

PROPOSTA DE METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE SOLUÇÕES BASEADAS NA NATUREZA EM AMBIENTE URBANO PARA AUMENTO DA RESILIÊNCIA CLIMÁTICA

*Gabrielly Stefanie Yacabo de Carvalho¹; Melissa Cristina Pereira Graciosa²; Giuliana Del Nero
Velasco³; Luciano Zanella⁴*

RESUMO – A arborização e a ampliação dos espaços verdes urbanos contribuem para a captura e armazenamento de carbono, para o aumento do conforto térmico e para a redução do escoamento superficial direto, favorecendo etapas do ciclo hidrológico prejudicadas pela urbanização, tais como a infiltração e a evapotranspiração. Tais medidas configuram-se como Soluções baseadas na Natureza (SBN), reconhecidas como alternativas eficazes para o aumento da resiliência climática urbana e para o manejo sustentável das águas pluviais. Apesar do avanço conceitual das SBN, observa-se lacuna científica relacionada ao desenvolvimento de metodologias quantitativas integradas para avaliação simultânea, por modelagem, da eficiência dessas soluções nos aspectos hidrológicos, climáticos e de carbono. O trabalho apresenta proposta metodológica para o desenvolvimento de método quantitativo e replicável de avaliação dos benefícios da aplicação de SBN em bacias hidrográficas urbanas, compreendendo modelagem hidrológico-hidráulica, avaliação de temperatura superficial e estimativa de captura e armazenamento de carbono. A proposta será conduzida no âmbito do projeto CCD Cidades Carbono Neutro, liderado pelo IPT, com aplicação em três bacias urbanas nos municípios de São Paulo e São José dos Campos. Os resultados têm potencial para subsidiar a formulação de políticas públicas de incorporação sistemática das SBN no planejamento urbano de municípios brasileiros.

Palavras-Chave – SBN, resiliência climática urbana, modelagem hidrológica

ABSTRACT – Urban tree planting and the expansion of green spaces contribute to carbon capture and storage, thermal comfort improvement, and the reduction of direct surface runoff, thereby supporting hydrological cycle processes impaired by urbanization, such as infiltration and evapotranspiration. These measures constitute Nature-based Solutions (NbS), recognized as effective alternatives for enhancing urban climate resilience and promoting sustainable stormwater management. Despite the conceptual advances in NbS, a scientific gap persists regarding the development of integrated quantitative methodologies capable of simultaneously assessing, through modeling, the efficiency of these solutions in hydrological, climatic, and carbon-related terms. This paper presents a research methodology proposal for developing a quantitative and replicable method to assess the benefits of NbS implementation in urban watersheds, encompassing hydrological-hydraulic modeling, land surface temperature assessment, and carbon capture and storage estimation. The proposal will be carried out within the CCD Carbon Neutral Cities project, led by IPT, with application to three urban watersheds in the municipalities of São Paulo and São José dos Campos. The results have the potential to support the formulation of public policies for the systematic incorporation of NbS into urban planning in Brazilian municipalities.

Key-words – NbS, urban climate resilience, hydrological modeling

1) Universidade Federal do ABC, Av. dos Estados, 5001, Santo André – SP, CEP 09280-560, cel (13) 996244986, gabrielly.yacabo@aluno.ufabc.edu.br

2) Universidade Federal do ABC, Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas - CECS, Av. dos Estados, 5001, Santo André – SP, CEP 09280-560, celular (11) 961787931, melissa.graciosa@ufabc.edu.br

3) Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Av. Prof. Almeida Prado, 532 - Cidade Universitária (Butantã), São Paulo - SP, CEP 05508-901, cel (11) 999095848, velasco@ipt.br

4) Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Av. Prof. Almeida Prado, 532 - Cidade Universitária (Butantã), São Paulo - SP, CEP 05508-901, tel (11) 37674671, luciano@ipt.br

INTRODUÇÃO

O modelo tradicional de urbanização, fundamentado na ampla impermeabilização dos espaços urbanos, supressão das áreas verdes e arborização, canalização e tamponamento dos corpos d'água urbanos e ocupação das planícies de inundação, provoca alterações profundas no microclima, na concentração de poluentes e na dinâmica das cheias em eventos de precipitação intensa (Garcia-Cuerva *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2024). Em um cenário de mudanças climáticas, esses processos são agravados pela maior frequência e intensidade dos eventos extremos, gerando prejuízos econômicos, materiais e humanos, além de deterioração nos indicadores de saúde pública e qualidade de vida (São Paulo, 2025).

As Soluções baseadas na Natureza (SBN) têm sido reconhecidas internacionalmente como instrumentos estratégicos de adaptação climática urbana, pela sua capacidade de responder simultaneamente a múltiplos desafios: mitigação de inundações, atenuação do efeito de ilha de calor, sequestro de carbono e promoção da biodiversidade (Seddon, 2022; Dubois *et al.*, 2025; Fang *et al.*, 2024). Apesar desse reconhecimento crescente, sua incorporação sistemática ao planejamento urbano ainda enfrenta dificuldades de implantação em escala devido à falta de metodologias quantitativas padronizadas que permitam avaliar e comparar a eficiência das SBN com critérios técnicos mensuráveis e replicáveis, necessários no âmbito de políticas públicas (Adams *et al.*, 2023; Eckert, 2025; Megyesi *et al.*, 2024).

É nesse contexto que se insere a pesquisa apresentada neste trabalho, desenvolvida no âmbito do Centro de Ciência para o Desenvolvimento - CCD Cidades Carbono Neutro, liderado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), que tem como objetivo apoiar municípios brasileiros na transição para modelos urbanos mais resilientes e de baixo carbono, integrando tecnologias baseadas na natureza às políticas públicas de planejamento urbano e manejo das águas pluviais.

O presente trabalho apresenta uma proposta metodológica para o desenvolvimento de um método integrado de quantificação dos efeitos hidrológicos, microclimáticos e de captura e armazenamento de carbono promovidos pela aplicação de SBN em bacias hidrográficas urbanas, descrevendo as áreas de estudo selecionadas, o arcabouço metodológico proposto e as contribuições científicas e técnicas esperadas.

LACUNA CIENTÍFICA E JUSTIFICATIVA

Embora diversos estudos avaliem individualmente os efeitos hidrológicos, térmicos ou de captura de carbono das SBN, observa-se a ausência de metodologias integradas que permitam quantificar simultaneamente esses benefícios (Dubois *et al.*, 2025; Fang *et al.*, 2024; Seddon, 2022; Tritinger *et al.*, 2025; Vazin *et al.*, 2024; Zhou *et al.*, 2024), especialmente aplicadas ao contexto

urbano brasileiro. O caráter multiobjetivo das SBN também dificulta a padronização metodológica e a avaliação comparável com soluções tradicionais de infraestrutura cinza, o que limita sua adoção por gestores públicos que dependem de critérios técnicos e mensuráveis para aplicação da tecnologia (Adams *et al.*, 2023; Eckert, 2025).

A pesquisa proposta representa um avanço metodológico ao integrar, em uma única abordagem quantitativa e replicável, a avaliação hidrológica, térmica e de captura e armazenamento de carbono decorrentes da aplicação de SBN inseridas em bacias hidrográficas urbanas.

OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo apresentar a proposta metodológica de pesquisa para o desenvolvimento de um método integrado e quantitativo de avaliação dos efeitos hidrológicos, térmicos e de captura e armazenamento de carbono promovidos pela aplicação de SBN em bacias hidrográficas urbanas, com foco na replicabilidade do método por gestores públicos municipais.

METODOLOGIA

A abordagem metodológica proposta está estruturada em sete etapas sequenciais e integradas, voltada à avaliação quantitativa dos benefícios da aplicação de SBN em bacias hidrográficas urbanas. A metodologia tem início com a seleção das áreas de estudo, orientada por critérios de representatividade urbana, histórico de alagamentos e inundações, ocorrência de altas temperaturas e disponibilidade de dados. Na sequência, são levantados os dados necessários para as modelagens, que consiste em informações hidrometeorológicas, dados físicos das bacias selecionadas, dados espaciais e de sensoriamento remoto, todas integradas em ambiente SIG. Em seguida serão construídos os modelos representativos da condição atual de cada bacia (cenário de referência), por meio de modelagem hidrológica e hidráulica, avaliação térmica com base na temperatura de superfície (LST) e estimativa do estoque atual de carbono na biomassa vegetal, com calibração e validação a partir de eventos observados e métricas de desempenho como NSE, RMSE e R^2 .

Serão, então, definidas as tipologias de SBN a serem avaliadas, que são dimensionadas com base em critérios técnicos e inseridas espacialmente nos modelos de cada bacia. A partir dessa inserção, serão simulados cenários alternativos, nos quais as SBN são avaliadas simultaneamente sob três dimensões: manejo de águas pluviais, redução de temperatura e captura e armazenamento de carbono. Os resultados de cada cenário serão integrados em um sistema de indicadores normalizados e submetidos a uma análise multicritério, que permitirá o cálculo do índice composto de desempenho para cada tipologia e configuração espacial avaliada.

A etapa final de análise comparativa entre os cenários produzirá uma análise de trade-offs e a identificação das melhores opções por objetivo, subsidiando a elaboração de diretrizes e

recomendações técnicas orientadas à tomada de decisão por gestores públicos. O produto final da pesquisa será, portanto, não apenas um conjunto de resultados quantitativos sobre as bacias estudadas, mas uma metodologia replicável e documentada, capaz de orientar o planejamento, a priorização e a formulação de políticas públicas para a implantação de SBN em diferentes contextos urbanos brasileiros. A Figura 1 ilustra a metodologia proposta e as etapas são introduzidas.

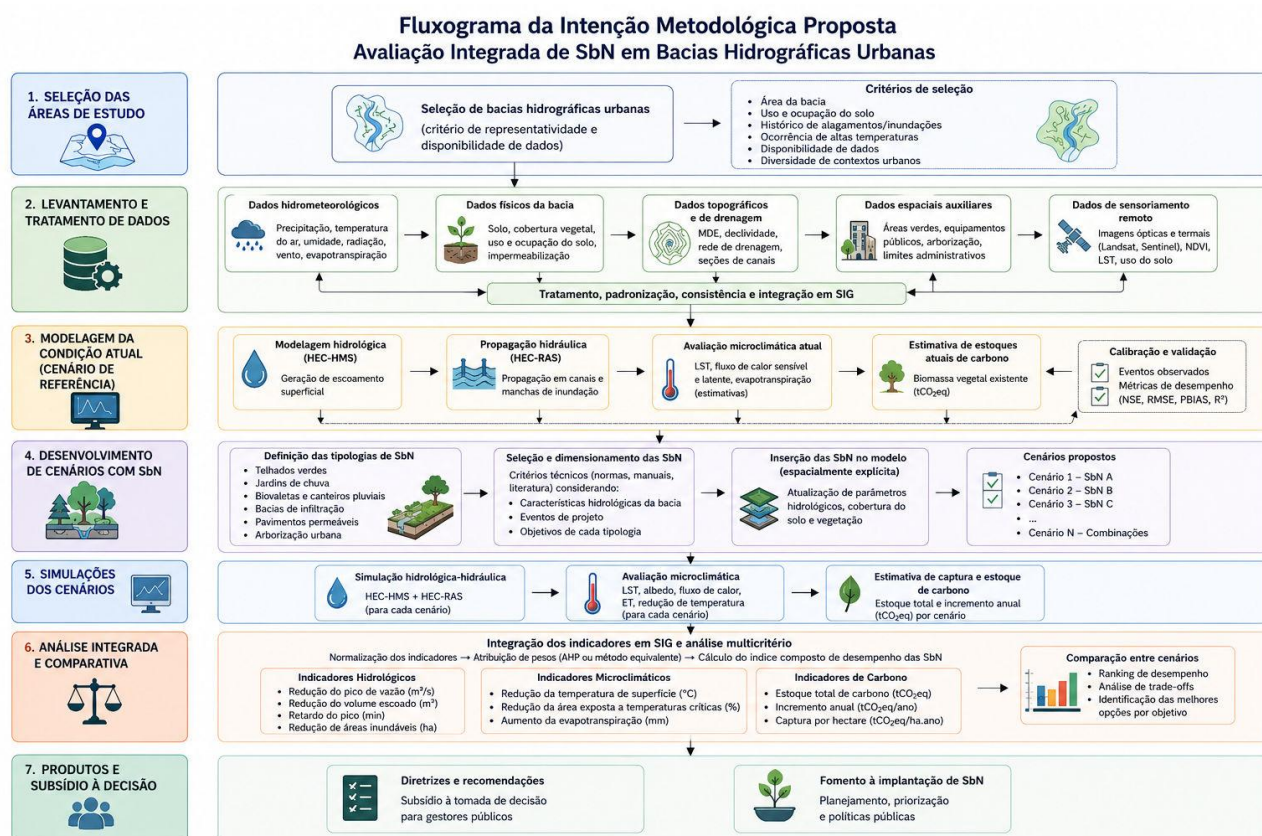


Figura 1 – Fluxograma da intenção metodológica proposta

Áreas de Estudo

As bacias hidrográficas urbanas de interesse para o presente estudo foram selecionadas com base em critérios de representatividade do tecido urbano, diversidade de uso e ocupação do solo, relevância frente aos problemas de alagamento, inundação e temperatura, e disponibilidade de dados hidrometeorológicos. Priorizaram-se bacias de 10 a 15 km^2 , aproximadamente; majoritariamente ocupadas de maneira mista por residências tanto formais quanto informais; com casas em lotes ocupando quase que a sua totalidade com a estrutura da habitação, sem reservação de espaços verdes privados; com córregos abertos ou com poucos trechos tamponados e/ ou canalizados; sem ou com poucos espaços verdes públicos disponíveis para a população do entorno; sujeitas a ou com histórico de altas temperaturas e eventos de inundação e alagamento na área; pouca ou nenhuma arborização e equipamentos públicos.

Base de Dados

O processo de modelagem exige a existência prévia de dados disponíveis que necessitam ser sistematizados e organizados a partir das bases e repositórios públicos existentes. Foram selecionados como dados de entrada: as séries históricas de precipitação, temperatura do ar e demais variáveis climáticas relevantes, características dos solos e cobertura vegetal, topografia e declividade, existência de rede de drenagem. O refinamento do processo de modelagem poderá exigir outros dados que serão levantados ao longo do desenvolvimento dos modelos. Os dados existentes serão analisados quanto à consistência, representatividade temporal e espacial, sendo adotados procedimentos de tratamento e preenchimento de falhas, quando necessário, conforme metodologias consolidadas na literatura científica. De forma a tornar o processo menos custoso e mais facilmente replicável, serão priorizadas bases de dados oficiais do governo na esfera federal e, quando existente, aplicável e disponível, bases de dados dos governos estaduais e municipais, de maneira a contemplar a metodologia para qualquer lugar do país e no âmbito público.

Modelagem hidrológica

O método de avaliação proposto é fortemente baseado na simulação hidrológica, em especial na avaliação do escoamento hidráulico superficial proveniente dos impactos da impermeabilização urbana decorrentes do processo de urbanização. O aumento do escoamento superficial tem impacto direto na frequência de ocorrência de casos de enchentes e alagamentos em bacias hidrográficas urbanas. Fato que exige que a escolha do modelo hidrológico a ser adotado seja orientada pelo princípio da parcimônia, priorizando-se modelos de menor complexidade capazes de representar de forma adequada os processos físicos de interesse, tais como infiltração, evapotranspiração, geração e propagação do escoamento superficial direto (Garcia-Cuerva *et al.*, 2018; Sabeti *et al.*, 2026). Serão analisados modelos amplamente utilizados no contexto da hidrologia urbana, avaliando-se sua aderência aos objetivos do estudo e à disponibilidade de dados.

Elaboração de cenários

A proposta metodológica inclui a proposição de cenários comparativos que possam servir de ponto de partida para a tomada de decisão quanto à aplicação de SBN em uma bacia hidrográfica urbana. O ponto inicial é a construção do modelo representativo da situação atual da bacia, considerado como cenário de referência.

A partir da construção do modelo representativo da situação atual da bacia, serão definidos cenários alternativos com a inserção de diferentes tipologias de SBN, como arborização, jardins de chuva, bacias de infiltração, pavimentos permeáveis, parques lineares, entre outros. A seleção das tipologias será realizada com base na aptidão das áreas disponíveis, nas diretrizes urbanísticas e

ambientais vigentes e nos resultados de simulações preliminares, buscando representar diferentes estratégias de infraestrutura verde aplicáveis ao ambiente urbano.

O dimensionamento proposto para as estruturas de SBN será realizado de maneira simplificada a partir de critérios técnicos estabelecidos em normas, manuais e referências científicas reconhecidas, considerando as características hidrológicas das bacias, os eventos de projeto e os objetivos específicos de cada tipologia. As estruturas propostas serão incorporadas ao modelo hidrológico, permitindo a simulação dos cenários com intervenções e a análise dos seus efeitos sobre o comportamento hidrológico, térmico e de captura de carbono das bacias.

Estimativa de captura e armazenamento de carbono

Propõe-se que a avaliação de captura e armazenamento de carbono considere o estoque de carbono na biomassa vegetal e as taxas potenciais de incremento anual associadas às tipologias de SBN propostas. A simulação deve considerar parâmetros alométricos e fatores de expansão para espécies arbóreas e arbustivas de clima tropical e subtropical, compatíveis com as condições das áreas de estudo (Locatelli *et al.*, 2020). Os resultados serão integrados ao modelo espacial das bacias por meio de SIG, permitindo a visualização espacial do estoque e taxa de captura de carbono.

Avaliação da temperatura

A avaliação térmica será fundamentada na análise de temperatura da superfície terrestre (Land Surface Temperature - LST), obtida por sensoriamento remoto (imagens com bandas termais), complementada por dados de estações meteorológicas locais quando disponíveis. Propõe-se que sejam estimadas variações no fluxo de calor sensível e latente, além de indicadores de evapotranspiração, para inferir a redução potencial de temperatura do ar associada ao incremento de cobertura vegetal nos cenários simulados.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados deverão ser analisados de forma quantitativa e comparativa entre o cenário de referência e os cenários com aplicação de SBN. O modelo de simulação deverá apresentar como dados de saída indicadores hidrológicos, incluindo: escoamento superficial, pico de vazão, tempo de concentração e retardo dos hidrogramas. A análise térmica expressará a redução de temperatura superficial média e a variação percentual da área exposta a temperaturas críticas. A captura e o armazenamento de carbono serão expressos em toneladas de CO₂ equivalente por hectare implantado.

Os resultados deverão ser sintetizados em indicadores de desempenho comparáveis entre tipologias, áreas e configurações urbanas, subsidiando a tomada de decisão pelos gestores públicos.

De antemão sabe-se que a aplicação de SBN tem potencial de auxílio na redução de picos de escoamento hidráulico superficial, na redução da temperatura de superfície e colabora para o aumento

dos estoques de carbono, mas que somente sua aplicação não será suficiente para a solução de todos os problemas na resiliência climática urbana. Sua atuação deve ser encarada como um dos componentes no enfrentamento dessa complexa problemática ambiental diretamente impactada pelas necessidades urbanas.

A estrutura de modelagem proposta tem por princípio auxiliar no entendimento dessas vantagens e limitações para colaborar para a adoção responsável dessa tecnologia, embora benefícios indiretos adicionais aos aqui propostos também devam ser considerados como o aumento da biodiversidade, melhoria da qualidade do ar, melhoria do bem-estar da população pela presença de vegetação, entre outros.

LIMITAÇÕES E INCERTEZAS

A modelagem hidrológica e térmica em ambientes urbanos está sujeita a incertezas associadas à qualidade e resolução dos dados disponíveis, à simplificação dos processos físicos e à variabilidade espaço-temporal dos eventos hidrometeorológicos. Para mitigar essas incertezas, serão adotados procedimentos de consistência e preenchimento de falhas nos dados, calibração e validação dos modelos a partir de eventos observados e análises de sensibilidade dos principais parâmetros hidrológicos. As limitações de extrapolação dos resultados para outros contextos urbanos serão discutidas explicitamente, reforçando o caráter metodológico e adaptável da proposta.

RESULTADOS PRELIMINARES

Áreas de Estudo

Como forma de desenvolvimento do procedimento de avaliação proposto, foram selecionadas três bacias hidrográficas urbanas para aplicação prática do método em estruturação de modo a propiciar o desenvolvimento e aplicação preliminar do procedimento.

Em São Paulo foram selecionadas duas bacias: a bacia do Córrego Paciência (zona norte, Figura 2) e a bacia do Córrego Tiquatira (zona leste, apresentada na Figura 3), ambas com características de áreas densamente urbanizadas, ocupação mista de baixo a médio padrão e necessidade de soluções remediadoras. A terceira bacia, do rio Alambari, foi selecionada no município de São José dos Campos, em acordo com a equipe da Secretaria de Urbanismo e Sustentabilidade, e apresenta outras peculiaridades. O trecho selecionado (Figura 4) foi das cabeceiras até a confluência com o Córrego Campestre. A bacia do Alambari apresenta características rurais, urbanização pouco adensada e muitas áreas verdes naturais, embora seja uma área de expansão urbana controlada e já conte com duas áreas com loteamentos autorizados, o que irá aumentar a sua taxa de impermeabilização e fomentar a sua ocupação em cenários futuros.

A seleção de tipologias distintas de bacias permitirá a avaliação dos resultados das modelagens quanto ao uso para proposição de soluções remediadoras em São Paulo e soluções preventivas em São José dos Campos, apoiando o município na elaboração de diretrizes que evitem que a urbanização no modelo tradicional seja repetida na bacia.

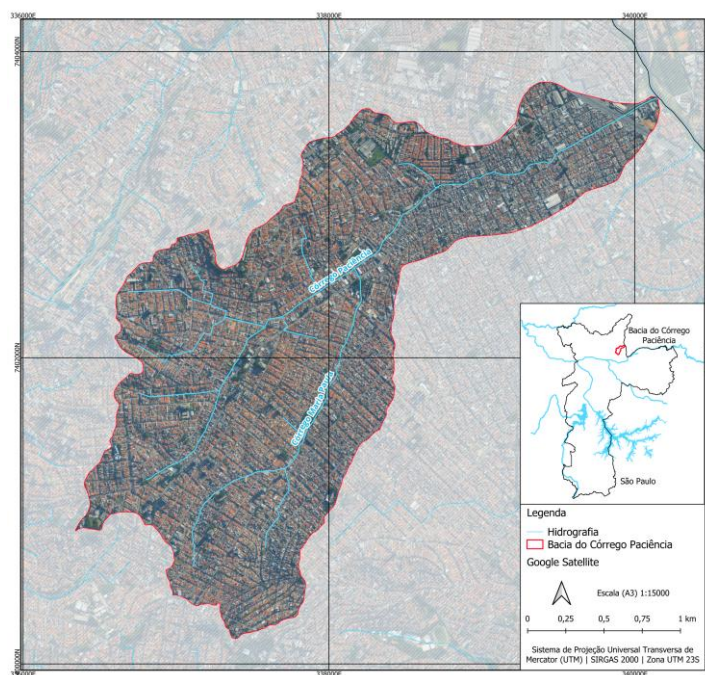


Figura 2 - Bacia hidrográfica do Córrego Paciência em São Paulo – SP

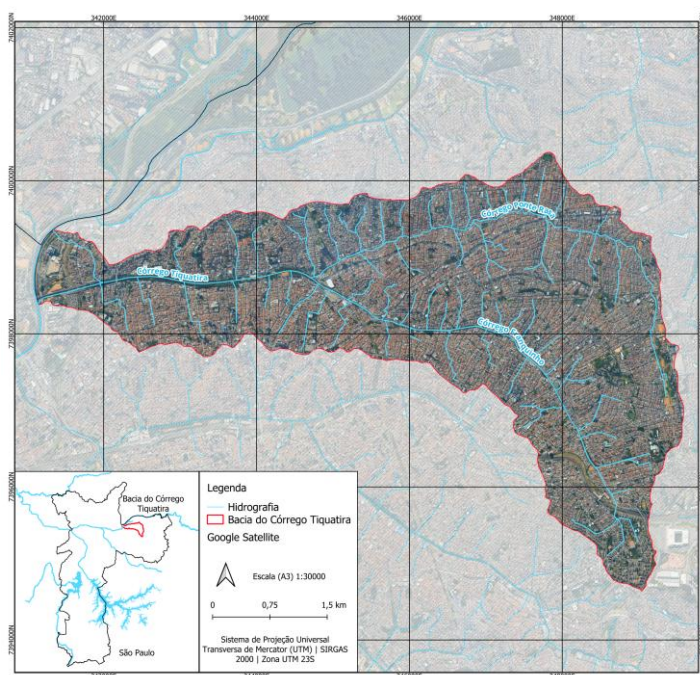


Figura 3 – Bacia hidrográfica do Córrego Tiquatira em São Paulo – SP

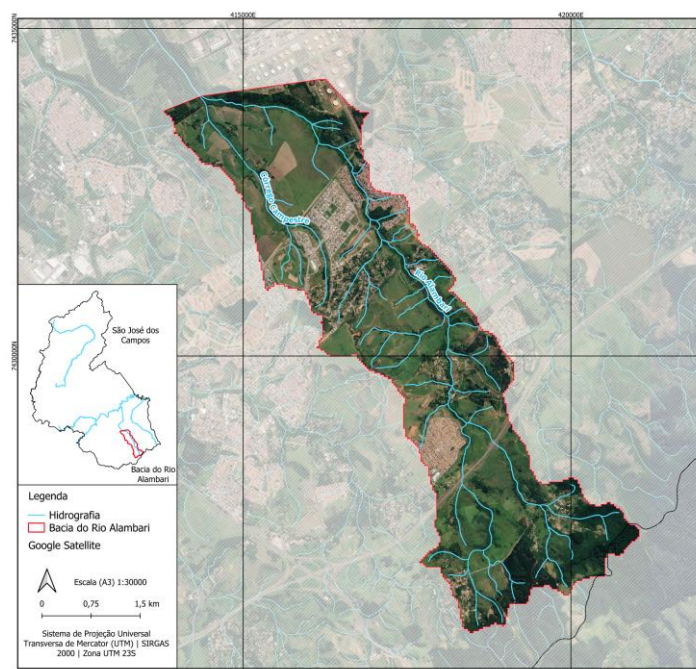


Figura 4 – Bacia hidrográfica do Rio Alambari em São José dos Campos - SP

Bases de Dados Utilizadas

Para a aplicação do processo de modelagem foram selecionadas, por ora, as seguintes bases de dados: ANA - Bacias Hidrográficas Ottocodificadas nível 7 e Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas 6 (BHO 6); GEOSAMPA – Bacias Hidrográficas do Município de São Paulo e Hidrografia; GEOSANJA – Uso e Ocupação do Solo e Macronezoneamento Urbano; DATAGEO – Sub-Bacias Hidrográficas do Estado de São Paulo; SEMIL - Modelo Digital de Elevação (MDE); IBGE – Malha Municipal; imagens de satélite do Google.

Modelagem Hidrológica e Hidráulica

Para a modelagem hidrológica e hidráulica foram selecionados os softwares HEC-HMS, HEC-RAS e QGIS, além de planilhas eletrônicas, considerando que são softwares livres e de código aberto, pertinentes com a proposta final de aplicação das futuras metodologias desenvolvidas por gestores públicos.

CONTRIBUIÇÕES ESPERADAS

O desenvolvimento do método de avaliação deverá contribuir para a literatura científica ao integrar modelagem hidrológica, térmica e estimativas de captura e armazenamento de carbono aplicadas às SBN em bacias hidrográficas urbanas, oferecendo um arcabouço metodológico replicável e passível de comparação entre diferentes contextos territoriais. No âmbito técnico-institucional, os resultados têm potencial para subsidiar a formulação de políticas públicas de drenagem urbana sustentável, adaptação climática e descarbonização das cidades, contribuindo para

a incorporação sistemática das SBN em instrumentos de planejamento urbano dos municípios brasileiros.

AGRADECIMENTOS - O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES - Código de financiamento 001). O presente trabalho foi realizado com apoio do Processo nº 2024/01115-0, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil, como parte das atividades do Centro de Ciência para o Desenvolvimento - CCD Cidades Carbono Neutro, que conta também com o apoio financeiro das seguintes Instituições: ABRAIN, CDHU, Ecorodovias, ENEL, Equipagroup, Novakem, Orizon, Prefeitura do Município de São José dos Campos e Solis Solar.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, C.; FRANTZESKAKI, N.; MOGLIA, M. (2023). *Mainstreaming nature-based solutions in cities: a systematic literature review and a proposal for facilitating urban transitions*. Land Use Policy, v. 130, p. 106661.
- DUBOIS, E. et al. (2025). *Are water-related nature-based solutions (NbS) assessed for their full multi-benefit potential? A review from an urban perspective*. Sustainability Nexus Forum, v. 33, n. 1.
- ECKERT, K. H. (2025). *Multifunctionality of Nature-based solutions: a scoping review of strategic planning processes*. Discover Sustainability, v. 6, n. 1.
- FANG, X. et al. (2024). *A quantitative review of nature-based solutions for urban sustainability (2016–2022): from science to implementation*. The Science of The Total Environment, v. 927, p. 172219.
- GARCIA-CUERVA, L.; BERGLUND, E. Z.; RIVERS, L. (2018). *An integrated approach to place Green Infrastructure strategies in marginalized communities and evaluate stormwater mitigation*. Journal of Hydrology, v. 559, p. 648–660.
- LOCATELLI, L. et al. (2020). *Socio-economic assessment of Green Infrastructure for climate change adaptation in the context of urban drainage planning*. Sustainability, v. 12, n. 9, p. 3792.
- MEGYESI, B. et al. (2024). *Perceptions of stakeholders on nature-based solutions in urban planning: a thematic analysis in six European cities*. Urban Forestry & Urban Greening, p. 128344.
- SABETI, R. et al. (2026). *Modelling Nature-Based Solutions in HEC-RAS*. Water Resources Management, v. 40, n. 2.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Habitação. (2025). *Caderno de Tipologias Urbanas Modulares*. São Paulo: SDUH.
- SEDDON, N. (2022). *Harnessing the potential of nature-based solutions for mitigating and adapting to climate change*. Science, v. 376, n. 6600, p. 1410–1416.
- TRITINGER, A. et al. (2025). *Upscaling nature-based solutions for reducing risk from natural hazards: from process to practice*. Advances in Water Resources, v. 206, p. 105135.
- VAZIN, F. et al. (2024). *Nature-Based Solutions and climate resilience: a bibliographic perspective through science mapping analysis*. Buildings, v. 14, n. 6, p. 1492.
- ZHOU, K. et al. (2024). *Urban flood risk management needs nature-based solutions: a coupled social-ecological system perspective*. npj Urban Sustainability, v. 4, n. 1, p. 1–12.