 2023); já o trecho da Rua Miguel Burnier, próximo ao Shopping da Barra, em Salvador, foi escolhido pela baixa distribuição de arborização urbana. Ambos os recortes possuem mesma área e estão localizados no âmbito de microbacias planas e próximas ao mar. Por possuírem contextos geográficos e hidrológicos similares, a comparação entre os resultados obtidos pelas simulações visa ressaltar a efetividade das estratégias selecionadas para mitigar os efeitos causados por precipitações de alta intensidade. Além disso, como o Método Racional considera a estimativa do escoamento superficial para um local contido em uma única bacia hidrográfica, o delineamento topográfico do recorte torna-se dispensável, já que o método também trabalha a partir de planificações.

A partir desse processo, foi iniciada a etapa de simulações projetuais, implementando as estratégias propostas pelos respectivos planos de ação climática das cidades do Rio de Janeiro e Salvador para a problemática dos alagamentos. Os resultados obtidos para a cidade do Rio de Janeiro são apresentados na Figura 4.

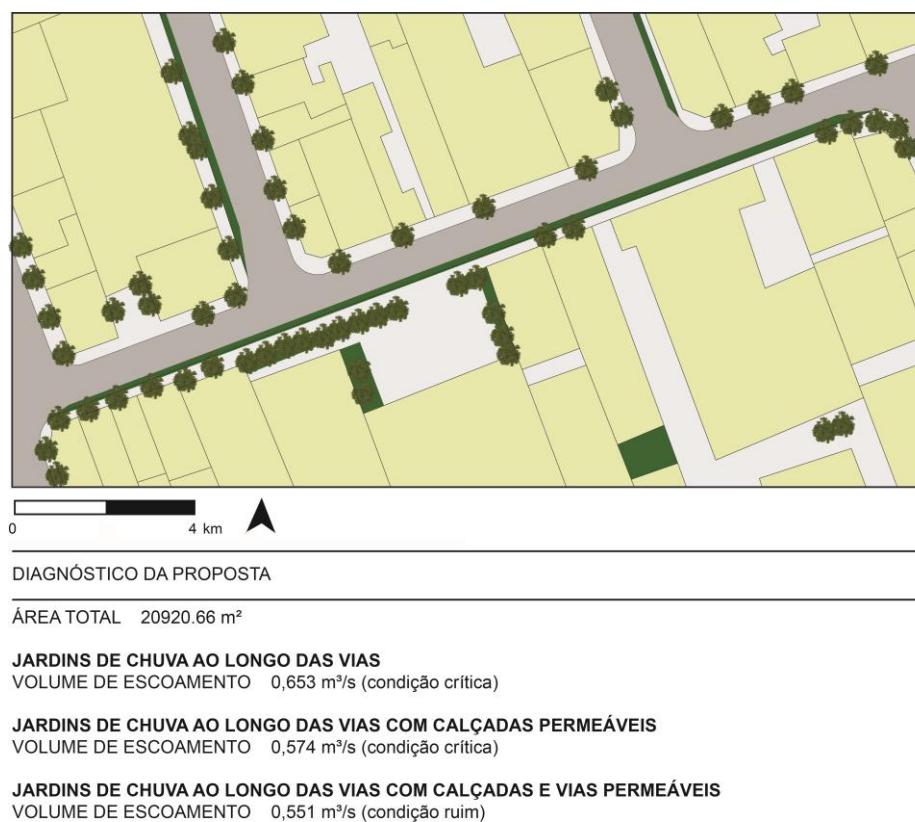


Figura 4. Resultado do diagnóstico gerado pela aplicação da ferramenta para as estratégias previstas pela cidade do Rio de Janeiro. Fonte: Os autores, 2023.

Acerca da estratégia proposta pela cidade do Rio de Janeiro de implantar 300 km de soluções de drenagem sustentável ao longo das vias, observa-se que, dependendo da complexidade das ações implementadas, a sua efetividade para mitigação e adaptação aos alagamentos pode não ser adequada. Mesmo com a combinação de jardins de chuva e pavimentação permeável, a contribuição para a melhoria das condições de drenagem do local ainda foi baixa. Isso destaca a importância das simulações digitais como metodologia de estudos e análise de propostas de intervenção climática com vistas à escolha do conjunto de soluções que melhor responde às dinâmicas previstas.

Da mesma forma, a estratégia indicada pela cidade de Salvador de ampliar para 36 m²/habitante o índice de área verde urbana pode não ser suficiente para lidar com as demandas oriundas da crise climática. Conforme apresentado pela prefeitura da cidade, a taxa atual de verde urbano de Salvador está em 30 m²/habitante (PMS, 2020). Assim, se a população local é de 2,418 milhões de habitantes, logo estima-se que haja 72,54 km² de área verde, o que equivale a cerca de 36% do território urbano de Salvador. Entretanto, essas áreas não estão homogeneamente distribuídas pelo tecido construído, concentrando-se em porções de parques e grandes vazios urbanos, conforme demonstrado pela Figura 5.



Figura 5. Esquema da distribuição das massas vegetadas na região da cidade de Salvador. Fonte: Os autores, 2023.

Com isso, a intenção de expandir para 36 m²/habitante a taxa de área verde urbana de Salvador, elevaria esse índice a uma porcentagem de 44% do território urbano. Os impactos da implementação dessa estratégia para as dinâmicas hidrológicas são apresentados pela Figura 6.



DIAGNÓSTICO DA PROPOSTA

ÁREA TOTAL 20920.66 m²

ÁREA VERDE 9226.57 m² (50% gramado / 50% arborização)
 VOLUME DE ESCOAMENTO 0,411 m³/s (condição ruim)

ÁREA VERDE 9226.57 m² (100% gramado com arborização)
 VOLUME DE ESCOAMENTO 0,288 m³/s (condição regular)

Figura 6. Resultado do diagnóstico gerado pela aplicação da ferramenta para o aumento da área verde urbana de Salvador. Fonte: Os autores, 2023.

De acordo com os resultados obtidos nas simulações, para que a taxa de área verde pretendida pela cidade de Salvador seja efetiva no contexto de mitigação e adaptação aos efeitos dos alagamentos potencializados pelas mudanças climáticas, seria necessário que ela fosse distribuída de maneira difusa pelo tecido urbano, priorizando as áreas mais impermeabilizadas da cidade. Além disso, a implementação desses espaços vegetados deveria contar com uma composição complexa de vegetação, combinando tanto o aumento da permeabilidade do solo pelo aumento da oferta de áreas verdes permeáveis quanto da interceptação pluvial na estrutura arbórea plantada.

4 Discussão

Após as simulações empreendidas, tornou-se evidente o quanto incipiente ainda são as propostas para mitigação e adaptação aos alagamentos pluviais potencializados pelas mudanças climáticas trazidas pelos planos de ação analisados. Como as mudanças climáticas refletem uma problemática

complexa, em que uma multiplicidade de variáveis interage entre si, pode-se definir tal problemática como sendo perniciosa.

De acordo com Rittel & Weber (1973), os problemas perniciosos são aqueles que abrangem tamanha complexidade de modo que nenhuma proposta seja capaz de satisfazer completamente todas as variáveis envolvidas no processo. A melhor proposta é aquela que se adeque a um limiar ótimo para cada padrão de variável, o que demanda estudos minuciosos e procedimentos constantes de tentativas e aprimoramentos. Nesse sentido, as ferramentas paramétricas se constituem como uma metodologia importante de ser incorporada na tomada de decisões projetuais por automatizarem e tornarem mais dinâmicas as experimentações necessárias para a compreensão da proposta que mais se adequa ao contexto analisado (Martino, 2015). Essa hipótese tornou-se evidente através das experimentações realizadas no presente estudo.

A partir das simulações realizadas com a ferramenta *Parametree*, foi possível perceber que para que as propostas apresentadas pelos planos de ação climática pudessem ser implementadas de forma bem-sucedida, seria necessário maior detalhamento. Nesse sentido as metodologias paramétricas de análise podem contribuir na busca das soluções mais pertinentes para o contexto de mitigação e adaptação aos alagamentos pluviais provocados pelas mudanças climáticas, auxiliando a encontrar índices viáveis e eficientes para atuar diante da referida problemática. Contudo, em termos de contribuições para o avanço dos procedimentos e técnicas utilizados, seria importante que a ferramenta pudesse atuar com maior autonomia propondo soluções automáticas para os contextos analisados, uma vez que as intervenções para distribuição das áreas vegetadas ainda ocorrem de forma manual e arbitrária.

Agradecimentos. Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado do Espírito Santo (FAPES) pelo apoio, através da bolsa PROCAP 2023 – Doutorado, ao desenvolvimento da pesquisa da qual se originou o presente artigo.

Referências

- Alves, P. (2015). Capacidade de interceptação pelas árvores e suas influências no escoamento superficial urbano [Doctoral Dissertation, Universidade Federal de Goiás].
- Alvarez, C. E., Kamino, G., Bussolotti, V., & Bragança, L. (2021). The relationship between climate change and the city. In L. Bragança, C. E. Alvarez, & L. F. Cabeza (Eds.), Sustainable Urban Development: topics, trends and solutions. (pp. 01-22). IOPScience.
- ANA – Agência Nacional de Águas. (2018). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual.
- Cappiella, K., Schueler, T., & Wright, T. (2005). Urban Watershed Forestry Manual Part 1: Methods for Increasing Forest Cover in a Watershed. USDA Forest Service.

- COR-RIO – Centro de Operações do Rio de Janeiro. (2023). Bolsões d'água e alagamentos.
- De Macedo, L. S. V., Jacobi, P. R., & De Oliveira, J. A. P. (2023). Paradiplomacy of cities in the Global South and multilevel climate governance: evidence from Brazil. *Global Public Policy and Governance*, 3, pp. 86–115. <https://doi.org/10.1007/s43508-023-00060-7>
- Fazio, J. (2010). How trees can retain stormwater runoff. *Tree City USA Bulletin*, (55), pp. 01-08.
- Festi, A. V. (2011). Coletânea das Equações de Chuva do Brasil. *Tópicos Especiais da Engenharia de Saneamento*.
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Guillén Bolaños, T., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I. A., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebl, K., Engelbrecht, F., Guiot, J., Hijjoka, Y., Mehrotra, S., Hope, C. W., Payne, A. J., Pörtner, H. O., Seneviratne, S. I., Thomas, A., Warren, R., Zhou, G. (2019). The human imperative of stabilizing global climate change at 1.5°C. *Science*, 365(6459), eaaw6974. <https://doi.org/10.1126/science.aaw6974>
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press.
- Martino, J. A. (2015). Algoritmos evolutivos como método para desenvolvimento de projetos de arquitetura [Doctoral Dissertation, Universidade de São Paulo].
- Martins, I. L., Lyra, A. P. (2022). Development and application of an algorithmic-parametric tool to assess the contribution of urban forestry to mitigate floods. *International Journal of Architectural Computing*, v. 20, p. 14780771221120649. <https://doi.org/10.1177/14780771221120649>
- PMS – Prefeitura Municipal de Salvador. (2020). Plano de Ação Climática.
- PMSP – Prefeitura Municipal de São Paulo. (2021). PlanClima SP. Plano de Ação Climática do Município de São Paulo 2020-2050.
- Pruski, F. F., Brandão, V. S., Silva, D. D. (2014). *Escoamento Superficial* (2). Editora UFV.
- Rabite de Almeida, C. A., do Amaral, W. D. H., & Loures Brandão, G. V. (2023). Ferramentas paramétricas para apoio ao planejamento urbano: perspectivas e desafios. *Revista Foco*, 16(2), pp. 1-20.
- Rittel, H. W. J., & Webber, M. M. (1973). Dilemmas in a General Theory of Planning. *Policy Sciences*, 4, pp. 155-169.
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., & Ludwig, C. (2015). The trajectory of the anthropocene: the great acceleration. *The Anthropocene Review*, 2(1), pp. 81-98. <https://doi.org/10.1177/2053019614564785>
- Tucci, C. E. M. (2000). *Hidrologia – ciência e aplicação*. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ABRH.
- UN – United Nations. (2015). Acordo de Paris sobre o Clima. Retrieved July 25, 2023, from <https://brasil.un.org/pt-br/88191-acordo-de-paris-sobre-o-clima>