



Artigo de Revisão

e-ISSN 2177-4560

Submetido em: 15 out. 2021

Aceito em: 31 dez. 2021



VII Seminário Regional sobre
Gestão de Recursos Hídricos

VI Seminário sobre
Ecotoxicologia

9 a 12 de novembro de 2021

IFF - Campus São João da Barra

<https://eventos.iff.edu.br/srhidro-secotox>

DOI:10.19180/2177-4560.v15n12021p03-18

Levantamento das abordagens de modelagem matemática ou modelagem computacional para o estudo e avaliação de mitigação de inundações em áreas urbanas

Survey of mathematical modeling or computational modeling approaches for the study and assessment of flood mitigation in urban areas

Estudio de enfoques de modelado matematico o modelado computacional para el estudio y evaluación de la mitigación de inundaciones en areas urbanas

Larissa Carneiro Rangel  <https://orcid.org/0000-0002-2174-1858>

Doutoranda em Modelagem e Tecnologia para Meio Ambiente Aplicadas em Recursos Hídricos (AmbHidro) pelo Instituto Federal Fluminense - Campos dos Goytacazes-RJ - Brasil. E-mail: larissarangel.arq@gmail.com

Jader Lugon Junior  <https://orcid.org/0000-0001-8030-0713>

Doutor em Modelagem Computacional (UERJ). Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense - campus Macaé (RJ) – Brasil. E-mail: ljunior@iff.edu.br

Wagner Rambaldi Telles  <https://orcid.org/0000-0002-6032-3405>

Doutorado em Modelagem Computacional pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Professor da Universidade Federal Fluminense, Brasil. E-mail: wtelles@id.uff.br

Simone Vasconcelos Silva  <https://orcid.org/0000-0002-5994-6840>

Doutorado em Computação pela Universidade Federal Fluminense. Professora Titular do Instituto Federal Fluminense - Brasil. E-mail: simonevs@iff.edu.br

Antônio José da Silva Neto  <https://orcid.org/0000-0002-9616-6093>

Doutorado em Engenharia Mecânica pela North Carolina State University, Estados Unidos. Professor Titular da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Brasil. E-mail: jsneto@iprj.uerj.br

Resumo: As inundações têm sua causa ligada à urbanização desordenada e à falta de sistemas de drenagem adequados, que geram alterações no escoamento superficial. As técnicas mitigatórias de inundações têm sido uma forma de amenizar o problema, e o estudo de implantação dessas técnicas torna-se relevante para a escolha das medidas mais eficientes para cada situação. O uso de modelos hidrológicos matemáticos e computacionais ajuda nessa análise, sendo possível simular em diferentes cenários a implementação dessas técnicas. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um breve histórico da modelagem

hidrológica e os principais conceitos na temática de mitigação de inundações, além de uma revisão sistemática que responda à seguinte questão de pesquisa: Como são avaliadas com ferramentas de modelagem matemática ou computacional as propostas de mitigação de inundações em áreas urbanas? A revisão sistemática aponta para a lacuna existente, isto é, a necessidade de mais estudos nessa temática, visto que os estudos analisados, em sua maioria, não geram como resultado uma ferramenta computacional capaz de auxiliar no processo de decisão das técnicas a serem utilizadas.

Palavras-chave: Drenagem urbana. Modelagem hidrológica. Infraestruturas sustentáveis. Revisão sistemática.

Abstract: Floods are caused by disorderly urbanization and the deficiency of adequate drainage systems, generating changes in surface runoff. Flood mitigation techniques have been a way to alleviate the problem and the study of implementation of these techniques becomes relevant for choosing the most efficient measures for each situation. The use of mathematical and computational hydrological models helps in this analysis, making it possible to simulate the implementation of these techniques in different scenarios. Therefore, this paper aims to present a brief history of hydrological modeling and the main concepts in the theme of flood mitigation, as well as a systematic review that answers the following research question: How are flood mitigation proposals in urban areas evaluated with mathematical or computational modeling tools? The systematic review points to the gap of the need for more studies on this topic, since the analyzed studies, for the most part, do not generate a computational tool capable of helping in the decision process of the techniques to be used.

Keywords: Urban drainage. Hydrological modeling. Sustainable infrastructure. Systematic review.

Resumen: Las inundaciones tienen su causa ligada a la urbanización desordenada y a la falta de sistemas de drenaje adecuados, generando cambio en el flujo superficial. Las técnicas de mitigación de inundaciones han sido una forma de mitigar el problema y el estudio de despliegue de estas técnicas se vuelve relevante para la elección de las medidas más eficientes para cada situación. El uso de modelos hidrológicos matemáticos y computacionales ayuda en ese análisis, siendo posible simular en diferentes escenarios la implementación de esas técnicas. Siendo así, el presente trabajo tiene como objetivo presentar un breve histórico del modelado hidrológico y los principales conceptos en la temática de mitigación de inundaciones, además de una revisión sistemática que responda a la siguiente cuestión de investigación: ¿Cómo se evalúan con herramientas de modelado matemático o computacional las propuestas de mitigación de inundaciones en áreas urbanas? La revisión sistemática apunta para la laguna existente, es decir, la necesidad de más estudios en esta temática, ya que los estudios analizados, en su mayoría, no generan como resultado una herramienta computacional capaz de auxiliar en el proceso de decisión de las técnicas a ser utilizadas.

Palabras clave: Drenaje urbano. Modelado hidrológico. Infraestructuras sostenibles. Revisión sistemática.

1 Introdução

A inundação   um desastre ambiental cada vez mais frequente nas cidades brasileiras, gerando uma série de transtornos e preju zos, tanto em danos materiais quanto em danos   vida humana. Sua causa está diretamente ligada   urbaniza o desordenada e   falta de sistemas de drenagem adequados, que geram altera es no escoamento. Jambo (2017) aponta que, somada a isso, existe a falta de políticas públicas e de uma gestão eficiente que possibilite a melhoria dos sistemas de drenagem. A ocorrência sazonal de chuvas de forte intensidade, devido ao clima tropical predominante no Brasil, onde as esta es são marcadas pela seca no inverno e chuvas intensas no verão, também agrava a situa o de algumas cidades que não foram projetadas com prioridade na gestão da  gua (JAMBO, 2017).

Uma série de fatores naturais influenciam na ocorrência de enchentes, dentre eles: relevo, tipo e intensidade da precipita o, cobertura vegetal, capacidade de drenagem, geologia, morfologia fluvial e extensão do canal e da planície de inunda o, intera o canal-planície de inunda o e rugosidade (MONTE *et al.*, 2016).

Solu es de preven o, por meio de medidas estruturais e não estruturais, são realizadas para minimizar os impactos socioecon micos decorrentes das inunda es, sendo as medidas não estruturais, na

maior parte dos casos, financeiramente mais viáveis, focando na prevenção e conservação, e com menor impacto ambiental (TUCCI; VILLANUEVA, 1999).

Uma questão a ser observada são as situações nas quais os problemas são propagados para áreas a jusante quando não há controle e gestão adequados. Sobre essa problemática, Jambo (2017) descreve que os sistemas de drenagem convencionais, tendo função de escoar as águas para jusante, muitas vezes acabam por exportar os problemas para municípios vizinhos. Diante disso, surgem novas técnicas compensatórias de drenagem que buscam, dentre outros objetivos, aumentar a infiltração da água no solo e retardar o escoamento das águas pluviais, simulando o efeito de uma drenagem natural em uma bacia antes de sua urbanização intensa.

As técnicas mitigatórias relacionadas a inundações têm sido uma forma de amenizar o problema, e o estudo de implantação de metodologias que gerem cidades mais resilientes e “sensíveis” às águas torna-se relevante. Faz-se necessária a avaliação dos efeitos das modificações a serem realizadas e a escolha das medidas mais eficientes para cada situação em que forem implementadas. O uso de modelos hidrológicos ajuda nessa análise, porquanto é possível simular o uso dessas técnicas em diferentes cenários antes de sua execução (FORMIGA *et al.*, 2016).

Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um breve histórico da modelagem hidrológica com suas classificações e aplicabilidades e descrever os principais conceitos na temática de mitigação de inundações. Nesse contexto, é conduzida uma revisão sistemática da literatura para avaliar os esforços de pesquisa mais recentes nessa área de estudo, identificando as lacunas que justificam a necessidade de novas pesquisas em modelagem.

2 Conceitos e histórico

Nesta seção, serão abordados os conceitos relacionados à temática de mitigação de inundações em áreas urbanas, como o Water Sensitive Urban Design (WSUD), o Best Management Practices (BMP), o Sponge City e o Low Impact Development (LID). Além disso, é relatado um breve histórico dos modelos hidrológicos, assim como suas classificações e aplicabilidade.

2.1 Propostas para mitigação de inundações em áreas urbanas

Alguns conceitos podem ser descritos quando se aborda a temática de mitigação de inundações em áreas urbanas. O conceito do urbanismo por meio do WSUD, metodologia desenvolvida na Austrália, torna-se uma alternativa para a melhora do ambiente urbano. WSUD compreende um conjunto de princípios que podem ser aplicados para gerenciar a água de forma sustentável. Segundo Jambo (2017), visa-se integrar o planejamento urbano com o meio ambiente natural, formando cidades mais resilientes e sensíveis em relação aos recursos hídricos e fornecendo, assim, soluções para abastecimento de água urbana e para o manejo de águas residuais e águas pluviais de uma forma mais econômica e com menos danos ao meio ambiente. Deve

ser integrado ainda com a gestão, a proteção e a conservação do ciclo de água urbano, criando sistemas que possibilitem segurança quanto ao abastecimento e contra enchentes e alagamentos (JAMBO, 2017).

BMP é um conceito amplamente utilizado nos Estados Unidos que se refere a práticas de gerenciamento para prevenir ou reduzir a poluição das águas e controlar o escoamento. São tecnologias de drenagem sustentáveis que individualmente podem não ser eficazes, mas que, em combinação com outras, podem fornecer sistemas altamente eficazes (GAO *et al.*, 2015).

Outro conceito é Sponge City, proposto pela China, que aborda a gestão sustentável de águas pluviais urbanas. Li *et al.* (2020) apontam que se refere a uma cidade que funciona como uma esponja para absorver as gotas de chuva. São instalações paisagísticas com recursos avançados de retenção ligados a cursos de água ou sistemas de drenagem. Na China, várias cidades piloto aplicaram esse conceito. Como um importante componente desse programa, encontram-se as medidas de baixo impacto conhecidas como LID. Lancia *et al.* (2020) descrevem que esses elementos armazenam temporariamente a água da chuva, podendo a água ser lançada lentamente na rede de drenagem, redirecionada para seu aproveitamento como recurso hídrico, evapotranspirada pelas plantas, infiltrada na subsuperfície ou conduzida numa combinação desses procedimentos.

O conceito de LID foi definido pela Environmental Protection Agency (EPA), nos Estados Unidos, como uma ferramenta de gestão e um conjunto de práticas capazes de reduzir o escoamento superficial e suas cargas de poluentes. É uma eficiente ferramenta que vem sendo utilizada para adequar a drenagem urbana ao desenvolvimento sustentável (ZANANDREA; SILVEIRA, 2019).

O uso de medidas de baixo impacto refere-se a sistemas e práticas que usam ou imitam processos naturais que resultam no planejamento de espaços urbanos por meio da conservação de processos hidrológicos, mitigando os impactos provenientes da urbanização desordenada (ZANANDREA; SILVEIRA, 2019). Muitas práticas têm sido usadas para aderir a esses princípios, como sistemas de biorretenção, jardins pluviais, telhados com vegetação, barris de chuva, trincheiras de infiltração e pavimentos permeáveis. Ao se implementarem os princípios e as práticas do LID, a água pode ser gerenciada de forma a reduzir o impacto das áreas construídas e promover o movimento natural da água dentro de um ecossistema ou bacia hidrográfica.

2.2 Modelos hidrológicos: histórico, classificações e aplicabilidade

Os conceitos apresentados a seguir, nesta seção, têm por base o artigo de Almeida e Serra (2017) sobre modelos hidrológicos.

O entendimento do fluxo hídrico é essencial na gestão de recursos hídricos e no dimensionamento de obras hidráulicas. Como instrumento fundamental, apresentam-se os modelos hidrológicos, com os quais é

possível simular os efeitos dos fenômenos hídricos dentro de uma escala de tempo definida, estimando componentes do fluxo hidrológico, anteriormente não quantificados (ALMEIDA; SERRA, 2017).

A modelagem hidrológica surgiu, há mais de um século, a partir do equacionamento de alguns processos hidrológicos, mediante a necessidade de se obterem séries hidrológicas mais longas e representativas de vazões para diferentes projetos de recursos hídricos. Os grandes avanços ocorreram a partir de 1930, quando agências governamentais de países desenvolvidos começaram a desenvolver seus próprios programas de pesquisas hidrológicas. Dentre as principais aplicações da modelagem hidrológica, podem-se citar: análise de consistência e preenchimento de falhas; previsão de vazão; dimensionamento e previsão de cenários de planejamento; e efeitos resultantes da modificação do uso do solo (ALMEIDA; SERRA, 2017).

Segundo Almeida e Serra (2017), os modelos hidrológicos apresentam tipologia diversa, podendo ser divididos em função do seu objetivo (simulação ou otimização); sua gênese (empírica, conceitual ou de processos físicos); quanto à discretização espacial (arquiteturas agregadas ou distribuídas); e em relação ao tempo (simulação de eventos isolados ou simulação contínua).

A bacia hidrográfica é o objeto de estudo da maioria dos modelos hidrológicos que analisam as superfícies que captam e despejam água sobre um ou mais canais de escoamento que desembocam em uma única saída. O modelo hidrológico abarca um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros, cada vez mais utilizados em estudos ambientais para ajudar a entender o impacto das mudanças no uso da terra e para prever alterações futuras nos ecossistemas, utilizando-se da previsão de cenários (ALMEIDA; SERRA, 2017).

Almeida e Serra (2017) afirmam que existem dois grupos de modelos hidrológicos: estocásticos e determinísticos ou conceituais. Os modelos estocásticos fazem uso das séries observadas de vazões em determinados pontos e permitem que sejam representadas por um dos tipos de modelos de séries temporais. Um modelo é dito estocástico quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório. Já os modelos determinísticos ou conceituais, usualmente denominados como modelos chuva-vazão, têm por objetivo representar os processos do ciclo hidrológico de modo que, a partir de dados de entrada, possam ser fornecidas as séries de vazões. Nos modelos chuva-vazão, os processos físicos podem ser representados por meio de equações diferenciais ou por formas simplificadas baseadas nestas.

Os modelos podem ainda ser classificados segundo o tipo de relações entre as variáveis utilizadas na modelagem (empíricos ou conceituais); a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos); a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos); e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos) (ALMEIDA; SERRA, 2017).

3 Revisão sistemática

A presente seção retrata a questão de pesquisa, a estrutura conceitual, a estratégia de pesquisa e os critérios de seleção dos estudos analisados na revisão sistemática da literatura realizada com o intuito de identificar as contribuições anteriores na temática de estudo, assim como as lacunas que justificam a necessidade de novas pesquisas na área.

3.1 Questão de pesquisa e estrutura conceitual

A revisão sistemática é centrada em publicações anteriores que contribuíram para o desenvolvimento e compreensão do tema de interesse. A estrutura conceitual referente a esse tema serve de base para a realização da revisão sistemática. Nesta pesquisa, a estrutura conceitual adotada refere-se às técnicas de mitigação de inundações associadas à modelagem matemática ou computacional, com ênfase nas técnicas LID.

Nesse contexto, a partir do conhecimento das práticas utilizadas na mitigação de inundações e das vantagens da utilização de modelos para simulação de cenários apresentados anteriormente, chegou-se ao objetivo deste estudo, sintetizado na questão de pesquisa: Como são avaliadas com ferramentas de modelagem matemática ou computacional as propostas de mitigação de inundações em áreas urbanas?

3.2 Estratégia de pesquisa

A estratégia de pesquisa visa definir o que e onde será pesquisado, quais estudos considerar e quais os critérios de inclusão e exclusão. Essas etapas e decisões tomadas durante esta estratégia de pesquisa encontram-se no protocolo apresentado na Tabela 1. Os termos de busca nas bases de pesquisa foram definidos de acordo com a estrutura conceitual, com as adaptações necessárias em cada base de busca conforme as limitações apresentadas. Três bancos de dados acadêmicos internacionais foram utilizados: Scopus, Web of Science e Google Scholar. Adicionalmente foi feita uma busca no Catálogo de Teses e Dissertações da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), fundação vinculada ao Ministério da Educação do Brasil.

Tabela 1: Protocolo de estratégia de busca para a realização da revisão sistemática

Questão de pesquisa

Como são avaliadas com ferramentas de modelagem matemática ou computacional as propostas de mitigação de inundações em áreas urbanas?

Estrutura conceitual

Técnicas de mitigação de inundações; Modelagem matemática/computacional; LID

Fonte de pesquisa

Scopus

Termos de pesquisa

(flooding OR flood OR inundation) AND (modeling OR modelling OR simulation OR numerical OR mathematical) AND (river OR watershed OR urban OR city) AND (intervention OR mitigation)

Filtro pelo idioma

Inglês, espanhol e português

Filtro pela área de pesquisa

Environmental Science, engineering, mathematics

Critério de inclusão

Aderência ao tema, acesso ao texto, artigo completo primário (excluindo-se as revisões)

Fonte de pesquisa

Web of Science

Termos de pesquisa

(flooding OR flood OR inundation) AND (modeling OR modelling OR simulation OR numerical OR mathematical) AND (river OR watershed OR “hydrographic basin” OR urban OR city) AND (“drainage systems” OR “drainage solution” OR “drainage network” OR intervention OR mitigation OR “nature based solution”)

Filtro pelo idioma

Inglês e português

Filtro pela área de pesquisa

Water resources, engineering, mathematics, urban studies

Critério de inclusão

Aderência ao tema, acesso ao texto, artigo completo primário (excluindo-se as revisões)

Fonte de pesquisa

Google Scholar

Termos de pesquisa

com todas as palavras: low impact development

com no mínimo uma das palavras: flooding flood inundation modeling modelling simulation model mitigation

onde as palavras ocorrem: no título do artigo

Critério de inclusão

Aderência ao tema, acesso ao texto, artigo completo primário (excluindo-se as revisões), idioma

Fonte de pesquisa

Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES

Termos de pesquisa

"técnicas compensatórias" "telhado verde" "pavimento permeável" "jardim de chuva" "trincheira de infiltração"

Filtro pela área do conhecimento

Ciências agrárias, engenharias, ciências sociais aplicadas, multidisciplinar

Critério de inclusão

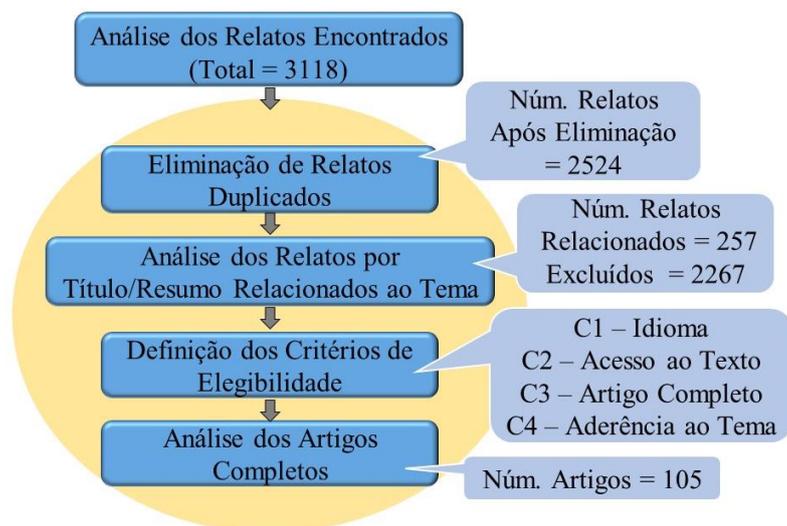
Aderência ao tema, acesso ao texto

Fonte: Os autores (2021).

3.3 Seleção de estudos

A abordagem para a revisão sistemática apresentada neste trabalho foi adaptada de Moher *et al.* (2009), na qual se utiliza a recomendação *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA). Na Figura 1, é apresentado esquematicamente o processo de pesquisa realizado para identificar a literatura relevante para este estudo, por meio da eliminação de trabalhos duplicados e de outras exclusões que serão relatadas a seguir.

Figura 1. Fluxo do PRISMA com processo de identificação da literatura relevante.



Fonte: Os autores (2021) adaptado de Moher *et al.* (2009).

O uso das palavras-chave gerou 3118 resultados nas bases de buscas internacionais. Nas bases Scopus e Web of Science, houve a possibilidade de utilização de filtros por idioma e área de pesquisa. Após a remoção dos registros duplicados, os resumos dos registros restantes foram inicialmente analisados. Um total de 105 artigos foi selecionado após os critérios de elegibilidade (idioma, acesso ao texto, artigo completo primário e aderência ao tema) para leitura completa e extração dos dados que geraram os resultados dessa revisão sistemática.

Na base de busca brasileira de dissertações e teses, também foram utilizadas palavras-chave que forneceram 198 resultados após a utilização do filtro por área do conhecimento. Em seguida, foram analisados os resumos das dissertações e teses, reduzindo a 45 pesquisas. Esses 45 trabalhos completos foram analisados, e 27 dissertações e teses selecionadas.

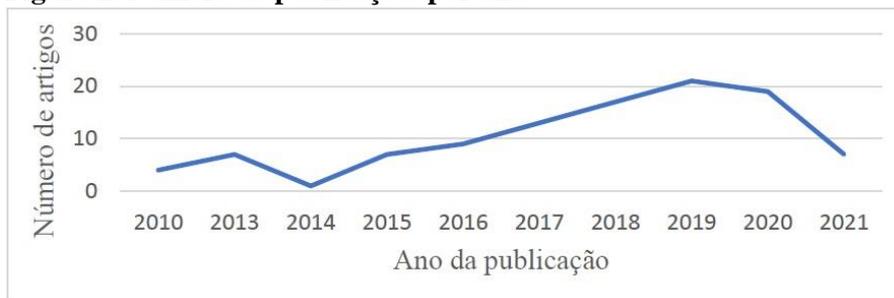
4 Análise bibliométrica

O objetivo desta seção é apresentar os resultados da revisão sistemática em sua dimensão de análise bibliométrica, permitindo, dessa forma, identificar as lacunas na área pesquisada. Primeiro são apresentados os resultados da análise dos artigos internacionais das bases Scopus, Web of Science e Google Scholar e, posteriormente, o resultado da busca no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, estudos realizados no Brasil.

4.1 Scopus, Web of Science e Google Scholar

Os resultados são apresentados a seguir com base nos 105 artigos originais relatados no início do presente trabalho. Na Figura 2, são apresentadas as publicações por ano. Destaca-se o ano de 2019 com 21 publicações e o ano de 2020 com 19 publicações, demonstrando o aumento dos estudos realizados na área nos últimos anos.

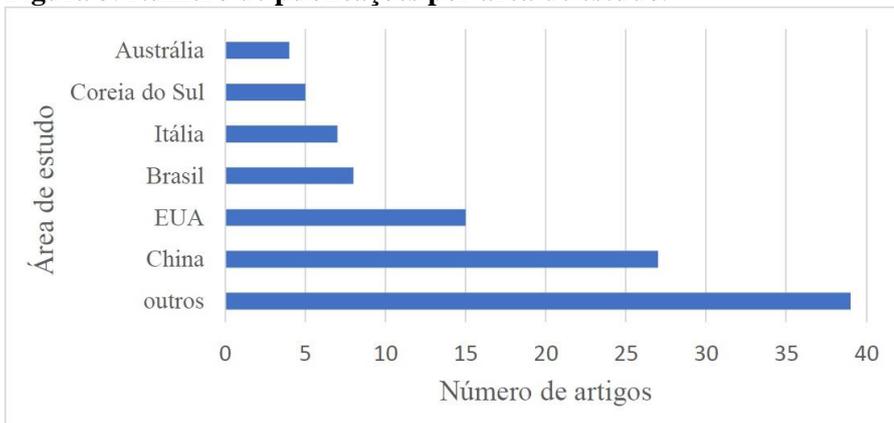
Figura 2. Número de publicações por ano.



Fonte: Os autores (2021).

Na Figura 3, é apresentado o número de publicações por país em relação à área de aplicação do estudo, podendo-se destacar o estudo em regiões da China e dos Estados Unidos, com 27 e 15 publicações respectivamente. A China aparece em destaque, principalmente pela aplicação do programa Sponge City, relatado anteriormente. Algumas pesquisas trabalharam com dois países como área de estudo.

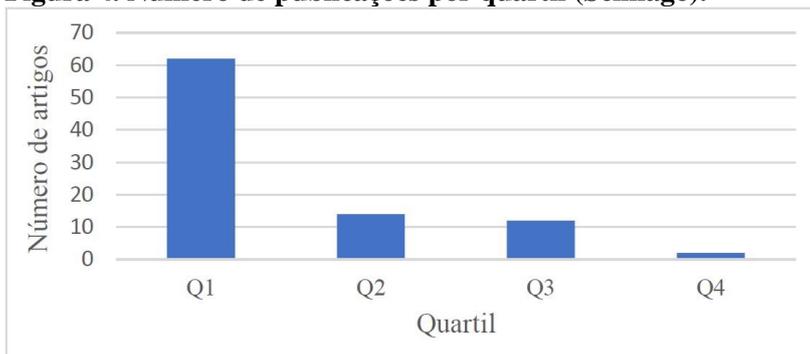
Figura 3. Número de publicações por área de estudo.



Fonte: Os autores (2021).

Em relação ao quartil das publicações, segundo o indicador Scimago Journal Rank, 63 artigos estão classificados como Q1 (vide Fig. 4). O indicador Scimago Journal Rank é uma medida do impacto, influência ou prestígio do periódico que representa o número médio de citações pelos documentos publicados na revista nos três anos anteriores.

Figura 4. Número de publicações por quartil (Scimago).



Fonte: Os autores (2021).

As técnicas compensatórias de inundação mais estudadas dentre os artigos selecionados, no que se refere à modelagem hidrológica, são apresentadas na Figura 5. Destacam-se o pavimento permeável, presente em 69 estudos, e o telhado verde, registrado em 62 estudos. Na maior parte dos estudos, foi tratada mais de uma técnica compensatória, portanto o número de registros apontados na figura excede o número total de artigos analisados.

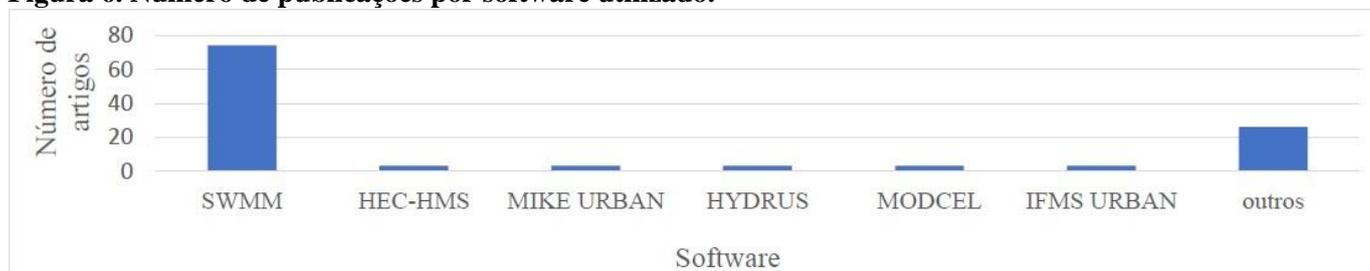
Figura 5. Número de publicações por técnica estudada.



Fonte: Os autores (2021).

Na Figura 6, são destacados os softwares utilizados em três ou mais estudos das publicações selecionadas. O número total de registros excede o número de artigos apresentado na figura, pois em algumas pesquisas foram utilizados softwares combinados. Observa-se que o software mais utilizado nas pesquisas foi o *Storm Water Management Model (SWMM)*, com 74 registros. SWMM é um software de gerenciamento de águas pluviais que simula a quantidade de água e o escoamento superficial, especialmente em áreas urbanas. É um modelo hidrológico de chuva-vazão que tem por objetivo determinar vazões de cheia em bacias hidrográficas (FORMIGA *et al.*, 2016). Trata-se de um software público, de código aberto e gratuito, para uso em todo o mundo, sendo muito utilizado para modelagem de drenagem urbana. A modelagem hidrológica espacialmente distribuída, como feito pelo modelo SWMM, é um método que vem sendo utilizado para avaliar o efeito de técnicas LID em bacias urbanas, comparando sua resposta com a drenagem convencional.

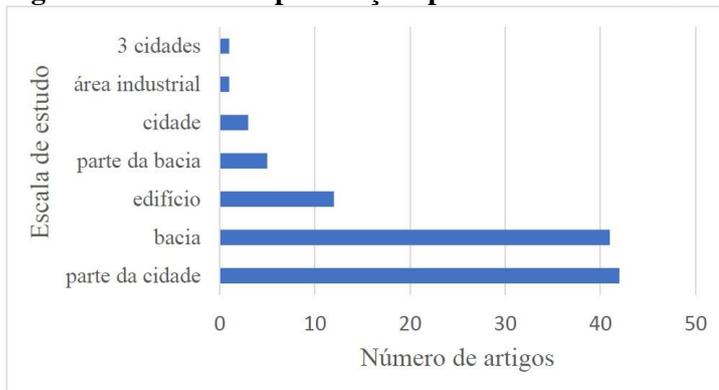
Figura 6. Número de publicações por software utilizado.



Fonte: Os autores (2021).

Quanto à escala de aplicação dos estudos publicados, percebe-se que a temática de modelagem do uso de técnicas de mitigação de inundações aborda em sua maioria a escala de bacia ou de parte da cidade. Essas duas escalas de estudo abrangeram mais de 40 publicações cada (vide Fig. 7).

Figura 7. Número de publicações por escala de estudo.

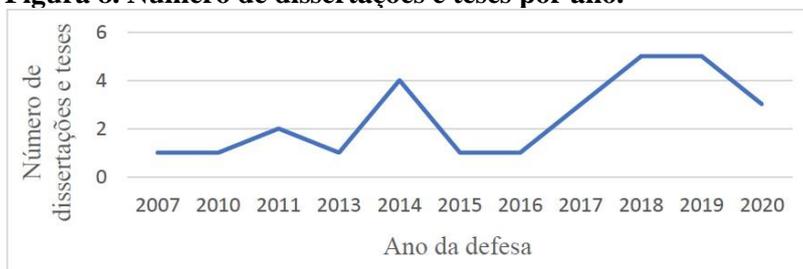


Fonte: Os autores (2021).

4.2 Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES

A partir da análise das 27 dissertações e teses selecionadas no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES, foram extraídos os resultados a seguir sobre os estudos realizados no Brasil. Em relação ao período de defesa dos trabalhos, observa-se, na Figura 8, que se destacam os anos de 2018 e 2019, com cinco estudos cada, e o ano de 2014, com quatro.

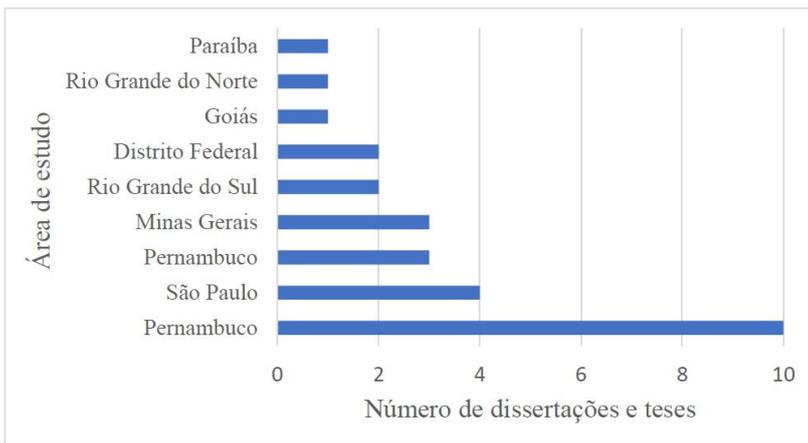
Figura 8. Número de dissertações e teses por ano.



Fonte: Os autores (2021).

Na Figura 9, observa-se que a área de aplicação desses estudos foi agrupada por estado brasileiro, com destaque para Pernambuco com dez trabalhos, sendo oito realizados pela Universidade Federal de Pernambuco. Todas essas dez pesquisas tiveram sua aplicação na cidade de Recife/PE.

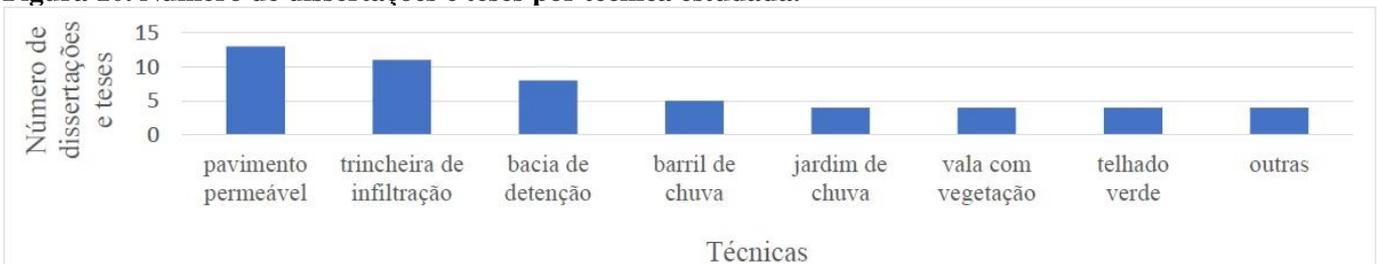
Figura 9. Número de dissertações e teses por local de aplicação do estudo.



Fonte: Os autores (2021).

As técnicas mais estudadas nas dissertações e teses selecionadas são o pavimento permeável e a trincheira de infiltração, presentes em 13 e 11 estudos, respectivamente. Dos 27 trabalhos, 15 abordam apenas uma técnica de mitigação. Os demais analisam mais de uma técnica, ficando, então, o número de registros apresentados na Figura 10 acima do número total de trabalhos selecionados.

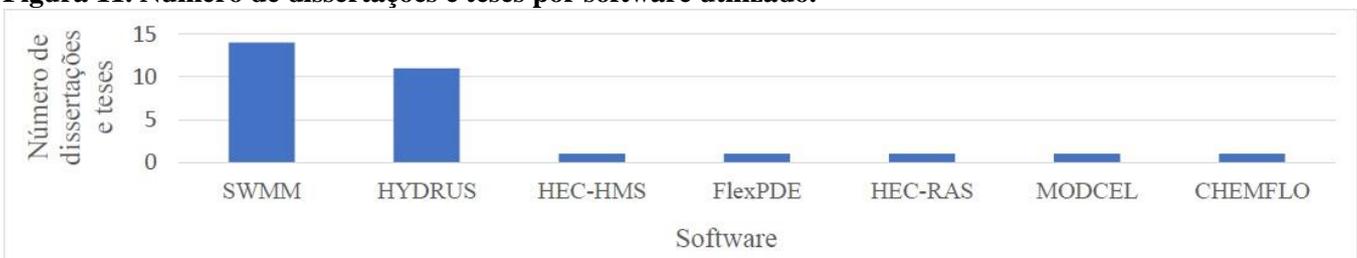
Figura 10. Número de dissertações e teses por técnica estudada.



Fonte: Os autores (2021).

Na Figura 7, são apresentados os softwares utilizados nos estudos. Apenas três trabalhos utilizaram mais de um software. Destaca-se o uso dos softwares SWMM e HYDRUS, presentes em 14 e 11 estudos, respectivamente. Parisi (2019) aponta que o HYDRUS é um programa computacional que simula o fluxo de água e o transporte de calor e poluentes. Dos trabalhos analisados, nove utilizaram a versão HYDRUS 1D.

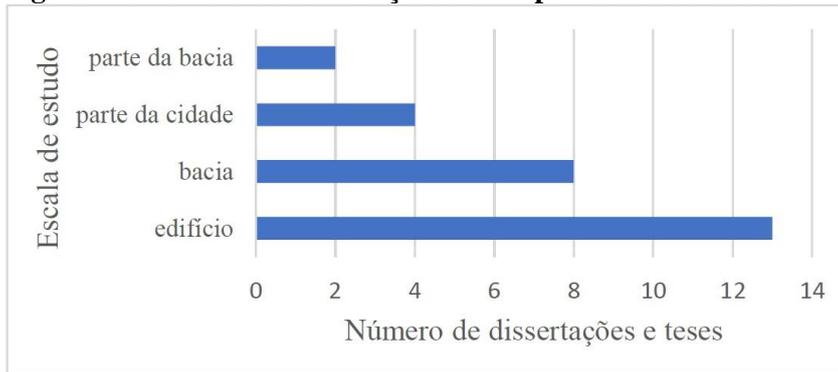
Figura 11. Número de dissertações e teses por software utilizado.



Fonte: Os autores (2021).

A escala de aplicação dos estudos analisados abrange em sua maioria a escala de edifício, com 13 registros nessa escala (vide fig. 12). Todos os 13 trabalhos que abordaram a escala de edifício aplicaram seus estudos em trechos das próprias universidades.

Figura 12. Número de dissertações e teses por escala de estudo.



Fonte: Os autores (2021).

5 Síntese de resultados

Analisando o tipo dos resultados gerados nos trabalhos publicados, observa-se que a maior parte trata de análises, apontando uma lacuna que justifica a necessidade de novas pesquisas em modelagem que gerem ferramentas computacionais para auxiliar no processo de decisão da utilização de técnicas mitigadoras de inundações. Nesta seção, é apresentada uma breve descrição de alguns estudos, destacando seus aspectos mais relevantes.

Contreras-Bejarano e Villegas-González (2019) desenvolveram um protótipo de telhado verde que permite a análise da qualidade da água da chuva antes e depois de ser filtrada em diferentes substratos. É analisado o comportamento de inundação urbana ao substituir os telhados existentes por telhados verdes por meio de modelagem computacional, utilizando o software SWMM. Aponta que os telhados verdes contribuem para a atenuação de inundações.

Latifi *et al.* (2019) apresentaram uma nova estrutura para otimizar as práticas de LID para gestão de águas pluviais em áreas urbanas. O modelo SWMM foi executado para diferentes cenários com LID para simular o volume de escoamento, transporte de sólidos suspensos totais e demanda bioquímica de oxigênio. Já o modelo Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE) é utilizado para encontrar soluções ideais como um sistema de apoio à decisão estratégica.

Lu *et al.* (2017) empregaram uma estrutura parcimoniosa para apoiar o WSUD, buscando uma compensação entre o investimento em recursos do WSUD e a mitigação dos danos das enchentes urbanas. Um modelo de simulação bidimensional (2D) hidrológico-hidráulico, SWMM, foi adotado para simular o processo chuva-escoamento e cenários de inundação, e os danos da inundação foram avaliados.

Mani *et al.* (2019) apresentaram uma estrutura para gestão quantitativa do escoamento urbano que avalia a resposta das bacias urbanas em eventos de chuva e identifica medidas de controle de águas pluviais de desenvolvimento de baixo impacto (LID). O método dessa pesquisa, conhecido como Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), determina as áreas ideais para implantar as técnicas para controlar o escoamento superficial em bacias urbanas, assim como LID mais desejável.

Yang e Chui (2018) desenvolveram um método para comparar o desempenho hidrológico chave (fluxo de pico, redução do volume de escoamento e atraso de tempo ao fluxo de pico) de três tipos de práticas LID (telhados verdes, células de biorretenção e trincheiras de infiltração) sob várias tempestades de projeto, utilizando o SWMM.

4 Considerações finais

A proposta da revisão sistemática apresentada neste trabalho teve como objetivo responder à seguinte questão de pesquisa: Como são avaliadas com ferramentas de modelagem matemática/computacional as propostas de mitigação de inundações em áreas urbanas? Analisando os trabalhos selecionados, observa-se que a implementação de técnicas mitigadoras é avaliada por meio da modelagem computacional, podendo-se criar cenários que possibilitam as tomadas de decisão. A maior parte dos trabalhos utilizou o software SWMM para dar suporte à pesquisa. Diversas técnicas LID foram testadas, com destaque para os pavimentos permeáveis e telhado verde nos estudos internacionais e para os pavimentos permeáveis e trincheiras de infiltração nos estudos nacionais.

Os estudos, em sua maioria, não geram como resultado uma ferramenta computacional capaz de auxiliar de forma contínua no processo de decisão da utilização das técnicas mitigadoras, atuando apenas de maneira pontual no local e período do estudo. Dessa forma, a revisão sistemática aponta para a necessidade de mais estudos explorando a temática de modelagem em função de medidas mitigatórias de inundações como ferramenta auxiliar no processo de decisão das técnicas ideais a serem utilizadas.

Referências

- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista FAE**, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 129 - 137, jan./jun. 2017. Disponível em: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/113>. Acesso em: 15 mai. 2021.
- CONTRERAS-BEJARANO, O.; VILLEGAS-GONZÁLEZ, P. A. Techos verdes para la gestión integral del agua: caso de estudio Chapinero. **Tecnología y ciencias del agua**, Colombia, v. 10, p. 282 - 318, 2019. DOI: 10.24850/j-tyca-2019-05-11. Disponível em: <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v10n5/2007-2422-tca-10-05-282-en.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2021.
- FORMIGA, K. T. M.; CARVALHO, M.; SILVA, K. A.; SOARES, A. K. Calibração do Storm Water Management Model (SWMM) utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 4, p. 697 - 707, dez. 2016. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522016000400697&lng=en&nrm=iso. Acesso em 05 mai. 2021.
- GAO, J., WANG, R., LIU, M. Application of BMP to urban runoff control using SUSTAIN model: Case study in na industrial area. **Ecological Modelling**, v. 318, p. 177 - 183, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.06.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304380015002677>. Acesso em: 06 jun. 2021.

JAMBO, J. B. **Uso do conceito WSUD (Water Sensitive Urban Design) na transição para cidades “sensíveis” à Água. Um estudo de caso de Teresópolis, RJ.** Projeto de Graduação (Engenharia Civil) – Escola Politécnica / UFRJ, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10021431.pdf>. Acesso em: 08 mai. 2021.

LANCIA, M.; ZHENG, C.; HEC, X.; LERNER, D.; ANDREWS, C.; TIANA, Y. Hydrogeological constraints and opportunities for “Sponge City” development: Shenzhen, southern China. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 28, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100679>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581819303222>. Acesso em: 30 jun. 2021.

LATIFI, M.; RAKHSHANDEHROO, G.; NIKOO, M.; SADEGH, M. A game theoretical low impact development optimization model for urban storm water management. **Journal of Cleaner Production**, v. 241, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118323>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652619331932>. Acesso em: 11 jun. 2021.

LI, Y.; LI, H.; HUANG, J.; LIU, C. An approximation method for evaluating flash flooding mitigation of sponge city strategies - A case study of Central Geelong. **Journal of Cleaner Production**, v. 257, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120525>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620305722>. Acesso em: 23 mai. 2021.

LU, W.; QIN, X. S.; JUN, C. A Parsimonious Framework of Evaluating WSUD Features in Urban Flood Mitigation. **Journal of Environmental Informatics**, v. 33, p. 17 – 27, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3808/jei.201700373>. Disponível em: <https://dr.ntu.edu.sg/bitstream/10220/49264/1/A%20Parsimonious%20Framework%20of%20Evaluating%20WSUD%20Features%20in%20Urban%20Flood%20Mitigation.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2021.

MANI, M.; BOZORG-HADDAD, O.; LOÁICIGA, H. A new framework for the optimal management of urban runoff with low-impact development stormwater control measures considering service-performance reduction. **Journal of Hydroinformatics**, v. 21, p. 727 - 744, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2166/hydro.2019.126>. Disponível em: <https://iwaponline.com/jh/article/21/5/727/68968/A-new-framework-for-the-optimal-management-of>. Acesso em: 23 mai. 2021.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J., ALTMAN, D.G. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **PLoS Med** 6, v. 7, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>.

MONTE, B. E. O.; COSTA, D. D.; CHAVES, M. B.; MAGALHÃES, L. O.; UVO, C. B. Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 152 - 167, jan./mar. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p152-167>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/S96LJwXfz7GKqDGjxTK84rJ/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 23 jun. 2021.

PARISI, S. A. **Análise da capacidade de infiltração para atenuação de alagamento em um ponto crítico na cidade do Recife.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Recife, 2019.

TUCCI, C. E. M.; VILLANUEVA, A.O. N. Flood control measures in União da Vitória and Porto União: structural vs. non-structural measures. **Urban Water**, v. 1, p. 177 - 182, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00012-1](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00012-1). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1462075800000121>. Acesso em: 01 mai. 2021.

YANG, Y.; CHUI, T. F. M. Rapid assessment of hydrologic performance of low impact development practices under design storms. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 54, n. 3, p. 613 - 630, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12637>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/1752-1688.12637>. Acesso em: 22 jun. 2021.

ZANANDREA, F.; SILVEIRA, A. L. L. Uso de técnicas de low impact development no controle de impactos hidrológicos. **Eng. Sanit. Ambient**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 6, p. 1195 - 1208, dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019188729>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522019000601195&lng=pt&nrm=iso. Acesso em: 03 mai. 2021.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPERJ, Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro, do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e da CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Código de Financiamento 001).