

CONSTRUÇÃO DE UM MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS DE DRENAGEM URBANA EM AMBIENTES CONSOLIDADOS

Carolina da Costa Antunes¹ ; Marina Batalini de Macedo²; Lucas Borges Leal da Silva³ ; Maria Clara Fava⁴ ; Priscilla Mota Costa⁵; Marcelo Hazin Alencar⁶

RESUMO – O crescimento urbano acelerado tem intensificado a impermeabilização do solo e, consequentemente, os problemas de inundações urbanas, tornando necessária a adoção de técnicas de drenagem sustentável. Nesse contexto, a escolha da alternativa mais adequada envolve múltiplos critérios, exigindo o uso de métodos de apoio à decisão. Este estudo teve como objetivo estruturar e modelar um problema de decisão multicritério aplicado à seleção de técnicas compensatórias de drenagem urbana na bacia do córrego do Gregório, em São Carlos – SP. Foram utilizados os programas Framework for Modeling Multicriteria Decision Problems e PROMROCnRatio, com aplicação do método PROMETHEE-ROC. Foram definidos quatro cenários com diferentes prioridades entre critérios como altura de inundação, volume de escoamento, concentração de sólidos, custo e aspectos subjetivos. Os resultados indicaram como alternativas mais adequadas: trincheira e vala de infiltração nos dois primeiros cenários, pavimentação permeável no terceiro e jardim de chuva no quarto. Conclui-se que a análise multicritério é uma ferramenta eficaz para apoiar a tomada de decisão no planejamento urbano, permitindo escolhas mais consistentes e alinhadas aos objetivos definidos.

Palavras-Chave – Análise multicritério; Drenagem urbana; PROMETHEE-ROC

ABSTRACT– Rapid urban growth has intensified soil impermeabilization and, consequently, urban flooding problems, highlighting the need for sustainable drainage solutions. In this context, selecting the most appropriate alternative involves multiple criteria, requiring the use of decision support methods. This study aimed to structure and model a multicriteria decision problem applied to the selection of compensatory urban drainage techniques in the Gregório stream watershed, located in São Carlos, SP, Brazil. The analyses were conducted using the Framework for Modeling Multicriteria Decision Problems and PROMETHEE-ROC through the PROMROCnRatio software, including sensitivity analysis. Four scenarios were defined with different priority weights assigned to criteria such as flood depth, runoff volume, solid concentration, cost. The results indicated infiltration trench and infiltration ditch as the most suitable alternatives in the first two scenarios, permeable pavement in the third scenario, and rain garden in the fourth. It can be concluded that multicriteria analysis is an effective tool to support decision-making in urban planning, enabling more consistent choices aligned with defined objectives.

Key-words – Multicriteria analysis; Urban drainage; PROMETHEE-ROC

1) Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI); e-mail: carolcostamg@gmail.com
2) Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI); e-mail: marinamacedo@unifei.edu.br
3) Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), e-mail: borgesleal.lucas@gmail.com
4) Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), e-mail: mcfava@ufscar.br
5) Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), e-mail: mcfava@ufscar.br
6) Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), e-mail: marceloalencar@insid.org.br

INTRODUÇÃO

O crescimento urbano acelerado observado no Brasil ao longo das últimas décadas ocorreu, em grande parte, de forma desordenada, resultando em diversos impactos negativos, especialmente relacionados à impermeabilização do solo e ao aumento da frequência e intensidade das inundações urbanas. A partir da década de 1960, o processo de urbanização intensificou-se significativamente, muitas vezes sem o devido planejamento de infraestrutura urbana, conforme mencionado em Tucci (2000) e Tucci (2012).

Esse cenário levou à ocupação de áreas inadequadas, como margens de rios e encostas, aumentando a vulnerabilidade da população a eventos extremos, como inundações e deslizamentos, segundo Rossato (2020). Além disso, de acordo com Moura *et al.* (2009) a ausência de planejamento urbano contribuiu para a obsolescência dos sistemas tradicionais de drenagem, tornando-os insuficientes para lidar com o aumento do escoamento superficial. Nesse contexto, surgem as técnicas compensatórias de drenagem urbana, que buscam restabelecer condições próximas aos naturais do ciclo hidrológico, promovendo infiltração, retenção e retardamento do escoamento. No entanto, a escolha da técnica mais adequada para uma determinada localidade não é trivial, pois envolve entender os objetivos de mitigação que se deseja para o local, sendo que para cada objetivo existem múltiplos critérios que precisam ser atendidos, podendo esses, inclusive, serem conflitantes. Diante disso, o uso de técnicas de análise multicritério se apresenta como uma ferramenta importante para auxiliar a tomada de decisão.

Métodos de Auxílio Multicritério à Decisão (MCDM, do inglês) podem ser classificados em dois grupos distintos, os compensatórios e os não compensatórios (CAMPELLO; GHIDINI, 2022). Nos compensatórios, o desempenho inferior de uma alternativa em um critério pode ser compensado com um desempenho superior em outro critério, havendo um trade-off ou compensação entre os critérios, enquanto isso não é possível nos métodos não compensatórios, conforme Fishburn (1976). Segundo Azevedo (2021), ao utilizar métodos não compensatórios, é possível agregar informações complexas e de difícil comparação e, ao mesmo tempo, evitar conclusões tendenciosas causadas pelo efeito compensatório, gerando um ranking global que permite observar quais possuem melhor performance. Existem metodologias e programas para auxiliar nessa escolha e estruturação, como o software Framework for Modeling Multicriteria Decision Problems.

O sistema Framework for Modeling Multicriteria Decision Problems é um programa realizado por estudantes e pesquisadores da Universidade Federal De Pernambuco e o Centro de

Desenvolvimento de Sistemas de Informação e Decisão (UFPE & CDSID, 2025). Ele auxilia na modelagem de problemas de decisão multicritério como suporte a definição do problema, identificação de alternativas, critérios e consequências, bem como a identificação da racionalidade do decisor. Esse framework auxilia na construção do problema, entender os seus objetivos, critérios envolvidos e o seu tipo de avaliação, assim como classificar o problema como compensatório ou não compensatório.

Posterior a elaboração do problema e sua compreensão, é necessário adotar uma técnica de análise multicritério. Diversas são as técnicas existentes, sendo como exemplos de técnicas mais comuns, para problemas compensatórios o *Analytical Aerarchic Problem* (AHP), e para problemas não compensatórios o *Electre* e o *Promethee* (Silva, 2024). Nesse sentido, focou-se nesse estudo na aplicação do método PROMETHEE-ROC (Almeida et al., 2014; Moraes et al., 2015), que é um método multicritério baseado no PROMETHEE II para a problemática de ordenação com elicitación via Rank Order Centroid (ROC) ou de razão, e é classificado como não compensatório, ou seja, o decisor pode dar pesos para os critérios com base na sua importância.

Ao usar uma racionalidade não compensatória, o método PROMETHEE II com elicitación ROCnRATIO leva em consideração a comparação pareada entre alternativas para cada critério. Além da matriz de grau de superação, esses fluxos positivos e negativos representam a extensão em que uma alternativa supera (ou é superada por) todas as outras opções. Consequentemente, o fluxo líquido é calculado para cada alternativa a fim de classificar a recomendação.

Assim, este trabalho tem como objetivo estruturar e modelar um problema de decisão multicritério aplicado à seleção de técnicas compensatórias de drenagem urbana na bacia do córrego do Gregório, localizada em São Carlos – SP.

METODOLOGIA

A metodologia envolveu a caracterização da área de estudo por meio da elaboração de mapas de uso e ocupação do solo, declividade, impermeabilização, hidrografia, entre outros, visando compreender os fatores que influenciam as inundações no local. Em seguida, foi estruturada uma análise multicritério, definindo-se objetivos, critérios e alternativas de técnicas compensatórias de drenagem. Por fim, aplicou-se o método 'por meio do PROMETHEE-ROC para hierarquizar as alternativas com base nos critérios estabelecidos, subsidiando a escolha das soluções mais adequadas à bacia. A Figura 1 mostra um fluxograma dos passos descritos.

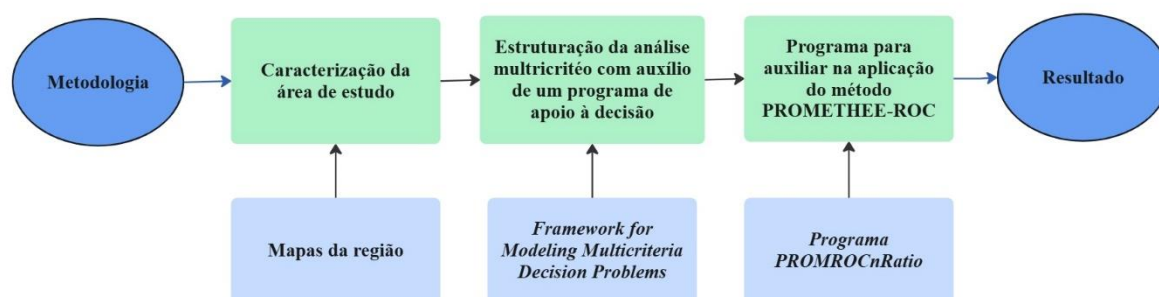


Figura 1 - Fluxograma das etapas

A fim de determinar métodos de drenagens em um local com inundações, foi escolhido como área de estudo a bacia do córrego do Gregório, um local com alta taxa de uso e ocupação do solo, onde se localizam diversas empresas e representa uma região que sofre com inundações frequentes. A Figura 2 ilustra a região de interesse.

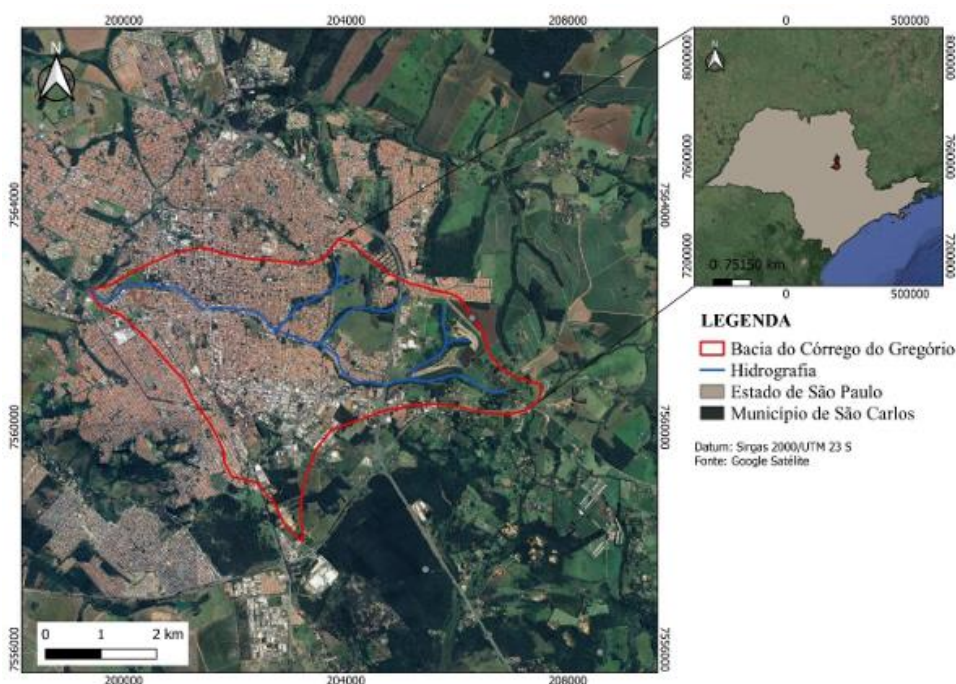


Figura 2 - Localização da bacia do Córrego do Gregório

Para as alternativas de drenagem, foram escolhidas as técnicas: jardim de chuva, pavimento permeável, trincheiras e valas de infiltração, bacia de retenção e retenção, telhado verde e reservatório de retenção individual. Os principais critérios considerados foram altura de inundação, volume de escoamento, concentração de sólidos em suspensão, custo da obra e aspectos subjetivos, como conforto e integração paisagística.

A matriz de consequências foi construída a partir da integração de diferentes conjuntos de dados necessários para representar o desempenho das alternativas de drenagem em relação aos

critérios definidos. Para os critérios subjetivos, como percepção de conforto e integração paisagística, foram utilizados os resultados obtidos por meio de questionários aplicados via Google Forms para consulta a especialistas, sendo considerados os valores médios das respostas. Os dados de concentração de sólidos em suspensão foram obtidos a partir de pesquisa na literatura, com base no banco de dados BMP Database (2024), enquanto os custos das obras foram estimados por meio de revisão bibliográfica em artigos técnicos e fontes institucionais (DOURADO, SILVA & MENDES, 2020; DER/PB, 2019; PREFEITURA DE PORTO ALEGRE, 2010; PEREIRA, 2014; UGREEN, 2024, FEITOSA, 2018, PERONI, 2018. EFFIZI, 2024). Ressalta-se que o BMP Database reúne informações de estudos realizados em países desenvolvidos. Dessa forma, em bacias urbanas brasileiras, onde podem ocorrer ligações irregulares de esgoto na rede de drenagem, a qualidade do escoamento pode diferir daquela representada na base de dados, influenciando o desempenho de técnicas como os jardins de chuva.

Já os parâmetros hidrológicos, como volume de escoamento e vazão máxima, foram obtidos por simulações realizadas no modelo SWMM previamente calibrado por Fava et al. (2022). Para garantir uma comparação mais justa entre as soluções propostas, foi adotada a mesma área de implantação e a mesma capacidade de armazenamento para todas as alternativas. Assim, foi possível trabalhar com uma medida padrão de retenção de volume, permitindo comparar o desempenho de cada solução sem a influência de diferenças de escala. Já os dados de altura de inundação foram determinados com o auxílio do modelo HEC-RAS, também previamente validado por Fava et al. (2022). Para isso, os hidrogramas gerados do SWMM foram utilizadas como entrada no modelo hidrodinâmico para a área de estudo.

Posteriormente, aplicou-se o método PROMETHEE-ROC por meio do software PROMROCnRatio (UFPE & CDSID, 2025), permitindo a obtenção do ranking das alternativas e a realização de análises de sensibilidade. Por fim, foram definidos quatro cenários distintos, variando a importância dos critérios, a fim de avaliar diferentes perspectivas de decisão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da consolidação das informações, foi possível preencher a matriz de consequências, que sintetiza o desempenho de cada técnica de drenagem em relação aos critérios analisados, servindo como base para a aplicação do método PROMETHEE-ROC. A Tabela 1 demonstra os resultados obtidos.

Tabela 1. Dados obtidos para matriz de consequência

Técnica de drenagem	Integração Paisagística	Concentração de sólidos em suspensão (mg/l)	Altura de inundação (m)	Volume total (m³)	Percepção de conforto	Custo da obra(R\$/m²)
Jardim de chuva	3	22,16	1,21	328387	3	225,00
Pavimentação permeável	2	31,94	1,13	228139	2	97,61
Bacia de detenção	2	33,78	1,20	449010	1	1940,32
Telhado verde	3	123,76	1,27	393106	3	125,00
Guias e sarjetas permeáveis	2	60,78	1,12	215941	2	122,71
Trincheira e valas de infiltração	2	63,9	1,12	215941	2	63,01
Reservatório de detenção individual	1	38,26	1,26	412610	1	900,00
Bacia de retenção	2	24,56	1,20	449010	2	354,44

Para a aplicação do método PROMETHEE-ROC foram propostos 4 cenários, conforme demonstra a Tabela 2, que representam perfis distintos de decisores, considerando decisores com ordem de preferência variadas dos critérios. É importante destacar que, diferentes decisores podem definir distintos cenários, sendo uma questão muito individual de representar uma preferência para um determinado problema.

Tabela 2. Cenários para análise dos resultados

Ordem de importância	1º Cenário	2º Cenário	3º Cenário	4º Cenário
1º	Altura de inundação	Custo da obra	Concentração de sólidos em suspensão	Percepção de conforto
2º	Volume total de água	Altura de inundação	Altura de inundação	Integração paisagística
3º	Concentração de sólidos em suspensão	Volume total de água	Volume total de água	Altura de inundação
4º	Custo da obra	Concentração de sólidos em suspensão	Custo da obra	Volume total de água
5º	Percepção de conforto	Percepção de conforto	Percepção de conforto	Custo da obra
6º	Integração paisagística	Integração paisagística	Integração paisagística	Concentração de sólidos em suspensão

Para o primeiro cenário (Figura 3a) foi determinado como ordem de preferência a altura de inundação, volume total, concentração de sólidos, custo da obra, percepção de conforto e integração paisagística. Pode-se perceber que para o primeiro cenário, foi obtido como melhor escolha a trincheira e vala de infiltração, seguido da guia e sarjeta permeável e as demais alternativas. A trincheira e vala de infiltração foram destacadas nesses cenários, por se tratar de obras que possuem boa capacidade de contenção de cheias e favorecerem a diminuição do volume de água na região no qual são implementadas.

Para o segundo cenário (Figura 3b), foi obtido como ordem de preferência: custo da obra, altura de inundação, volume total, concentração de sólidos, percepção de conforto e integração paisagística. Para o segundo cenário, a opção trincheiras e valas de infiltração permaneceu em primeiro lugar, seguida da pavimentação permeável e as demais opções. Essa priorização favorece principalmente soluções com menor custo de implantação e um bom desempenho na contenção da altura de inundação. Nesse contexto, alternativas como sarjetas permeáveis e pavimentos permeáveis tendem a se destacar por serem obras com um bom custo-benefício.

Para o terceiro cenário (Figura 3c) foi escolhido como ordem decrescente de preferência os critérios: concentração de sólidos em suspensão, altura de inundação, volume total, custo da obra, percepção de conforto e integração paisagística. As opções que mais se destacaram foram pavimentação permeável seguido de jardim de chuva e as demais obras de drenagem. Essas obras se destacaram principalmente pela capacidade de retenção de sólidos, e proporcionarem um bom desempenho na contenção de cheias.

Para o quarto cenário (Figura 3d) foi considerado como ordem de importância: percepção de conforto, integração paisagística, altura de inundação, volume total, custo da obra e concentração de sólidos em suspensão. As alternativas que mais evidenciadas foram jardim de chuva, seguido do telhado verde e as demais alternativas. Essas soluções são favorecidas nesses cenários, pois são obras que promovem a percepção de conforto, diminuindo as ilhas de calor e promovendo uma paisagem integrada no local, no qual chama mais atenção da população.

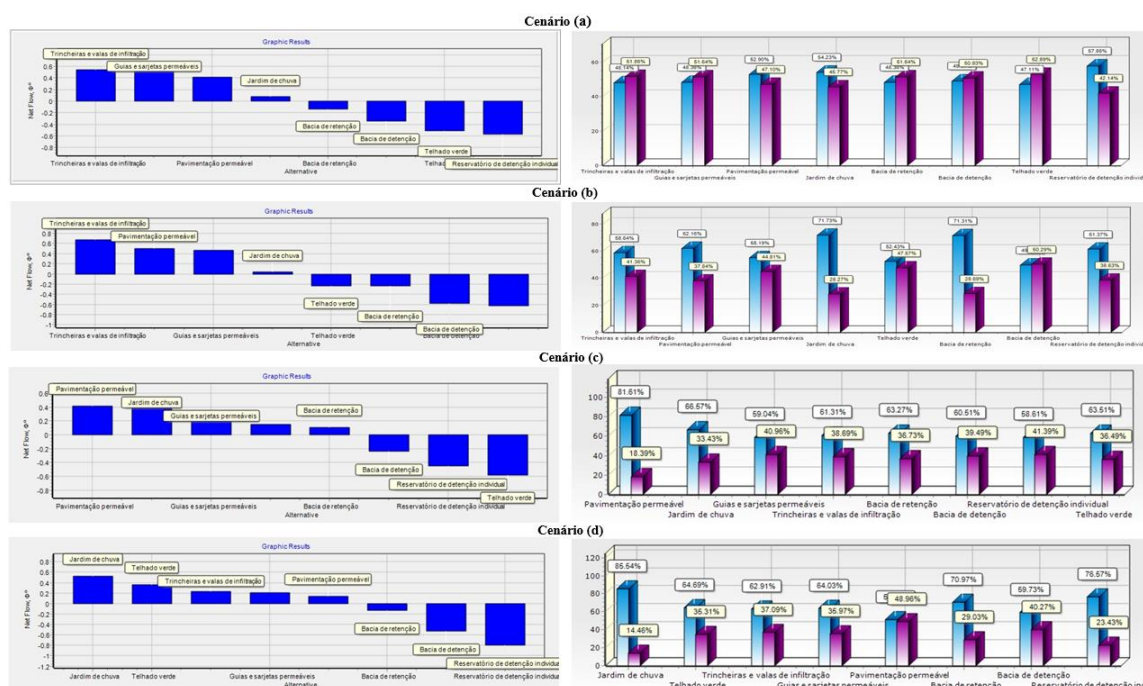


Figura 3 – Resultados de ordem de preferência de cada alternativa de técnica compensatória, considerando (a) primeiro cenário, (b) segundo cenário, (c) terceiro cenário e (d) quarto cenário

Foi esperado resultados diferentes para os cenários, como apresentado, visto que eles foram simulados individualmente, representando tomadores de decisão distintos. No entanto, cabe ressaltar que este programa fornece uma sugestão para o tomador de decisão, mas cabe ao decisor escolher a melhor técnica com base em suas preferências e na escolha do seu cenário ideal para o problema. A elaboração dos cenários pode auxiliar na resolução de problemas em grupo, fornecendo discussões e insights sobre as possíveis alternativas.

Além disso, a análise de sensibilidade foi aplicada a todos os cenários, considerando variações de $\pm 20\%$ nos valores dos critérios e nos pesos, com o objetivo de avaliar a robustez dos resultados obtidos pelo programa PROMROCnRatio. De modo geral, os resultados indicaram níveis de estabilidade de moderados a elevados, dependendo do cenário e do tipo de variação aplicada. Assim, a análise de sensibilidade evidencia que, embora algumas alternativas sejam mais suscetíveis a mudanças nos parâmetros, os resultados, em geral, apresentam confiabilidade satisfatória, reforçando a consistência do modelo e a adequação das soluções destacadas para cada conjunto de prioridades.

CONCLUSÃO

Pode-se concluir que a análise multicritério é de suma importância para auxiliar na tomada de decisão em diversos âmbitos, incluindo a escolha de técnicas de drenagem sustentáveis em ambientes consolidados. Nesse contexto, os programas Framework for Modeling Multicriteria Decision Problems e PROMROCnRatio, mostraram-se promissores no auxílio da estruturação da análise

multicritério e na aplicação do método PROMETHEE-ROC para gerar possíveis alternativas de técnicas de drenagem para a Bacia do Córrego do Gregório, em São Carlos.

O Framework contribuiu para a estruturação da análise multicritério, com os passos para o desenvolvimento da matriz de consequência e para a definição do método multicritério, enquanto o PROMROCNRatio auxiliou na aplicação do PROMETHEE-ROC e apresentou resultados satisfatórios com base no método, permitindo ainda a análise de sensibilidade.

Dessa forma, foi possível identificar possíveis técnicas de drenagem para diferentes cenários: trincheira e vala de infiltração foram as escolhas mais adequadas para o primeiro e segundo cenário, pavimentação permeável para o terceiro e jardim de chuva para o quarto cenário. Nesse contexto, os programas utilizados podem ser aplicados a diversas situações futuras, inclusive com dados de prefeituras, para analisar as prioridades nas cidades e gerar insights em grupos sobre possíveis soluções para os problemas enfrentados nas gestões públicas.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se a ampliação da base de dados hidrológicos e topográficos para as cidades, de modo a tornar as análises mais robustas e aplicáveis em diversos locais sem limitações. Por fim, cabe ao tomador de decisão definir seus critérios, objetivos e cenários, e com o auxílio da análise multicritério, obter a melhor solução para seu problema, de modo a garantir uma escolha mais eficiente e satisfatória.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. T.; MORAIS, D. C.; ALENCAR, L. H.; CLEMENTE, T. R. N.; KRYM, E. M.; BARBOZA, C. Z. (2014). “A multicriteria decision model for technology readiness assessment for energy based on PROMETHEE method with surrogate weights”. In: IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM 2014), Bandar Sunway. Proceedings of IEEM 2014.
- AZEVEDO, G. C. (2021). “Proposta de aplicação de método multicritério não compensatório para classificação dos países a partir do Better Life Index da OCDE”. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 104 f.
- BMPDATABASE. (2024). Ferramenta de análise estatística. Disponível em: <https://bmpdatabase.org/bmp-statistical-analysis-tool>. Acesso em: 7 abr. 2025.
- CAMPELLO, B. S. C.; GHIDINI, C. T. L. S. (2022). “Métodos de análise de decisão multicritério para seleção de padrões de corte”. Trends in Computational and Applied Mathematics, v. 23, n. 1, p. 1–16. Disponível em: Acessar artigo no SciELO. Acesso em: 30 abr. 2026.
- DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DA PARAÍBA (DER/PB). (2019). “Tabela de preços e serviços: abril–junho 2019”. Disponível em: <https://der.pb.gov.br/informacoes/tabela-de-precos-der-pb/derpb-tabela-de-precos-e-servicos-abr-jun2019.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2024.

- DOURADO, L. S.; SILVA, M. A.; MENDES, S. R. S. (2020). “Estudo sobre técnicas de drenagem urbana”. Goiânia: Pontifícia Universidade Católica de Goiás.
- EFIZZI. (2024). “Bacia de retenção”. Disponível em: <https://efizi.com.br/>. Acesso em: abr. 2025.
- FAVA, M. C., MACEDO, M. B. D., BUARQUE, A. C. S., SARAIVA, A. M., DELBEM, A. C. B., & MENDIONDO, E. M. (2022). “Linking urban floods to citizen science and low impact development in poorly gauged basins under climate changes for dynamic resilience evaluation”. *Water*, 14(9), 1467.
- FEITOSA, E. F. M. A. (2018). “Dimensionamento e estimativa orçamentária de diferentes combinações de técnicas compensatórias de drenagem urbana em lote do município de Santa Rita - PB”. João Pessoa. Disponível em: <dimensionamento-e-estimativa-orcamentaria-de-diferentes-combinacoes-de-tecnicas-compensatorias-de-drenagem-urbana-em-lote-do-municipio-de-santa-rita-pb.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2024.
- FISHBURN, P. C. (1976). “Noncompensatory preferences”. *Synthese* 33(1), pp. 393–403.
- MOURA, P. M.; BAPTISTA, M. B.; BARRAUD, S. (2009). “Avaliação multicritério de sistemas de drenagem urbana”. *REGA* 6(1), pp. 31–42.
- MORAIS, D. C.; ALMEIDA, A. T.; ALENCAR, L. H.; CLEMENTE, T. R. N.; CAVALCANTI, C. Z. B. (2015). “PROMETHEE-ROC model for assessing the readiness of technology for generating energy”. *Mathematical Problems in Engineering*, p. 1–11.
- PEREIRA, S. D. L. (2007). “Modelagem da decisão por pacotes de viagem: um estudo usando Processo de Hierarquia Analítica (AHP)”. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), Programa de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/14877>. Acesso em: maio 2024.
- PERONI, C. S. L. (2018). “Avaliação de bacias de retenção na gestão de águas pluviais em Araraquara, SP”. São Carlos.
- PREFEITURA DE PORTO ALEGRE. (2010). “Bacia da Avenida Teixeira Mendes está em operação”. Disponível em: https://www2.portoalegre.rs.gov.br/dep/default.php?p_noticia=129929. Acesso em: 10 dez. 2024.
- ROSSATTO, S. (2020). “Os impactos socioambientais das enchentes e inundações e suas relações com o processo de ocupação urbana irregular às margens do córrego Urutago no município de Francisco Beltrão – PR”. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia), Centro Universitário Internacional UNINTER. Disponível em: <https://repositorio.uninter.com/bitstream/handle/1/664/Da%20Luz%20Rossatto%2C%20Sandra.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 07 abril 2026.
- SILVA, I. A. (2024). “Tomada de decisão em grupo e multi-atributos baseada na lógica fuzzy intuicionista de Atanassov intervalarmente valorada”. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- TUCCI, C. E. M. (2000). “Inundações urbanas” in *Inundações urbanas na América do Sul*, pp. 15–29.
- TUCCI, C. E. M. (2012). “Gestão da drenagem urbana”. *Textos para Discussão CEPAL • IPEA*, 50 p.
- UGREEN. (2024). “Telhado verde: o guia completo”. Disponível em: <https://www.ugreen.com.br/telhado-verde/>. Acesso em: 10 dez. 2024.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. Centro de Desenvolvimento de Sistemas de Informação e Decisão. PROMROCnRatio. Disponível em: <https://cdsid.org.br/prometheeroc>. Acesso em: 10 mar. 2025.