www.revistaft.com.br

Revista FT | ISSN 1678-0817 | v. 30, n. 163, 2026 | DOI: 10.69849/w209cq73

Análise comparativa entre sistemas convencionais de drenagem urbana e técnicas compensatórias sustentáveis para o controle do escoamento superficial

Comparative analysis of conventional urban drainage systems and sustainable compensatory techniques for surface runoff control

Janaina Martins Gouveia; Valdinei Santos de Jesus;
Diego Tadeu Moreira; Isabella Coutinho Leal; Edi Carlos Expedito da Silva

RESUMO

A urbanização e a impermeabilização do solo alteram a resposta hidrológica das áreas urbanas e aumentam a pressão sobre as redes de drenagem. Este artigo compara sistemas convencionais e técnicas compensatórias sustentáveis, considerando função hidráulica, controle do escoamento, infiltração e armazenamento, aplicabilidade, manutenção, custos e limitações. Foi desenvolvida uma pesquisa aplicada, bibliográfica e documental, de abordagem qualitativa e objetivos exploratórios e descritivos. Foram examinados dispositivos de micro e macrodrenagem, pavimentos permeáveis, jardins de chuva, trincheiras de infiltração e reservatórios de detenção e retenção. A análise não incluiu medições de campo, simulações hidráulicas ou dimensionamento executivo. Os resultados indicam que a rede convencional continua necessária para a captação e a condução das águas pluviais, enquanto as técnicas compensatórias podem ampliar o controle na fonte e retardar o escoamento. Conclui-se que a integração entre as abordagens deve considerar as características locais, o projeto e a capacidade de operação e manutenção.

Palavras-chave: Drenagem urbana; Escoamento superficial; Técnicas compensatórias; Águas pluviais; Drenagem sustentável.

ABSTRACT

Urbanization and soil sealing alter the hydrological response of urban areas and increase pressure on drainage networks. This article compares conventional drainage systems and sustainable compensatory techniques in terms of hydraulic function, runoff control, infiltration and storage, applicability, maintenance, costs, and limitations. An applied bibliographic and documentary study was conducted using a qualitative approach and exploratory and descriptive objectives. The analysis covered micro- and macro-drainage devices, permeable pavements, rain gardens, infiltration trenches, and detention and retention facilities. No field measurements, hydraulic simulations, or executive designs were conducted. The findings indicate that conventional networks remain necessary for stormwater collection and conveyance, while compensatory techniques can expand source control and delay runoff. The article concludes that integration of the two approaches should account for local conditions, design requirements, and operation and maintenance capacity.
Keywords: Urban drainage; Surface runoff; Compensatory techniques; Stormwater; Sustainable drainage.

1 Introdução

O processo de urbanização modifica o funcionamento hidrológico do território quando substitui áreas vegetadas e superfícies permeáveis por edificações, ruas, calçadas e pavimentos. Com menor infiltração, parte da água da chuva passa a escoar com maior rapidez e em maior volume pela superfície. Essa transformação pode contribuir para alagamentos, inundações e sobrecarga da infraestrutura, especialmente quando o crescimento urbano não é acompanhado pela adequação da rede de drenagem. Tucci (2008) relaciona essas mudanças ao manejo integrado das águas urbanas.

A drenagem urbana integra a infraestrutura de proteção e funcionamento das cidades. Sarjetas, bocas de lobo, galerias, tubulações e canais captam e conduzem águas pluviais, mas sua capacidade depende do dimensionamento, da conservação e das condições de descarga a jusante. A ampliação das superfícies impermeáveis aumenta a contribuição que chega a esses dispositivos e pode deslocar o problema ao longo da bacia quando a condução é tratada de forma isolada (Tucci, 2008, 2012).

Nesse contexto, as técnicas compensatórias introduzem uma lógica complementar: parte do escoamento pode ser infiltrada, armazenada, retida ou liberada de forma mais lenta antes de alcançar a rede principal. Pavimentos permeáveis, jardins de chuva, trincheiras de infiltração e reservatórios não possuem a mesma função nem os mesmos requisitos. Sua

escolha depende do objetivo hidráulico, do solo, da área disponível, do uso do espaço e da capacidade de operação e manutenção. Baptista, Nascimento e Barraud (2015) sistematizam esse conjunto de alternativas.

A questão que orienta a pesquisa é: em que medida as técnicas compensatórias sustentáveis de drenagem urbana podem apresentar vantagens ou complementaridades em relação aos sistemas convencionais no manejo das águas pluviais? O objetivo geral é comparar as duas abordagens considerando funcionamento, controle do escoamento superficial, infiltração e armazenamento, aplicabilidade, manutenção, custos e limitações técnicas.

2 Revisão da literatura

2.1 Urbanização, impermeabilização e drenagem urbana

O comportamento das águas pluviais em uma área urbanizada está diretamente relacionado ao uso e à ocupação do solo. A substituição de superfícies naturais por pavimentos, telhados e edificações reduz a infiltração e altera a resposta hidrológica das bacias urbanas. Tucci (2008) insere essa discussão no conceito de águas urbanas e defende uma abordagem integrada entre planejamento, infraestrutura e recursos hídricos. Na gestão da drenagem, não basta considerar apenas a condução da água em tubulações. Tucci (2012) destaca que o manejo do escoamento no tempo e no espaço deve buscar a redução de danos sociais e ambientais e estar relacionado ao planejamento da cidade e da bacia hidrográfica. Dessa forma, a drenagem passa a ser entendida como parte de um sistema urbano mais amplo. O aumento do escoamento superficial também está associado à redução de áreas verdes e à expansão das superfícies impermeáveis. Em cenários urbanos, essa alteração pode elevar a vazão direcionada aos dispositivos de microdrenagem e macrodrenagem. Por isso, o controle das águas pluviais exige tanto infraestrutura de condução quanto medidas capazes de retardar, armazenar ou infiltrar parte do volume precipitado.

Na microdrenagem, sarjetas, bocas de lobo, poços de visita, tubos e galerias captam e transportam as águas geradas nas áreas urbanizadas. Na macrodrenagem, canais e estruturas de maior escala recebem contribuições de áreas mais amplas. A distinção é relevante porque a insuficiência de um dispositivo local pode repercutir na rede conectada, enquanto a expansão da impermeabilização pode elevar a solicitação sobre estruturas a jusante. Tucci (2008, 2012) sustenta que a drenagem deve ser relacionada ao planejamento urbano e à bacia hidrográfica, e não apenas à rápida retirada da água de um ponto específico.

2.2 Sistemas convencionais de drenagem urbana

Os sistemas convencionais de drenagem urbana são formados por dispositivos destinados à coleta, transporte e lançamento das águas pluviais. Na microdrenagem, destacam-se sarjetas, bocas de lobo, poços de visita, tubos e galerias. Em escalas maiores, canais e estruturas de macrodrenagem recebem as vazões provenientes das áreas urbanizadas. A principal vantagem desse modelo está na capacidade de remover rapidamente a água das áreas ocupadas quando a rede está corretamente dimensionada e conservada. Entretanto, a transferência rápida do escoamento para jusante pode deslocar o problema para outros pontos da bacia. Além disso, redes existentes podem se tornar insuficientes quando a urbanização aumenta sem adequação proporcional da infraestrutura. Assim, a drenagem convencional continua sendo necessária, mas seu uso isolado apresenta limitações. A visão contemporânea tende a combinar a rede tradicional com medidas de controle na fonte e de redução do escoamento, buscando distribuir melhor o armazenamento e a infiltração ao longo da área urbana (Tucci, 2012).

2.3 Técnicas compensatórias e drenagem sustentável

As técnicas compensatórias surgem como alternativas destinadas a reduzir os efeitos hidrológicos provocados pela urbanização. Baptista, Nascimento e Barraud (2015) organizam essas soluções a partir de mecanismos como retenção, infiltração e armazenamento, incluindo bacias de detenção, técnicas lineares e dispositivos aplicáveis em lotes e espaços públicos. Em vez de conduzir imediatamente todo o volume precipitado para a rede, essas técnicas procuram aproximar o comportamento da área urbanizada das condições naturais anteriores à impermeabilização. O objetivo pode envolver a redução do pico de vazão, o atraso do escoamento, o aumento da infiltração e o armazenamento temporário da água. Lucas et al. (2015) avaliaram unidades em escala real, incluindo sistema filtro-vala-trincheira de infiltração e poço de infiltração. O estudo mostra a importância de aspectos construtivos, da capacidade de infiltração do solo e do comportamento dos materiais para o desempenho das técnicas compensatórias. Isso evidencia que a solução sustentável também exige projeto, execução e manutenção adequados. Vasconcelos, Miguez e Vazquez (2016), utilizando modelagem computacional, avaliaram combinações de técnicas de controle na fonte em diferentes escalas. Entre as configurações estudadas aparecem jardim rebaixado, reservatório de lote e pavimento permeável. Os autores mostram que a concepção do sistema e a combinação de dispositivos influenciam os benefícios obtidos no controle do escoamento.

As técnicas compensatórias não constituem um conjunto homogêneo. Pavimentos permeáveis atuam na superfície e nas camadas estruturais; jardins de chuva e jardins rebaixados recebem temporariamente o escoamento em áreas vegetadas; trincheiras e poços concentram armazenamento e infiltração; reservatórios de detenção e retenção controlam o volume e o tempo de liberação. Em todas as alternativas, a escolha depende da relação entre objetivo hidráulico, solo, área disponível, risco de contaminação, manutenção e operação. Lucas et al. (2015) mostram que finos, infiltração e geotêxteis interferem no funcionamento de estruturas de infiltração, enquanto Vasconcelos, Miguez e Vazquez (2016) evidenciam a importância da combinação e da escala de controle. Portanto, sustentabilidade não significa ausência de requisitos técnicos.

2.4 Pavimentos permeáveis, jardins de chuva e estruturas de infiltração

Os pavimentos permeáveis são utilizados em áreas onde se pretende permitir a passagem da água através da superfície e de camadas estruturais, reduzindo o escoamento direto. Furtado et al. (2021) avaliaram a eficiência de drenagem de um modelo de pavimento de concreto permeável sob chuva natural, relacionando esse tipo de solução ao controle do escoamento superficial em ambientes urbanos. Os jardins de chuva e jardins rebaixados utilizam áreas vegetadas e depressões controladas para receber temporariamente águas pluviais, favorecendo retenção e infiltração. Seu desempenho depende de fatores como área contribuinte, características do solo, vegetação, intensidade das chuvas e existência de dispositivos de extravasamento. As trincheiras e os poços de infiltração concentram o armazenamento em estruturas preenchidas ou escavadas que permitem a infiltração gradual da água no solo. Lucas et al. (2015) demonstram que a avaliação da capacidade de infiltração é fundamental, pois a eficiência dessas estruturas pode ser afetada pelo transporte de partículas finas e pelas condições do solo. Essas soluções apresentam potencial para aplicação em lotes, calçadas, estacionamentos e áreas verdes, mas não são universais. Locais com baixa permeabilidade, lençol freático elevado, risco de contaminação ou espaço insuficiente exigem avaliação técnica específica antes da implantação.

2.5 Detenção, retenção e controle do pico de vazão

Reservatórios e bacias de detenção armazenam temporariamente parte da água da chuva e liberam o volume de maneira controlada. Já estruturas de retenção podem manter parcela do volume armazenado por período mais prolongado. Em ambos os casos, a finalidade hidráulica está associada à redução e ao atraso das vazões que chegam à rede de drenagem.

Vasconcelos, Miguez e Vazquez (2016) mostram que medidas de controle na fonte podem ser combinadas e avaliadas em diferentes escalas. Essa possibilidade é relevante porque uma única técnica pode não responder a todos os objetivos de drenagem. A combinação de armazenamento, infiltração e condução permite distribuir funções entre diferentes elementos do sistema.

2.6 Comparação entre sistemas convencionais e técnicas compensatórias

A comparação entre as duas abordagens mostra que elas atendem a funções diferentes e, por isso, não devem ser tratadas necessariamente como concorrentes. O sistema convencional possui papel importante na coleta e condução das águas pluviais, enquanto as técnicas compensatórias procuram reduzir o volume ou retardar a vazão antes que a água alcance a rede. Entre os critérios que devem orientar a escolha estão eficiência hidráulica, capacidade de infiltração ou armazenamento, disponibilidade de área, condições do solo, custo de implantação, manutenção, vida útil, facilidade construtiva e impactos ambientais. A literatura também indica que a distribuição espacial das medidas é importante. Macedo e Rodrigues (2024) demonstram essa preocupação ao analisar locais adequados para técnicas sustentáveis em Itajubá-MG. Do ponto de vista de planejamento, a integração tende a ser mais coerente do que a substituição total de um modelo pelo outro. A infraestrutura existente pode continuar desempenhando a função de condução, enquanto medidas descentralizadas reduzem parte da carga que chega às galerias. Essa lógica permite pensar a drenagem como um conjunto de soluções articuladas, adaptadas às condições de cada área urbana.

2.7 Critérios geotécnicos e hidrológicos de implantação

A implantação de dispositivos de infiltração depende da interação entre o volume afluente, a capacidade de armazenamento da estrutura e a aptidão do terreno para receber água. A permeabilidade do solo, a presença de camadas menos permeáveis e a posição do lençol freático condicionam a solução. Mesmo quando a superfície de um pavimento permite a entrada de água, a capacidade de escoamento para o subleito pode ser limitada. Nesses casos, o projeto deve avaliar a necessidade de drenagem complementar e de extravasamento, evitando pressupor que toda água infiltrada na camada superficial seguirá imediatamente para o terreno natural.

Lucas et al. (2015) investigaram aspectos construtivos e operacionais de técnicas compensatórias e destacaram variáveis como transporte de finos, taxa real de infiltração do solo e permeabilidade de manta geotêxtil. Esses elementos mostram que o comportamento de

uma estrutura não decorre apenas de sua classificação nominal. A composição das camadas, os materiais empregados e o aporte de partículas ao longo da operação podem alterar sua capacidade de receber e transmitir água. A análise bibliográfica permite identificar essas dependências, mas não substitui ensaios de infiltração, investigação geotécnica ou dimensionamento para um empreendimento específico.

A avaliação do terreno também envolve restrições sanitárias e ambientais. A presença de potenciais fontes de contaminação, a proximidade de estruturas sensíveis à umidade e as condições de estabilidade precisam ser consideradas antes da adoção de infiltração concentrada. O controle na fonte não deve ser confundido com lançamento indiscriminado de águas pluviais no subsolo. As alternativas de armazenamento e descarga controlada podem assumir maior importância onde a infiltração é limitada, desde que atendam às condições do projeto e da rede receptora (Baptista; Nascimento; Barraud, 2015).

Assim, a comparação qualitativa adotada neste trabalho não estabelece uma hierarquia fixa entre pavimentos, jardins, trincheiras e reservatórios. Cada dispositivo responde a uma combinação de objetivos hidráulicos e condicionantes de implantação. O mesmo espaço urbano pode admitir mais de uma solução, ou nenhuma das alternativas de infiltração examinadas, dependendo das características locais. A seleção técnica responsável começa pela definição do problema e pela verificação das restrições, e somente depois avança para a escolha da tipologia.

2.8 Operação, manutenção e perda de desempenho

A manutenção integra o desempenho de qualquer sistema de drenagem, embora suas rotinas variem conforme a tecnologia. Em redes convencionais, a limpeza de sarjetas e bocas de lobo, a retirada de sedimentos e a conservação de galerias contribuem para manter a capacidade de captação e transporte. Em técnicas compensatórias, podem ser relevantes o manejo da vegetação, a remoção de resíduos, a inspeção de entradas e saídas, o controle do acúmulo de partículas e a preservação das camadas permeáveis. A comparação, portanto, não pode opor uma solução supostamente livre de manutenção a outra que exige intervenções constantes.

Em estruturas de infiltração, o aporte de material fino é uma variável de atenção. Lucas et al. (2015) relacionam o transporte de finos a aspectos da construção e da operação das técnicas avaliadas. A perda progressiva de capacidade pode ocorrer quando partículas ocupam vazios e restringem a passagem de água, fenômeno frequentemente discutido como colmatação. A existência desse risco não permite afirmar que toda técnica perderá

desempenho no mesmo ritmo: o processo depende das condições de contribuição, do material empregado, do uso do entorno e das ações de conservação.

Para pavimentos permeáveis, o cuidado operacional precisa ser compatível com a superfície e com as camadas que compõem o sistema. O estudo de Furtado et al. (2021), realizado com um modelo de concreto permeável sob chuva natural, é útil para discutir o funcionamento de uma configuração específica, mas não determina um plano de manutenção universal. Em jardins de chuva, a manutenção da vegetação e das condições de entrada e extravasamento é parte do funcionamento previsto. Em reservatórios, a inspeção dos dispositivos de saída e a remoção de obstruções são relevantes para preservar a descarga controlada.

Um aspecto frequentemente subestimado na decisão é definir quem assumirá a responsabilidade pela manutenção após a implantação. Uma solução tecnicamente compatível pode apresentar desempenho insatisfatório quando não existe rotina de inspeção ou previsão de recursos para conservação. Por isso, a viabilidade deve considerar não apenas a construção, mas a operação ao longo do tempo. O artigo não dispõe de séries históricas de manutenção nem de custos comparáveis; sua contribuição é identificar essa responsabilidade como critério indispensável à escolha entre alternativas.

2.9 Custos, ciclo de vida e viabilidade institucional

A avaliação econômica da drenagem urbana não se resume ao preço inicial da obra. Redes, pavimentos permeáveis, jardins de chuva, trincheiras e reservatórios possuem componentes construtivos distintos, ocupam áreas diferentes e demandam intervenções específicas de operação. A comparação financeira deve considerar a vida útil prevista, a frequência de manutenção, as condições de acesso, a eventual substituição de componentes e a compatibilidade com a infraestrutura já existente. Sem um orçamento referenciado a um mesmo local e a condições equivalentes de projeto, a classificação de uma técnica como mais barata ou mais cara pode induzir a conclusões inadequadas.

O conjunto de fontes deste artigo não fornece uma base homogênea para cálculo de custo do ciclo de vida. Furtado et al. (2021) concentram-se no comportamento de um modelo de pavimento permeável; Lucas et al. (2015) abordam variáveis construtivas e operacionais; Vasconcelos, Miguez e Vazquez (2016) examinam benefícios esperados com modelagem em estudo de caso; Macedo e Rodrigues (2024) tratam de critérios de seleção e distribuição espacial. São abordagens complementares, mas não constituem uma planilha de custos

comparáveis entre tecnologias. Por isso, a ausência de números no Quadro 1 é uma escolha metodológica, e não uma lacuna a ser preenchida por estimativas arbitrárias.

A dimensão institucional também influencia a viabilidade. A implantação de técnicas distribuídas em lotes e áreas públicas requer clareza sobre responsabilidades, integração com serviços de drenagem e procedimentos de conservação. A Norma de Referência ANA nº 12/2025, aprovada pela Resolução ANA nº 245/2025, fornece um enquadramento para a estruturação dos serviços públicos de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas. Esse instrumento institucional não define, por si só, a solução hidráulica adequada a cada local, mas reforça a importância de tratar a drenagem como serviço organizado e não apenas como conjunto isolado de obras.

A revisão também identificou as premissas necessárias para futuras análises de alternativas: orçamento, período de avaliação, custos de operação, condições de desempenho e compatibilidade com a infraestrutura existente. Esses elementos não foram calculados neste trabalho por ausência de dados locais e de projetos executivos. A síntese apresentada organiza as informações que deverão ser levantadas em uma comparação técnica e econômica posterior.

2.10 Critérios para escolha combinada de dispositivos

A seleção de medidas de drenagem pode ser organizada como sequência de decisões. Inicialmente, identifica-se o problema predominante: acúmulo superficial, insuficiência de captação, transferência de vazão a jusante, ausência de armazenamento ou necessidade de reduzir contribuições na origem. Em seguida, avaliam-se as características físicas do local, incluindo solo, declividade, área disponível, ocupação e conexão com a infraestrutura existente. Somente depois faz sentido comparar quais dispositivos atendem à função desejada. Essa ordem evita escolher uma tecnologia pela aparência ou pela designação sustentável, sem comprovar sua compatibilidade com o problema.

Quando o objetivo principal é captar e transportar água de uma via, os dispositivos convencionais continuam necessários. Quando há espaço e condições apropriadas, soluções de infiltração ou armazenamento podem reduzir a contribuição encaminhada à rede. Quando a infiltração é restrita, alternativas de detenção e descarga controlada podem ser consideradas, desde que devidamente dimensionadas. A literatura sistematizada por Baptista, Nascimento e Barraud (2015) e a modelagem de Vasconcelos, Miguez e Vazquez (2016) sustentam a possibilidade de combinações, sem estabelecer que uma mesma configuração seja ótima em todos os contextos.

O procedimento de seleção deve incluir a análise das consequências de falhas ou sobrecargas. Dispositivos de controle na fonte precisam ser compatibilizados com trajetos de extravasamento, e a rede convencional deve ser considerada no contexto de suas conexões a jusante. A manutenção também deve ser prevista desde o início. O resultado de uma comparação responsável não é necessariamente a escolha de uma única técnica, mas a definição de funções complementares, limitações conhecidas e condições que precisarão ser verificadas no projeto.

Como esta pesquisa é bibliográfica, os critérios aqui propostos não constituem dimensionamento hidráulico. Não foram calculadas vazões de projeto, tempos de retorno, volumes de reservação ou taxas locais de infiltração. Sua finalidade é orientar a leitura crítica das alternativas e explicitar as informações necessárias para que uma futura aplicação seja tecnicamente fundamentada.

3 Metodologia

A pesquisa foi de natureza aplicada, com objetivo exploratório e descritivo, utilizando procedimentos bibliográficos e documentais e abordagem predominantemente qualitativa. O estudo foi desenvolvido por meio da análise comparativa de sistemas convencionais de drenagem urbana e técnicas compensatórias sustentáveis. Não foram realizadas entrevistas, experimentos com seres humanos, medições de campo ou coleta de dados pessoais.

3.1 Universo e delimitação da pesquisa

O universo da pesquisa foi composto por publicações científicas, livros, dissertações, trabalhos acadêmicos, normas técnicas, legislação e documentos de órgãos oficiais relacionados à drenagem urbana e ao manejo das águas pluviais. Como se trata de estudo bibliográfico e documental, não houve população humana, amostra de campo ou local de intervenção. A análise foi delimitada aos sistemas convencionais — sarjetas, bocas de lobo, galerias e canalizações — e às técnicas compensatórias de pavimentos permeáveis, jardins de chuva, trincheiras de infiltração e reservatórios de detenção e retenção.

O recorte reuniu obras de referência e documentos recentes, incluindo publicações científicas, livros técnicos e normativas institucionais. Não se tratou de revisão sistemática com meta-análise nem de estudo de caso aplicado a uma área específica. As unidades de análise foram a abordagem convencional e quatro grupos de técnicas compensatórias: pavimentos permeáveis, jardins de chuva, trincheiras de infiltração e reservatórios de detenção e retenção. Essa delimitação foi adotada para permitir uma síntese qualitativa,

preservando o alcance de cada fonte e evitando a generalização de resultados obtidos em um modelo, em um estudo de caso ou em uma técnica para todas as alternativas.

3.2 Materiais e métodos

Foram utilizados artigos científicos, livros técnicos, dissertações, documentos normativos e publicações institucionais. As fontes apresentadas na bibliografia foram examinadas conforme sua pertinência ao tema e o tipo de contribuição técnica ou institucional. Não foi disponibilizado registro completo das bases consultadas, das datas de busca ou dos resultados recuperados; por isso, o estudo não se caracteriza como revisão sistemática. As informações relevantes foram sistematizadas para a comparação temática entre as soluções estudadas.

3.3 Procedimentos de coleta de dados

A análise documental concentrou-se nas obras relacionadas a drenagem urbana, escoamento superficial, técnicas compensatórias, pavimentos permeáveis, jardins de chuva, infiltração e reservatórios. Os critérios descritos a seguir organizam a avaliação de pertinência das fontes citadas. Não há registro documental suficiente para afirmar que se realizou uma busca exaustiva em bases de dados ou uma triagem quantitativa de publicações.

Para interpretação do conjunto bibliográfico, consideraram-se pertinentes as fontes com autoria e procedência identificáveis e informações relacionadas ao funcionamento, à aplicabilidade ou às limitações das alternativas. Materiais sem fundamentação verificável não constituem base adequada para as conclusões apresentadas. Esses critérios descrevem a leitura crítica do corpus citado, não uma contagem retrospectiva de registros incluídos ou excluídos.

3.4 Organização e análise dos dados

A análise foi qualitativa e comparativa. Cada solução foi examinada segundo critérios comuns: princípio de funcionamento, controle do escoamento superficial, capacidade de infiltração ou armazenamento, necessidade de manutenção, custos, aplicabilidade, limitações técnicas e impactos ambientais. A interpretação buscou identificar convergências e divergências entre os autores e situações em que sistemas convencionais e técnicas compensatórias podem ser empregados de forma complementar.

A interpretação foi conduzida em duas etapas. Primeiro, foram identificadas, em cada fonte, a finalidade hidráulica, a escala de aplicação, as condições de implantação e os aspectos de operação. Depois, essas informações foram confrontadas entre as alternativas,

considerando funcionamento, controle do escoamento, infiltração ou armazenamento, manutenção, custos quando informados, aplicabilidade, limitações e impactos ambientais. Quando uma referência tratou de um caso específico, de um modelo ou de uma análise computacional, o achado foi mantido nesse nível de evidência e não foi convertido em indicador geral de desempenho.

3.5 Matriz de interpretação das fontes

Para tornar transparente a comparação, as fontes foram agrupadas conforme o tipo de contribuição que oferecem. Tucci (2008, 2012) fundamenta a relação entre urbanização, gestão e infraestrutura; Baptista, Nascimento e Barraud (2015) sistematizam os princípios e as tipologias das técnicas compensatórias; Lucas et al. (2015) discutem condições de construção e operação de dispositivos de infiltração; Furtado et al. (2021) apresentam evidência específica de pavimento permeável sob chuva natural; Vasconcelos, Miguez e Vazquez (2016) analisam configurações de controle na fonte por modelagem; e Macedo e Rodrigues (2024) tratam da seleção espacial. Os documentos da ANA (2025a, 2025b) foram utilizados para a contextualização institucional.

Essa distinção é importante na interpretação porque as fontes respondem a perguntas diferentes. Uma publicação sobre gestão não fornece, necessariamente, medidas de desempenho de um pavimento; um ensaio sobre pavimento não permite estabelecer os custos de um reservatório; e uma simulação de determinada área não comprova resultados idênticos em outro município. A interpretação preservou a unidade de análise de cada publicação e evitou somar informações heterogêneas como se fossem resultados de um experimento único.

Os critérios de comparação adotados foram função hidráulica, escala de aplicação, condições de implantação, dependência de manutenção, limitações e disponibilidade de evidência econômica. A ausência de dado em uma fonte não foi interpretada como ausência de custo, de manutenção ou de benefício da técnica. Essa cautela fortaleceu a validade da síntese qualitativa, embora não elimine a limitação de trabalhar com um conjunto restrito de publicações e sem avaliação empírica própria.

3.6 Aspectos éticos

Por se tratar de pesquisa bibliográfica e documental baseada em fontes públicas e publicações acadêmicas, sem participação direta de pessoas e sem coleta de dados pessoais, não se aplicou termo de responsabilidade ética específico. Todas as fontes utilizadas foram identificadas e referenciadas conforme as normas acadêmicas adotadas pela instituição.

4 Resultados e discussão

Os resultados correspondem à análise bibliográfica e documental das fontes selecionadas. Não foram realizados ensaios, medições hidrológicas, levantamentos de campo ou simulações hidráulicas. Portanto, a comparação é qualitativa e descreve mecanismos, possibilidades de aplicação e limitações apontadas pela literatura, sem atribuir índices numéricos de desempenho às soluções.

4.1 Comparação das abordagens de drenagem

A literatura consultada permite distinguir dois enfoques. No sistema convencional, sarjetas, bocas de lobo, galerias e canalizações concentram a função de captar e transportar a água das chuvas. Esse arranjo continua necessário para a infraestrutura urbana, mas sua capacidade pode ser pressionada pela ampliação de superfícies impermeáveis, conforme o debate de Tucci (2008) sobre as alterações hidrológicas decorrentes da urbanização. As técnicas compensatórias procuram interferir em etapas anteriores ao transporte da água pela rede. Conforme a abordagem de Baptista, Nascimento e Barraud (2015), dispositivos de infiltração, armazenamento e detenção oferecem alternativas de controle na fonte. A principal diferença, portanto, não está apenas no tipo de estrutura utilizada, mas no objetivo hidráulico: conduzir o escoamento ou reduzir e retardar sua contribuição para a rede.

Quadro 1 – Comparação qualitativa entre sistemas convencionais e técnicas compensatórias

Alternativa	Funcionamento, controle e infiltração/armazenamento	Vantagens, limitações, condições e aplicabilidade	Custos e manutenção
Drenagem convencional	Capta e conduz as águas pela micro e macrodrenagem; a função principal é a condução. (Tucci, 2008, 2012)	É necessária para a infraestrutura urbana, mas a condução rápida pode transferir o escoamento a jusante. Requer dimensionamento e conservação. Aplicável como rede estruturante; não se concentra no controle da infiltração na fonte.	Custos não comparáveis no corpus. Exige limpeza e conservação dos dispositivos.
Pavimentos permeáveis	Permitem a passagem da água pela superfície e podem reduzir o escoamento direto. Furtado et al. (2021) avaliaram um modelo sob chuva natural; favorecem a infiltração quando o projeto é compatível.	O estudo é específico para um modelo e não autoriza generalização. Atuam próximo à origem, mas dependem do solo, do projeto, da operação e das condições de uso.	Não há valor geral de custo. Exigem projeto e manutenção em áreas compatíveis.
Jardins de chuva	Recebem temporariamente o escoamento em áreas vegetadas ou rebaixadas, favorecendo retenção e infiltração. (Baptista; Nascimento; Barraud, 2015)	Associam armazenamento temporário e infiltração e podem retardar a chegada da água à rede. Dependem de área, solo, vegetação e extravasamento; não houve estudo de campo próprio.	Não há valores comparáveis. Aplicabilidade e manutenção devem ser avaliadas no local.

Alternativa	Funcionamento, controle e infiltração/armazenamento	Vantagens, limitações, condições e aplicabilidade	Custos e manutenção
Trincheiras de infiltração	Armazenam e infiltram gradualmente parte da água, atuando no controle da contribuição à rede. (Baptista; Nascimento; Barraud, 2015; Lucas et al., 2015)	Finos, solo e manta geotêxtil influenciam a operação. Podem controlar o escoamento na fonte, mas são limitadas por permeabilidade, lençol, risco de contaminação e espaço.	Não há valor geral de custo. Controle de finos, limpeza e manutenção são necessários.
Reservatórios de detenção e retenção	Armazenam temporariamente e liberam a água de forma controlada, reduzindo ou atrasando vazões. (Baptista; Nascimento; Barraud, 2015; Vasconcelos; Miguez; Vazquez, 2016)	A detenção e a retenção distribuem o armazenamento no tempo. Permitem combinar escalas, mas exigem área, dimensionamento e operação; a combinação depende do contexto.	Não há valores comparáveis. Custos e manutenção dependem da implantação e da operação.

Fonte: elaboração própria, com base em Tucci (2008, 2012), Baptista, Nascimento e Barraud (2015), Lucas et al. (2015), Furtado et al. (2021) e Vasconcelos, Miguez e Vazquez (2016).

Nota: os custos são apresentados sem valores e sem classificação de menor ou maior custo, pois as fontes analisadas não formam base homogênea de comparação.

A aplicabilidade deve ser interpretada conforme o tipo de evidência disponível. Furtado et al. (2021) analisaram um modelo de pavimento de concreto permeável sob chuva natural; esse resultado contribui para discutir pavimentos, mas não permite generalizar eficiência, custo ou manutenção para qualquer pavimento permeável. Lucas et al. (2015) destacaram variáveis de construção e operação relacionadas ao transporte de finos, à capacidade de infiltração, à taxa de infiltração do solo e à permeabilidade da manta geotêxtil. Para jardins de chuva e reservatórios, o estudo utiliza a literatura geral sobre técnicas compensatórias e a modelagem discutida por Vasconcelos, Miguez e Vazquez (2016), sem apresentar medição própria dessas alternativas. Macedo e Rodrigues (2024) acrescentam a dimensão espacial da seleção. Portanto, a escolha deve considerar solo, área disponível, objetivo hidráulico, operação e manutenção, e não apenas o nome da tecnologia.

Houve convergência entre as fontes quanto à necessidade de combinar controle na fonte e infraestrutura de condução, em vez de tratar os modelos como substitutos absolutos. Também houve convergência quanto à dependência das condições locais e da manutenção. A principal diferença está no tipo de evidência: Tucci (2008, 2012) e a ANA (2025a, 2025b) oferecem enquadramento de gestão e serviços; Baptista, Nascimento e Barraud (2015) sistematizam técnicas; Lucas et al. (2015) analisam aspectos construtivos e de infiltração; Furtado et al. (2021) avaliam um modelo de pavimento sob chuva natural; Vasconcelos, Miguez e Vazquez (2016) utilizam modelagem computacional em estudo de caso; e Macedo e Rodrigues (2024) tratam de seleção e distribuição espacial. Essa heterogeneidade impede comparar os resultados como se viessem de um mesmo experimento.

4.2 Aplicabilidade e limitações

Pavimentos permeáveis e trincheiras de infiltração dependem de condições adequadas de solo, capacidade de infiltração e manutenção para preservar seu funcionamento. Jardins de chuva podem contribuir para reter e infiltrar parte do escoamento, desde que haja espaço e projeto compatíveis com o local. Reservatórios de detenção e retenção exigem dimensionamento, disponibilidade de área e procedimentos de operação. Essas condições impedem tratar qualquer técnica como solução universal. A rede convencional, por sua vez, requer dimensionamento hidráulico, limpeza e conservação de dispositivos de captação e condução. Assim, tanto soluções tradicionais quanto compensatórias possuem necessidades de manutenção e restrições de implantação. A escolha deve considerar as características físicas e urbanas da área, não apenas a preferência por uma tecnologia.

4.3 Discussão e integração dos sistemas

A comparação indica que as duas abordagens podem desempenhar funções complementares. Uma estratégia integrada pode associar estruturas de captação e condução a dispositivos que favoreçam infiltração, retenção ou atraso do escoamento. Essa interpretação é compatível com a discussão de Tucci (2008) sobre manejo das águas urbanas e com o repertório de técnicas descrito por Baptista, Nascimento e Barraud (2015). A Norma de Referência ANA nº 12/2025, citada no referencial teórico, contribui para situar a drenagem no contexto da estruturação dos serviços públicos de manejo das águas pluviais. Contudo, a norma não substitui os estudos hidráulicos necessários para definir o desempenho de uma intervenção específica. As fontes analisadas não forneceram base homogênea de valores, locais, parâmetros de chuva e condições de projeto que permitisse uma comparação quantitativa válida. Por isso, não se conclui que uma alternativa seja sempre mais econômica ou eficiente.

A dimensão econômica exige cautela. O conjunto analisado reúne fontes com escopos diferentes, incluindo manual institucional, estudo específico de pavimento sob chuva natural, avaliação de infiltração e transporte de finos, modelagem computacional e seleção multicritério. Por essa razão, não foi possível comparar custos de implantação, manutenção ou ciclo de vida entre as alternativas. Nos sistemas convencionais, a manutenção envolve a limpeza e a conservação dos dispositivos de captação e condução. Nas técnicas compensatórias, a manutenção e a viabilidade dependem das condições do solo, da área disponível, do controle de finos, do projeto e da operação. O estudo de Furtado et al. (2021)

avalia um modelo específico de pavimento de concreto permeável sob chuva natural, mas não fornece base para atribuir custo ou desempenho geral a todos os pavimentos. Lucas et al. (2015) evidenciam a relevância da capacidade de infiltração, do transporte de finos e da permeabilidade da manta geotêxtil para a construção e a operação de técnicas compensatórias. Vasconcelos, Miguez e Vazquez (2016) mostram, por meio de modelagem computacional aplicada a um estudo de caso, que a combinação e a escala dos dispositivos influenciam os benefícios esperados. Assim, custos, manutenção e limitações devem ser avaliados localmente, sem ranking universal entre as soluções.

Em termos de decisão, a literatura sustenta um roteiro prudente: diagnosticar se o objetivo principal é conduzir, infiltrar, armazenar ou retardar o escoamento; verificar as condições físicas e urbanas do local; definir responsabilidades de operação e manutenção; e somente então comparar alternativas e custos do ciclo de vida. No presente artigo, esse roteiro é apresentado como critério de planejamento, não como dimensionamento executivo. A ausência de medições e simulações impede afirmar qual combinação produziria determinado desempenho em uma área concreta.

4.4 Proposta de roteiro técnico de avaliação

A partir das categorias examinadas, a revisão organizou um roteiro conceitual de avaliação composto por diagnóstico, triagem de restrições, seleção preliminar, verificação de operação e comparação de alternativas. O diagnóstico identifica a função que a intervenção deve cumprir e sua relação com a rede e a bacia. A triagem verifica espaço disponível, características do solo, possíveis interferências e condições de descarga. A seleção preliminar relaciona esses dados às funções de condução, infiltração, armazenamento e retardamento. O roteiro sintetiza a literatura revisada e não representa protocolo validado empiricamente neste estudo.

Na etapa de operação, a análise deve estabelecer quais elementos exigirão inspeção, limpeza, controle de sedimentos ou conservação de vegetação. A responsabilidade pela manutenção precisa ser definida conforme o arranjo institucional e a localização da intervenção. A avaliação econômica, quando possível, deve usar premissas homogêneas e abranger implantação e operação. Como o corpus analisado não reúne orçamentos comparáveis, esta pesquisa limita-se a indicar essas dimensões como informações necessárias para a decisão.

Por fim, a alternativa escolhida deve ser submetida aos estudos de projeto pertinentes, inclusive dimensionamento hidráulico e investigação das condições do terreno quando

necessários. O roteiro não substitui normas aplicáveis, licenciamento, verificação de segurança ou responsabilidade técnica. Seu valor está em evitar decisões simplificadas, nas quais uma técnica é adotada apenas por ser classificada como sustentável ou por parecer inicialmente mais econômica.

Essa proposta também evidencia a complementaridade entre abordagens. Em uma mesma área, parte do escoamento pode ser captada e conduzida, enquanto outra parcela é temporariamente armazenada ou infiltrada, conforme as condições verificadas. O desenho final dessa integração depende de dados que não foram levantados nesta pesquisa. A contribuição acadêmica é explicitar uma sequência lógica de perguntas que antecede o dimensionamento e a implantação.

4.5 Síntese dos achados e limitações

A análise bibliográfica e documental sustenta três constatações: os sistemas convencionais permanecem relevantes para a condução das águas pluviais; as técnicas compensatórias ampliam as possibilidades de controle na fonte; e a integração depende das condições locais e de critérios de projeto e manutenção. Como limitação, o estudo não produziu resultados empíricos padronizados, pois não incluiu medições de campo ou simulações hidráulicas. Assim, as conclusões devem ser interpretadas como uma síntese qualitativa da literatura selecionada.

A contribuição do artigo para a Engenharia Civil é organizar, em uma síntese comparativa, as funções e os condicionantes que devem ser considerados antes da escolha de soluções de drenagem urbana. O trabalho não substitui projeto executivo, dimensionamento hidráulico ou investigação geotécnica. Sua contribuição está em explicitar que a decisão técnica deve articular escala da rede, controle na fonte, condições do solo, disponibilidade de área e responsabilidades de manutenção, evitando a adoção de uma tecnologia sem compatibilidade com o local.

5 Conclusão

Este trabalho comparou os sistemas convencionais de drenagem urbana com as técnicas compensatórias sustentáveis, considerando suas características de funcionamento, controle do escoamento superficial, possibilidades de aplicação e limitações técnicas.

A análise bibliográfica e documental indica que os sistemas convencionais desempenham papel importante na captação e condução das águas pluviais. Entretanto, a

crescente impermeabilização das áreas urbanas pode aumentar a sobrecarga dessas estruturas, especialmente durante chuvas intensas.

As técnicas compensatórias, como pavimentos permeáveis, jardins de chuva, trincheiras de infiltração e reservatórios de detenção e retenção, apresentam possibilidades de atuação sobre o escoamento superficial por meio da infiltração, do armazenamento e do retardamento da água da chuva.

Dessa forma, conclui-se que as duas abordagens não devem ser consideradas necessariamente concorrentes. A integração entre sistemas convencionais e técnicas compensatórias constitui uma alternativa relevante para o planejamento da drenagem urbana, desde que sejam avaliadas as características do solo, as condições locais, os custos e as necessidades de manutenção.

Como limitação, destaca-se que a pesquisa foi desenvolvida por meio de levantamento bibliográfico e documental, sem medições de campo ou simulações hidráulicas. Portanto, não é possível estabelecer valores específicos de desempenho ou comprovar a eficiência dessas soluções em determinada localidade.

Recomenda-se que pesquisas futuras realizem estudos de caso, levantamentos de campo e análises hidráulicas para avaliar a viabilidade técnica e econômica das soluções em diferentes contextos urbanos.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro Universitário UNA pela oportunidade de desenvolvimento acadêmico e à professora orientadora Janaina Martins Gouveia pelas orientações e contribuições durante a elaboração deste trabalho. Agradecem também aos professores do curso de Engenharia Civil, pelo conhecimento compartilhado ao longo da formação, e aos familiares, pelo incentivo e apoio durante essa trajetória.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). *Manual orientativo sobre a Norma de Referência ANA nº 12/2025: estruturação dos serviços públicos de drenagem e manejo das águas pluviais urbanas*. Brasília, DF: ANA, 2025a. ISBN 978-65-88101-89-6. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/saneamento-basico/Normativos-publicados-pela-ANA/manual-dmapu_ana_converted-v4-indd.pdf. Acesso em: 25 out. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). Resolução ANA nº 245, de 17 de março de 2025: aprova a Norma de Referência nº 12/2025, que dispõe sobre a estruturação dos serviços públicos de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas. Brasília, DF: ANA, 2025b. Publicada no Diário Oficial da União: seção 1, n. 52, p. 75-78, 18 mar. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/legislacao/resolucoes/resolucoes-regulatorias/2025/245. Acesso em: 25 out. 2026.

BAPTISTA, Márcio Benedito; NASCIMENTO, Nilo de Oliveira; BARRAUD, Sylvie. *Técnicas compensatórias em drenagem urbana*. 2. ed. rev. Porto Alegre: ABRH, 2015. 318 p. ISBN 9788588686311.

FURTADO, Leonardo; MOTA, Aline de Almeida; GRISON, Fernando; MENEGOTTO, Mauro Leandro. Eficiência de drenagem de um modelo de pavimento de concreto permeável sob chuva natural. *Revista de Engenharia Civil IMED*, Passo Fundo, v. 8, n. 1, p. 128-144, jan./jun. 2021. DOI: 10.18256/2358-6508.2021.v8i1.4153.

LUCAS, Alessandro Hirata; SOBRINHA, Loide Angelina; MORUZZI, Rodrigo Braga; BARBASSA, Ademir Paceli. Avaliação da construção e operação de técnicas compensatórias de drenagem urbana: o transporte de finos, a capacidade de infiltração, a taxa de infiltração real do solo e a permeabilidade da manta geotêxtil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 20, n. 1, p. 17-28, 2015. DOI: 10.1590/S1413-41522015020000079923.

MACEDO, Marina Batalini de; RODRIGUES, Ana Júlia. Análise multicritério para seleção de técnicas compensatórias de drenagem urbana e recomendação de sua distribuição espacial para a cidade de Itajubá – MG. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, [S. l.], v. 12, n. 87, 2024. DOI: 10.17271/23188472128720245265.

TUCCI, Carlos E. M. Águas urbanas. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008. DOI: 10.1590/S0103-40142008000200007.

TUCCI, Carlos E. M. *Gestão da drenagem urbana*. Brasília, DF: CEPAL. Escritório no Brasil/IPEA, 2012. (Textos para Discussão CEPAL-IPEA, 48). 50 p. Disponível em: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/38004/1/LCBRSR274_pt.pdf. Acesso em: 25 out. 2026.

VASCONCELOS, Anaí Floriano; MIGUEZ, Marcelo Gomes; VAZQUEZ, Elaine Garrido. Critérios de projeto e benefícios esperados da implantação de técnicas compensatórias em drenagem urbana para controle de escoamentos na fonte, com base em modelagem computacional aplicada a um estudo de caso na zona oeste do Rio de Janeiro. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 21, n. 4, p. 655-662, 2016. DOI: 10.1590/S1413-41522016146469.