

INFRAESTRUTURAS VERDES E PLANEJAMENTO URBANO REGENERATIVO: ESTRATÉGIAS DE ENGENHARIA CIVIL PARA MITIGAÇÃO CLIMÁTICA E RESILIÊNCIA DAS CIDADES CONTEMPORÂNEAS

**GREEN INFRASTRUCTURE AND REGENERATIVE URBAN PLANNING: CIVIL
ENGINEERING STRATEGIES FOR CLIMATE MITIGATION AND RESILIENT
CONTEMPORARY CITIES**

Engenharias, Ciências Sociais Aplicadas • 13/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/789159130](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/789159130)

Maria Nattally de Carvalho Rocha¹

RESUMO

A intensificação das mudanças climáticas, da urbanização, da impermeabilização do solo e da exposição das cidades a eventos hidrometeorológicos extremos tem ampliado a necessidade de revisar modelos convencionais de planejamento urbano e infraestrutura civil. Nesse contexto, as infraestruturas verdes e azul-verdes têm sido apresentadas como estratégias capazes de complementar sistemas convencionais de drenagem, reduzir temperaturas urbanas, aumentar a infiltração e retenção de águas pluviais, recuperar funções ecossistêmicas e produzir benefícios associados à biodiversidade, à qualidade ambiental e ao bem-estar urbano. Este artigo analisa as contribuições das infraestruturas verdes para um paradigma de planejamento urbano regenerativo, enfatizando sua integração à engenharia civil e sua capacidade de fortalecer adaptação, mitigação climática e resiliência. Metodologicamente, desenvolveu-se uma revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa, fundamentada em revisões sistemáticas, metanálises e estudos recentes sobre soluções baseadas na natureza, drenagem urbana sustentável, infraestrutura verde e azul, arborização urbana, coberturas vegetadas, pavimentos permeáveis, controle de escoamento superficial e regeneração de espaços urbanos. As evidências indicam que tais intervenções podem reduzir exposição ao calor e aos alagamentos, embora sua efetividade varie segundo clima, morfologia urbana, características dos solos, densidade e tipo de vegetação, intensidade das chuvas, manutenção e escala espacial. Revisões recentes também demonstram que abordagens híbridas, combinando infraestrutura ecológica e infraestrutura cinza, tendem a ser particularmente relevantes em áreas urbanas consolidadas, onde restrições de espaço e elevados níveis de impermeabilização impedem soluções exclusivamente naturais. Observa-se, contudo, heterogeneidade

metodológica na avaliação de desempenho, lacunas de monitoramento pós-implantação e desigualdade geográfica da produção científica, com sub-representação de diversas cidades tropicais e do Sul Global. Conclui-se que um planejamento urbano regenerativo exige superar a concepção das infraestruturas verdes como elementos ornamentais ou compensatórios e incorporá-las ao dimensionamento, financiamento, manutenção e gestão dos sistemas urbanos, articulando engenharia civil, planejamento territorial, ecologia, governança e justiça climática.

Palavras-chave: Infraestrutura verde; planejamento urbano regenerativo; engenharia civil; resiliência climática; soluções baseadas na natureza; drenagem urbana sustentável.

ABSTRACT

The intensification of climate change, urbanization, soil sealing and exposure of cities to hydrometeorological extremes has increased the need to reconsider conventional approaches to urban planning and civil infrastructure. Green and blue-green infrastructures have emerged as strategies capable of complementing conventional drainage systems, reducing urban temperatures, increasing stormwater infiltration and retention, restoring ecosystem functions and generating co-benefits related to biodiversity, environmental quality and urban well-being. This article analyzes the contribution of green infrastructure to regenerative urban planning, emphasizing its integration with civil engineering and its potential for climate adaptation, mitigation and urban resilience. Methodologically, a qualitative systematized review with narrative synthesis was conducted, drawing on systematic reviews, meta-analyses and recent studies on nature-based solutions, sustainable urban drainage, green and blue infrastructure, urban trees, green roofs, permeable pavements, runoff control and urban regeneration.

Evidence indicates that these interventions can reduce exposure to heat and flooding, although their effectiveness varies according to climate, urban morphology, soil conditions, vegetation type and density, rainfall intensity, maintenance and spatial scale. Recent reviews also show that hybrid approaches combining ecological and grey infrastructure are particularly relevant in consolidated urban areas where space constraints and extensive impervious surfaces limit exclusively nature-based interventions. Methodological heterogeneity in performance assessment, insufficient post-implementation monitoring and geographic imbalances in the available evidence remain important limitations, especially for tropical cities and the Global South. Regenerative urban planning therefore requires moving beyond the treatment of green infrastructure as ornamental or compensatory elements and incorporating it into the design, financing, operation and maintenance of urban systems through the integration of civil engineering, territorial planning, ecology, governance and climate justice.

Keywords: Green infrastructure; regenerative urban planning; civil engineering; climate resilience; nature-based solutions; sustainable urban drainage.

1. INTRODUÇÃO

A urbanização contemporânea concentra população, edificações, infraestrutura, atividades econômicas e consumo de energia em territórios crescentemente expostos aos efeitos das mudanças climáticas, fazendo com que as cidades ocupem posição simultaneamente estratégica e vulnerável na transição para padrões de desenvolvimento mais resilientes. A ampliação de áreas impermeabilizadas, a canalização de cursos d'água, a redução da

cobertura vegetal, a ocupação de planícies de inundação e a substituição de superfícies naturais por materiais capazes de armazenar grandes quantidades de calor alteram processos hidrológicos e microclimáticos que historicamente contribuíam para regular temperatura, infiltração, evapotranspiração e escoamento. O resultado é um ambiente construído no qual eventos de chuva intensa, ondas de calor e períodos de estiagem interagem com fragilidades previamente produzidas pelo próprio modelo de urbanização, elevando a exposição de populações, edificações e redes de infraestrutura. O sexto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas destaca que o planejamento, o desenho e a manutenção das cidades e de suas infraestruturas influenciam diretamente os padrões de exposição e vulnerabilidade e sustenta que a integração entre infraestrutura social, ecológica e física pode ampliar significativamente a capacidade adaptativa dos assentamentos urbanos (IPCC, 2022).

Durante grande parte do processo de urbanização industrial, os problemas relacionados à água, à temperatura e à estabilidade física das cidades foram enfrentados prioritariamente mediante infraestruturas cinzas construídas segundo uma lógica de controle e rápida condução. Sistemas de drenagem foram projetados para captar a precipitação e removê-la o mais rapidamente possível; rios e córregos foram retificados, canalizados ou enterrados; áreas úmidas foram aterradas; superfícies urbanas foram progressivamente impermeabilizadas; e a vegetação passou frequentemente a ser considerada componente paisagístico separado das infraestruturas essenciais. Esses sistemas desempenharam e continuarão desempenhando funções importantes, especialmente em contextos de risco elevado e elevada densidade urbana, mas seus limites tornaram-se mais evidentes diante da intensificação dos extremos

climáticos e da dificuldade de expandir indefinidamente redes subterrâneas, canais, reservatórios e estruturas de defesa. A abordagem contemporânea não consiste, portanto, em substituir indiscriminadamente toda infraestrutura convencional por componentes verdes, mas em recuperar processos naturais capazes de complementar a engenharia tradicional, reduzindo cargas sobre sistemas existentes, criando redundância, distribuindo funções e produzindo benefícios adicionais que uma infraestrutura monofuncional dificilmente proporcionaria.

É nesse contexto que se difundem conceitos como infraestrutura verde, infraestrutura azul-verde, soluções baseadas na natureza, desenvolvimento de baixo impacto, sistemas de drenagem urbana sustentável e cidades-esponja. Embora essas expressões tenham origens institucionais e técnicas distintas, compartilham uma premissa fundamental: processos ecológicos e hidrológicos podem ser deliberadamente incorporados ao planejamento e ao projeto urbano como componentes de infraestrutura. A revisão sistemática de Aghaloo *et al.* (2024), baseada em ampla produção empírica sobre soluções baseadas na natureza e adaptação climática urbana, identificou os Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável como abordagem predominante nas pesquisas relacionadas à gestão de águas pluviais, seguidos por Desenvolvimento de Baixo Impacto, infraestrutura verde, cidades-esponja e infraestrutura azul-verde. O trabalho também destaca a relevância de coberturas verdes como intervenções multifuncionais, capazes de participar simultaneamente da regulação hídrica e climática. Esses resultados são particularmente importantes para a engenharia civil porque demonstram que a literatura contemporânea deixou de tratar vegetação, água e solo como elementos exteriores à infraestrutura e passou a considerá-los componentes de sistemas técnicos

destinados à gestão de riscos e serviços urbanos (Aghaloo *et al.*, 2024).

A infraestrutura verde pode ser entendida, nesse sentido, como uma rede planejada de áreas naturais, seminaturais e tecnologicamente vegetadas capaz de fornecer serviços ecossistêmicos e desempenhar funções urbanas. Parques, corredores ecológicos, florestas urbanas, arborização viária, jardins de chuva, biovaletas, áreas de biorretenção, telhados verdes, paredes vegetadas, pavimentos permeáveis associados a sistemas de infiltração, wetlands construídos, lagoas de retenção naturalizadas e recuperação de margens fluviais podem integrar essa rede. Nem todas essas intervenções possuem as mesmas funções ou os mesmos níveis de desempenho, e sua eficácia depende da forma pela qual são dimensionadas e conectadas ao sistema urbano. Um pequeno jardim de chuva pode atuar no controle de escoamento de uma parcela ou trecho viário; um parque inundável pode receber volumes consideravelmente maiores; uma floresta urbana produz funções climáticas e ecológicas em escalas distintas; e um sistema de corredores azul-verdes pode reorganizar o comportamento hidrológico de uma bacia urbana. O planejamento precisa, portanto, superar uma visão baseada na soma de objetos isolados e adotar uma lógica de rede multiescalar, na qual diferentes componentes desempenham funções complementares.

Essa lógica aproxima as infraestruturas verdes do conceito de planejamento urbano regenerativo adotado no presente estudo. O termo regenerativo é utilizado aqui para designar uma abordagem que ultrapassa a intenção de apenas reduzir danos produzidos pelo ambiente construído e procura restaurar ou recriar funções ambientais, hidrológicas e ecológicas previamente degradadas pela

urbanização. Uma intervenção sustentável pode buscar reduzir determinado impacto em relação a um padrão convencional; uma abordagem regenerativa procura, adicionalmente, melhorar as condições do sistema no qual a intervenção é inserida, por exemplo recuperando infiltração, conectividade ecológica, qualidade do solo, capacidade de armazenamento hídrico, biodiversidade e conforto térmico. Essa distinção não deve ser transformada em dicotomia absoluta, pois muitas estratégias classificadas como sustentáveis também podem possuir resultados regenerativos, mas ela é útil para indicar uma mudança de ambição: a cidade deixa de ser considerada inevitavelmente oposta aos processos ecológicos e passa a ser concebida como território no qual infraestrutura e ecossistemas podem ser parcialmente reconciliados.

Na engenharia civil, essa mudança implica rever tanto critérios de projeto quanto as fronteiras tradicionais entre disciplinas. O dimensionamento hidráulico de um sistema urbano, por exemplo, pode considerar não apenas tubulações e galerias, mas também armazenamento distribuído, infiltração, retenção, evapotranspiração e atraso do pico de vazão proporcionados por soluções de superfície. A eficiência energética das edificações pode ser analisada em conjunto com arborização, sombreamento e coberturas vegetadas; a estabilidade e o desenho de taludes podem ser relacionados à revegetação e ao controle erosivo; o projeto viário pode integrar canteiros de biorretenção e pavimentos permeáveis; e sistemas de proteção costeira e fluvial podem combinar estruturas convencionais a zonas úmidas, parques inundáveis e margens restauradas. O IPCC considera precisamente essa combinação entre infraestrutura ecológica e cinza como um dos caminhos mais promissores para adaptação urbana, ressaltando que abordagens híbridas podem oferecer proteção contra inundações e calor ao

mesmo tempo em que preservam funções ambientais e benefícios sociais (IPCC, 2022).

A mitigação térmica constitui uma das áreas em que a base científica sobre infraestrutura verde se tornou mais robusta. Vegetação reduz carga térmica principalmente por sombreamento e evapotranspiração, embora intensidade e alcance do resfriamento dependam da estrutura da vegetação, disponibilidade hídrica, clima regional e morfologia urbana. A revisão sistemática de Soltanifard e Amani-Beni (2025), baseada em estudos publicados entre 2014 e 2024, identificou redução térmica associada aos espaços verdes urbanos, mas mostrou grande variação em função da densidade de vegetação, configuração espacial e características urbanas. De modo semelhante, Galalizadeh *et al.* (2024) demonstram que a literatura utiliza metodologias muito distintas para estimar resfriamento, incluindo medições de campo, sensoriamento remoto e modelagem, o que dificulta comparar diretamente valores obtidos por estudos que medem temperatura de superfície com aqueles que avaliam temperatura do ar ou conforto térmico ao nível do pedestre. Essa distinção é essencial para a engenharia, pois uma redução expressiva da temperatura de superfície registrada por satélite não significa necessariamente redução equivalente da exposição térmica experimentada por uma pessoa em determinada rua (Soltanifard; Amani-Beni, 2025; Galalizadeh *et al.*, 2024).

O papel da arborização confirma a dependência do contexto. A revisão sistemática de Hu e Li (2024) demonstra que os benefícios de resfriamento das copas dependem de fatores relacionados às árvores, à vegetação circundante e ao ambiente urbano, enquanto Li *et al.* (2024), em análise global de 182 estudos distribuídos por diferentes climas, mostram que a eficácia térmica varia de maneira

substancial conforme características das espécies, morfologia urbana e condições climáticas. Isso significa que metas genéricas de “aumentar o número de árvores” precisam ser substituídas por estratégias tecnicamente mais qualificadas de cobertura de copa, escolha de espécies, posição em relação às edificações, disponibilidade de solo, irrigação quando necessária, compatibilidade com redes urbanas e manutenção de longo prazo. Alonzo, Ibsen e Locke (2025), em revisão de 115 estudos, reforçam ainda que árvores tendem a apresentar desempenho térmico superior ao de vegetações mais baixas, especialmente pelo sombreamento, mas chamam atenção para a sub-representação de climas tropicais e áridos na literatura, um problema importante para cidades brasileiras, cujas condições não devem ser avaliadas apenas pela transferência automática de resultados produzidos em cidades temperadas.

Na gestão hídrica, os argumentos para infraestrutura verde são igualmente relevantes. A impermeabilização aumenta volume e velocidade do escoamento superficial, reduz infiltração e pode elevar picos de vazão em redes e cursos d’água. Jardins de chuva, valas vegetadas, pavimentos permeáveis, telhados verdes, áreas de retenção, wetlands e outras intervenções procuram intervir em diferentes estágios do processo, armazenando temporariamente água, facilitando infiltração, promovendo evapotranspiração e retardando sua transferência para os sistemas convencionais. A revisão de Aghaloo *et al.* (2024) mostra que a gestão de águas pluviais é justamente uma das áreas mais consolidadas das soluções baseadas na natureza em cidades, enquanto a metanálise de Ferrario *et al.* (2024) identificou efeitos globalmente favoráveis das soluções baseadas na natureza sobre redução de temperatura e proteção contra inundações, embora os autores tenham enfatizado

que a comparação de efeitos médios permanece limitada pela heterogeneidade das metodologias e pela necessidade de protocolos mais padronizados de avaliação. Essa ressalva é fundamental: a eficácia de uma solução não pode ser presumida apenas por pertencer à categoria “verde”, devendo ser dimensionada segundo regime de chuvas, propriedades do solo, área contribuinte, risco de colmatção, nível freático, manutenção e objetivo de desempenho (Ferrario *et al.*, 2024).

O planejamento urbano regenerativo também exige considerar o ciclo de vida dos projetos. Uma área de biorretenção pode apresentar excelente desempenho de projeto e perder capacidade se sedimentos obstruírem camadas infiltrantes; pavimentos permeáveis podem sofrer colmatção; árvores podem morrer por ausência de volume de solo suficiente; telhados verdes dependem da integridade das camadas de impermeabilização, drenagem e substrato; áreas úmidas urbanas precisam de manejo e controle da qualidade da água. Por isso, uma das mudanças mais importantes para a engenharia é abandonar a ideia de que soluções verdes exigiriam necessariamente menos conhecimento técnico ou operação. Elas frequentemente substituem parte da infraestrutura rígida por sistemas vivos e dinâmicos, o que torna a manutenção diferente, não inexistente. Estudos recentes sobre soluções baseadas na natureza apontam justamente a necessidade de incorporar disponibilidade de recursos, capacidade institucional, monitoramento, participação de atores e características específicas dos contextos como condições para o desempenho de longo prazo (Mosisa *et al.*, 2025).

O caráter regenerativo torna-se ainda mais evidente nas margens fluviais e frentes d'água. Em áreas urbanas consolidadas, rios foram

frequentemente retificados, canalizados e separados de suas planícies. A reversão integral dessas modificações pode ser inviável, mas projetos contemporâneos combinam recuos, parques inundáveis, restauração de margens, zonas vegetadas e estruturas convencionais de defesa. Marzio et al. (2026), em revisão sistemática sobre regeneração de frentes d'água, identificaram predominância de abordagens híbridas verde-cinza em contextos urbanizados e destacaram três orientações recorrentes: adaptação de bordas existentes, restauração ecológica sistêmica e ampliação da permeabilidade por meio de sistemas sensíveis à água. A mesma revisão identifica lacunas importantes de monitoramento pós-implantação e avaliação de longo prazo, demonstrando que a literatura ainda documenta mais frequentemente conceitos e projetos do que sua performance durante décadas.

A integração entre adaptação e mitigação também precisa ser conceitualmente esclarecida. Infraestruturas verdes oferecem contribuições diretas à adaptação ao reduzir calor, controlar escoamento e ampliar resiliência hídrica, enquanto seus efeitos de mitigação podem ocorrer por armazenamento de carbono em biomassa e solo, redução de demanda energética para resfriamento de edificações e substituição de determinados sistemas mais intensivos em energia ou materiais. Entretanto, sua capacidade de mitigação não deve ser exagerada. Arborização urbana e telhados verdes não substituem descarbonização de energia, transporte, edificações e indústria. Sua contribuição é complementar e pode ser especialmente relevante quando os mesmos investimentos produzem simultaneamente adaptação, mitigação e melhoria da qualidade ambiental. O conceito de desenvolvimento resiliente ao clima utilizado pelo IPCC é útil justamente porque conecta adaptação, mitigação e desenvolvimento sustentável, evitando que

essas agendas sejam tratadas como domínios completamente independentes (IPCC, 2022).

Outro aspecto decisivo é a distribuição social dos benefícios. Cidades podem aumentar áreas verdes e ainda manter desigualdades territoriais quando novos parques e corredores concentram-se em regiões valorizadas, enquanto periferias permanecem expostas a calor, enchentes e baixa cobertura vegetal. A infraestrutura verde precisa, portanto, ser planejada segundo vulnerabilidade e risco, e não apenas segundo disponibilidade fundiária ou potencial de valorização imobiliária. Projetos de regeneração podem inclusive desencadear processos de valorização e deslocamento da população de baixa renda, fenômeno frequentemente discutido como gentrificação verde. Embora a engenharia civil não possa resolver isoladamente esses processos, seus projetos participam da transformação territorial e precisam dialogar com planejamento urbano, habitação e políticas de proteção social. Um parque inundável que reduz risco e melhora o espaço público é mais consistente com a justiça climática quando os moradores vulneráveis conseguem permanecer no território e usufruir dos benefícios produzidos.

Diante desse panorama, este artigo procura responder à seguinte questão: **de que modo as infraestruturas verdes, quando integradas à engenharia civil e ao planejamento urbano regenerativo, podem contribuir para a mitigação dos efeitos climáticos, a adaptação a extremos hidrometeorológicos e a construção de cidades mais resilientes, e quais condições técnicas, territoriais e institucionais determinam sua eficácia?** O objetivo geral consiste em analisar criticamente a literatura recente sobre infraestrutura verde e soluções baseadas na natureza

aplicadas aos sistemas urbanos. Especificamente, busca-se discutir os fundamentos do planejamento regenerativo, avaliar evidências sobre mitigação térmica e drenagem, examinar coberturas verdes, arborização, pavimentos permeáveis e sistemas azul-verdes, analisar a integração verde-cinza, discutir critérios de projeto e manutenção, avaliar limitações metodológicas da literatura e propor princípios para incorporar essas soluções de forma mais consistente aos instrumentos de planejamento e às práticas da engenharia civil.

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi estruturado como **revisão sistematizada qualitativa da literatura com síntese narrativa**, metodologia selecionada em razão da diversidade das intervenções, escalas, métodos de avaliação e desfechos investigados no campo das infraestruturas verdes urbanas. A literatura disponível inclui revisões sistemáticas sobre arborização e resfriamento urbano, coberturas verdes, gestão de águas pluviais e soluções baseadas na natureza; metanálises de efeitos térmicos e hidrológicos; estudos de modelagem microclimática; análises de sensoriamento remoto; experimentos de campo; simulações hidráulicas e energéticas; além de pesquisas sobre governança, implementação e regeneração de frentes d'água. Diante dessa heterogeneidade, a realização de uma nova metanálise conjunta seria metodologicamente inadequada, uma vez que reduções de temperatura de superfície, temperatura do ar, vazão de pico, volume escoado, energia consumida, armazenamento de carbono e indicadores de biodiversidade não representam um único desfecho comparável.

A busca bibliográfica foi atualizada até agosto de 2026 e orientada por combinações de descritores como “green infrastructure”, “urban

green infrastructure”, “blue-green infrastructure”, “nature-based solutions”, “urban climate resilience”, “urban flood resilience”, “sustainable urban drainage systems”, “low impact development”, “green roofs”, “permeable pavements”, “urban trees”, “urban cooling”, “regenerative urban planning”, “water-sensitive urban design” e “climate resilient cities”. Foram priorizados estudos publicados entre 2020 e 2026, preservando-se trabalhos anteriores quando necessários para fundamentação conceitual ou quando incluídos nas revisões sistemáticas mais recentes. A busca concentrou-se em periódicos especializados em clima urbano, planejamento, engenharia ambiental, infraestrutura, ecologia urbana e resiliência, sendo complementada por documentos de avaliação científica do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.

Foram considerados elegíveis estudos que examinassem a infraestrutura verde ou azul-verde como componente de adaptação urbana, mitigação térmica, controle de escoamento, regeneração ambiental, desempenho de edificações ou resiliência climática. Também foram incluídas pesquisas sobre soluções híbridas verde-cinza e trabalhos que analisassem fatores de implementação, manutenção ou governança quando diretamente relacionados ao desempenho das intervenções. Estudos estritamente paisagísticos sem relação com funções climáticas, hidrológicas, ecológicas ou infraestruturais foram utilizados apenas quando forneciam conceitos necessários à análise territorial.

A síntese priorizou revisões sistemáticas e metanálises recentes por sua capacidade de reunir conjuntos amplos de evidências. Aghaloo *et al.* (2024), por exemplo, analisaram 582 estudos empíricos relacionados a soluções baseadas na natureza e adaptação a

enchentes e clima, enquanto Ferrario *et al.* (2024) desenvolveram metanálise especificamente voltada aos efeitos sobre calor e inundação. Galalizadeh *et al.* (2024) examinaram metodologias utilizadas para estimar resfriamento urbano; Salih e Nagy (2024) revisaram cinquenta trabalhos na etapa final de análise sobre infraestrutura verde e resiliência térmica; Soltanifard e Amani-Beni (2025) sintetizaram 84 estudos sobre espaços verdes e resfriamento; Alonzo, Ibsen e Locke (2025) mapearam 115 trabalhos sobre arborização; e Aleksejeva, Voulgaris e Gasparatos (2024) revisaram centenas de publicações sobre benefícios climáticos e não climáticos de coberturas verdes.

A análise foi organizada em cinco dimensões: **regulação microclimática**, envolvendo sombreamento, evapotranspiração e desempenho energético; **gestão hidrológica**, abrangendo infiltração, retenção, detenção, evaporação e controle de pico; **regeneração ecológica**, incluindo conectividade, solo, vegetação e recuperação de corpos hídricos; **integração com infraestrutura cinza**, voltada aos sistemas híbridos e à redundância; e **governança e ciclo de vida**, incluindo planejamento, financiamento, manutenção, equidade e monitoramento. Essa organização permite compreender a infraestrutura verde não como uma categoria homogênea de intervenção, mas como conjunto de soluções cujo desempenho depende da função, da escala e do contexto.

A interpretação das evidências diferenciou **eficiência observada**, **desempenho modelado** e **benefício potencial**. Resultados produzidos por modelagem foram tratados como estimativas dependentes das hipóteses do modelo, enquanto medições de campo foram analisadas segundo sua escala e desenho. Da mesma forma, temperatura de superfície e temperatura do ar foram

mantidas como indicadores distintos. Essa precaução decorre diretamente da revisão de Galalizadeh *et al.* (2024), que demonstra como a metodologia utilizada para medir o resfriamento interfere na interpretação do desempenho, e de Ferrario *et al.* (2024), que identificam dificuldades de produzir efeitos médios comparáveis em razão das diferenças de protocolos.

Não foi produzido um fluxograma PRISMA artificial para esta versão do manuscrito. Embora a seleção da literatura tenha seguido critérios explícitos e esteja fundamentada prioritariamente em revisões sistemáticas e metanálises auditáveis, não foi realizada uma exportação bibliográfica integral com deduplicação, dupla triagem e registro individual dos motivos de exclusão de cada trabalho. Assim, preserva-se a denominação metodologicamente mais rigorosa de **revisão sistematizada qualitativa com síntese narrativa**, evitando a criação de números fictícios de registros apenas para conferir aparência de revisão sistemática estrita. Uma futura submissão a periódico que exija PRISMA 2020 poderá reproduzir as estratégias de busca, registrar o protocolo e realizar formalmente as etapas quantitativas de seleção.

3. INFRAESTRUTURA VERDE, ENGENHARIA CIVIL E PLANEJAMENTO REGENERATIVO

A infraestrutura convencional foi historicamente projetada segundo critérios de estabilidade, capacidade, segurança, eficiência hidráulica e durabilidade, enquanto serviços ecossistêmicos foram frequentemente considerados externos ao dimensionamento técnico. O avanço das infraestruturas verdes não elimina esses critérios, mas amplia o conjunto de variáveis relevantes ao projeto. Um jardim de chuva, por exemplo, continua exigindo

dimensionamento hidráulico, verificação de área de contribuição, coeficientes de escoamento, capacidade de armazenamento, taxa de infiltração e dispositivos de extravasamento; uma cobertura verde exige verificação estrutural de cargas permanentes e variáveis, impermeabilização, drenagem e resistência às condições ambientais; e um pavimento permeável precisa atender simultaneamente aos requisitos estruturais do tráfego e aos critérios hidráulicos associados à infiltração e armazenamento. A diferença é que o desempenho deixa de depender apenas de materiais inertes e passa a incorporar solo, vegetação e processos biológicos.

Essa aproximação cria uma oportunidade para a engenharia civil recuperar funções que a própria urbanização eliminou. Em uma bacia natural, parte da chuva intercepta a vegetação, parte evapotranspira, parte infiltra e parte escoar lentamente. A urbanização impermeabilizada transfere parcela muito maior da precipitação para escoamento superficial rápido. Sistemas de drenagem sustentável procuram redistribuir esse balanço, não necessariamente reproduzindo integralmente a condição natural, mas reduzindo a diferença entre o comportamento pré e pós-urbanização. Aghaloo *et al.* (2024) demonstram que esse princípio aparece em diferentes famílias de soluções ao redor do mundo, embora terminologias variem: SUDS, LID, infraestrutura verde, cidades-esponja e infraestrutura azul-verde convergem na utilização de mecanismos distribuídos de armazenamento, infiltração e retenção.

A lógica regenerativa amplia essa proposta ao considerar que o objetivo não deve ser apenas “não piorar” o comportamento hidrológico. Áreas urbanas degradadas podem ser redesenhadas para aumentar progressivamente permeabilidade, recuperar cursos

d'água, criar corredores ecológicos e reduzir exposição. Ruas podem ser convertidas em corredores verdes com biorretenção; estacionamentos podem utilizar pavimentos permeáveis associados a reservatórios granulares; praças podem funcionar como áreas de retenção temporária; fundos de vale podem ser reconfigurados como parques inundáveis; e margens rígidas podem ser parcialmente naturalizadas. O planejamento passa a reconhecer que o mesmo espaço pode cumprir funções de mobilidade, lazer, drenagem, biodiversidade e conforto climático, tornando a multifuncionalidade um critério de eficiência urbana.

Essa multifuncionalidade diferencia parte da infraestrutura verde das soluções cinzas convencionais. Uma galeria de drenagem enterrada realiza essencialmente transporte de água, enquanto um jardim de chuva pode armazenar escoamento, remover determinados poluentes, aumentar evapotranspiração, fornecer vegetação e melhorar o espaço público. Isso não significa que o jardim seja sempre superior; sua capacidade é menor e sua manutenção possui características específicas. A escolha precisa basear-se em desempenho necessário e contexto. Em muitas situações, a solução mais robusta consiste precisamente em combinar ambos os sistemas, reduzindo a carga sobre a rede convencional sem abrir mão de sua capacidade de segurança durante eventos extremos.

A literatura recente sobre frentes d'água urbanas demonstra a importância desses sistemas híbridos. Em áreas densas, a recuperação completa de uma planície de inundação pode ser inviável; muros, diques, galerias e estruturas de proteção continuam necessários. Contudo, integrar wetlands, margens vegetadas e áreas inundáveis pode reduzir energia hidráulica, aumentar

armazenamento e recuperar funções ecológicas. Marzio et al. (2026) identificam justamente a prevalência de soluções híbridas e a necessidade de integrá-las ao planejamento adaptativo, especialmente onde limitações espaciais impedem intervenções exclusivamente baseadas na natureza.

Outro aspecto regenerativo está no tratamento do solo. A infraestrutura verde depende da capacidade física e biológica do substrato, mas solos urbanos frequentemente apresentam compactação, contaminação e baixa infiltração. Projetar áreas verdes sem diagnosticar solo pode produzir desempenho inferior ao esperado. Arborização de ruas é exemplo evidente: árvores plantadas em volumes reduzidos de solo, cercadas por pavimento e submetidas a estresse hídrico dificilmente desenvolverão copas capazes de produzir os serviços projetados. A engenharia precisa, portanto, incorporar volume de solo, drenagem, aeração, proteção radicular e compatibilidade com redes subterrâneas como elementos estruturais do projeto, abandonando práticas nas quais a vegetação é instalada depois que todas as outras infraestruturas já definiram o espaço restante.

4. MITIGAÇÃO DO CALOR URBANO E DESEMPENHO MICROCLIMÁTICO

A ilha de calor urbana resulta de múltiplos processos, incluindo armazenamento de energia em superfícies construídas, redução da evapotranspiração, geometria dos cânions urbanos, emissões antropogênicas de calor e propriedades radiativas dos materiais. Infraestruturas verdes atuam principalmente por sombreamento e evapotranspiração, interferindo na quantidade de radiação absorvida por superfícies e na partição da energia disponível.

Árvores podem reduzir significativamente a radiação incidente sobre calçadas e fachadas, enquanto vegetação rasteira e coberturas verdes alteram temperaturas superficiais e fluxos de calor. Entretanto, a literatura mostra que não existe um valor universal de resfriamento que possa ser aplicado independentemente do contexto, sendo a eficácia influenciada por clima, disponibilidade hídrica, estrutura vegetal e configuração urbana.

Soltanifard e Amani-Beni (2025), ao revisar uma década de literatura sobre espaços verdes urbanos, encontraram reduções de temperatura que variavam amplamente entre estudos e destacaram densidade da vegetação, escolha de espécies e organização espacial como fatores determinantes. O estudo também chama atenção para o desafio de cidades quentes e áridas, nas quais a evapotranspiração pode ser limitada pela disponibilidade hídrica. A consequência prática é que maximizar cobertura vegetal sem considerar balanço hídrico pode produzir conflitos entre resfriamento e conservação da água.

A arborização apresenta particular importância ao nível do pedestre porque o sombreamento reduz a temperatura radiante média, componente fortemente relacionado ao conforto térmico em condições de alta incidência solar. A análise global publicada em *Communications Earth & Environment* demonstra grande variação de eficácia entre diferentes climas e morfologias, mostrando que a configuração adequada depende das condições locais. Alonzo, Ibsen e Locke (2025) também mostram que árvores geralmente oferecem maior capacidade de resfriamento que vegetação de menor porte, mas ressaltam diferenças entre temperatura de superfície e temperatura do ar, além da concentração geográfica dos estudos.

Do ponto de vista do projeto urbano, a cobertura de copa precisa ser distribuída de acordo com os lugares onde a exposição ocorre. Uma cidade pode atingir determinado percentual médio de arborização e manter corredores de pedestres, pontos de ônibus e bairros vulneráveis praticamente sem sombra. A distribuição territorial da copa torna-se, portanto, mais relevante que uma meta agregada isolada. Inventários arbóreos, modelagem de radiação, mapas de vulnerabilidade térmica e dados sobre mobilidade podem ser combinados para priorizar intervenções.

Em escala de edifício, coberturas e paredes verdes podem reduzir aquecimento das superfícies e contribuir para diminuir cargas térmicas, embora o desempenho dependa do sistema construtivo, espessura do substrato, índice de área foliar, irrigação e clima. Salih e Nagy (2024) mostram que modelos de CFD e simulação de desempenho de edificações têm sido amplamente utilizados para avaliar essas interações, ao mesmo tempo em que reconhecem dificuldades de representar adequadamente processos vegetais em modelos. Aleksejeva, Voulgaris e Gasparatos (2024), em revisão de 386 estudos, demonstram a amplitude de benefícios atribuídos às coberturas verdes, mas também identificam forte heterogeneidade de desenho e concentração da literatura em determinadas tipologias.

Uma política de mitigação térmica baseada em infraestrutura verde deve considerar, portanto, diferentes escalas: edifício, rua, bairro e cidade. Telhados verdes atuam diretamente sobre edificações e superfícies superiores; árvores de rua produzem sombra ao nível do pedestre; parques podem formar áreas de resfriamento com efeitos que variam conforme tamanho e configuração; e corredores vegetados podem contribuir para conectividade e ventilação

dependendo da morfologia. A combinação das escalas reduz a dependência de uma única intervenção.

5. DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL E RESILIÊNCIA A INUNDAÇÕES

A gestão das águas pluviais constitui provavelmente o campo em que a integração entre engenharia civil e infraestrutura verde é mais diretamente operacionalizável. Sistemas convencionais foram dimensionados historicamente para transportar escoamento, enquanto intervenções de drenagem sustentável procuram controlar a chuva o mais próximo possível de onde ela incide. Essa mudança reduz a concentração instantânea de vazões e pode retardar ou reduzir picos nas redes a jusante.

Jardins de chuva e áreas de biorretenção utilizam depressões vegetadas preenchidas por camadas capazes de armazenar e filtrar água. Biovaletas desempenham função semelhante ao longo de ruas e estacionamentos, conduzindo e infiltrando escoamento. Pavimentos permeáveis permitem que a precipitação atravesse a superfície e seja temporariamente armazenada na sub-base granular antes de infiltrar ou ser liberada de maneira controlada. Coberturas verdes armazenam parte da precipitação no substrato e na vegetação, liberando-a por evapotranspiração ou escoamento retardado. Wetlands construídos e reservatórios naturalizados oferecem armazenamento em escala maior e podem também melhorar determinadas características da qualidade da água.

A revisão sistemática de Aghaloo *et al.* (2024) demonstra a predominância dessas estratégias nas pesquisas sobre adaptação urbana a inundações, e a metanálise de Ferrario *et al.* (2024)

confirma um efeito globalmente favorável das soluções baseadas na natureza sobre proteção contra inundação. Entretanto, ambos os trabalhos reforçam que os resultados variam significativamente conforme tipo de intervenção e contexto.

Esse ponto é particularmente importante para evitar o uso inadequado do discurso de “cidade-esponja”. Nenhum conjunto de intervenções verdes elimina completamente a possibilidade de inundação em eventos extremos. Projetos precisam trabalhar com níveis de serviço e eventos de projeto, distinguindo controle de chuvas frequentes de proteção contra eventos raros e severos. Infraestrutura verde pode reduzir volumes e picos para parte do espectro de precipitações, enquanto estruturas convencionais, rotas seguras de extravasamento, reservatórios e sistemas de defesa continuam necessários para níveis superiores de risco.

A engenharia híbrida oferece, assim, maior robustez. Um sistema pode ser projetado para que chuvas ordinárias sejam absorvidas predominantemente por soluções distribuídas, reduzindo sobrecarga e poluição difusa, enquanto eventos extraordinários utilizem galerias, canais e reservatórios dimensionados para excedências. Essa abordagem cria redundância e evita exigir que um único elemento resolva todo o problema.

Também é necessário considerar o comportamento das soluções ao longo do tempo. Pavimentos permeáveis podem perder infiltração por colmatagem; jardins de chuva podem acumular sedimentos; vegetação pode morrer; e dispositivos de entrada e extravasamento podem ser obstruídos. O plano de manutenção deve ser tratado como parte do projeto de engenharia, com definição de

responsabilidades, periodicidade, inspeção e indicadores de desempenho.

6. INFRAESTRUTURAS VERDE-CINZA, CICLO DE VIDA E REGENERAÇÃO URBANA

A oposição entre natureza e engenharia é uma das simplificações que mais limitam o potencial das infraestruturas verdes. Cidades consolidadas já possuem redes, edificações e infraestruturas essenciais que não podem ser removidas ou naturalizadas integralmente. O objetivo mais realista e frequentemente mais eficaz consiste em integrar processos ecológicos às estruturas existentes.

Uma rua pode combinar galerias tradicionais a jardins de chuva e árvores; um canal pode receber margens vegetadas em determinados trechos e estruturas rígidas onde a segurança exige; um reservatório pode ser inserido em parque com uso recreativo; uma edificação pode combinar drenagem convencional e cobertura verde. Essa combinação é especialmente relevante em processos de *retrofit* urbano.

O caráter regenerativo aparece quando o projeto aproveita a intervenção infraestrutural para recuperar espaço público e funções ambientais. Uma obra de drenagem não precisa resultar apenas em aumento de diâmetro de galerias; pode ser articulada à criação de corredores verdes e áreas de retenção. A recuperação de uma margem fluvial pode simultaneamente reduzir risco, reconectar habitats e criar espaço público.

A revisão de Marzio et al. (2026) confirma essa tendência de soluções híbridas em frentes d'água urbanas e também evidencia

insuficiência de acompanhamento pós-implantação. O problema é significativo porque avaliações realizadas imediatamente após a obra não demonstram resiliência ao longo de décadas.

A análise de ciclo de vida precisa incluir construção, operação, substituição e benefícios cumulativos. Algumas soluções verdes podem demandar menos materiais intensivos em carbono que grandes estruturas convencionais, mas exigem manutenção recorrente. Comparações precisam considerar período equivalente, desempenho e risco.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A síntese da literatura permite afirmar que as infraestruturas verdes apresentam evidência particularmente consistente em duas funções climáticas urbanas: regulação térmica e gestão de águas pluviais. Metanálises e revisões sistemáticas convergem quanto ao sentido favorável desses efeitos, mas divergem na magnitude justamente porque o termo infraestrutura verde reúne intervenções diferentes e porque os protocolos de avaliação não são padronizados. Essa heterogeneidade não enfraquece a validade da estratégia, mas impede a utilização de números universais de desempenho. Ferrario *et al.* (2024) ressaltam que a formalização das metodologias de medição é necessária para que decisões públicas sejam fundamentadas em comparações mais robustas, enquanto Galalizadeh *et al.* (2024) demonstram que diferentes métodos capturam fenômenos térmicos distintos.

Um segundo resultado é a importância do contexto. Árvores, parques, coberturas verdes e sistemas de infiltração não possuem desempenho independente do clima e da morfologia. O mesmo

conjunto de espécies não deve ser reproduzido em todas as regiões, e soluções de infiltração precisam considerar solos e nível freático. A engenharia baseada em infraestrutura verde requer, portanto, maior sensibilidade territorial, e não menor rigor.

A terceira convergência refere-se à multifuncionalidade. Aghaloo *et al.* (2024) mostram que intervenções relacionadas à drenagem também fornecem benefícios climáticos e ecossistêmicos. Coberturas verdes podem combinar retenção de água e desempenho térmico; árvores oferecem sombra, habitat e benefícios paisagísticos; wetlands podem armazenar água e contribuir para biodiversidade. Essa multifuncionalidade constitui uma das principais justificativas econômicas para sua integração ao planejamento, embora exija avaliações capazes de contabilizar benefícios distribuídos entre diferentes setores.

O quarto resultado é a superioridade conceitual de sistemas híbridos em muitos contextos. O IPCC defende explicitamente a integração entre soluções baseadas na natureza e infraestrutura cinza para enfrentar riscos urbanos. Marzio *et al.* (2026) mostram que abordagens híbridas são predominantes em frentes d'água urbanizadas, justamente onde restrições espaciais e riscos elevados tornam inviável depender exclusivamente de sistemas ecológicos.

O quinto resultado é a necessidade de manutenção e governança. Mosisa *et al.* (2025) concluem que a efetividade das soluções baseadas na natureza depende de planejamento baseado em dados, recursos, instituições, envolvimento dos atores e adequação ao contexto. Isso demonstra que problemas de implementação não são detalhes posteriores ao projeto; fazem parte de sua eficácia.

O sexto resultado refere-se à desigualdade da evidência. Alonzo, Ibsen e Locke (2025) identificam concentração geográfica dos estudos de resfriamento por árvores, com sub-representação de climas tropicais e áridos. Essa lacuna possui forte relevância para o Brasil e outras regiões tropicais, onde disponibilidade hídrica, espécies, regime de chuvas e morfologia urbana podem produzir comportamentos distintos.

A sétima conclusão é que o planejamento regenerativo precisa operar em escala de sistema. Implantar jardins de chuva isolados sem conexão com a bacia urbana reduz o potencial de controle de enchentes; plantar árvores apenas em parques existentes pode deixar corredores de maior exposição térmica sem intervenção. A infraestrutura verde precisa ser planejada em rede e associada a mapas de risco e vulnerabilidade.

A oitava conclusão é que mitigação climática deve ser apresentada com proporcionalidade. Infraestrutura verde pode armazenar carbono e reduzir demanda de resfriamento, mas sua maior contribuição urbana está frequentemente na adaptação e nos co-benefícios. O discurso técnico precisa evitar promessas de neutralização de emissões que não correspondem à escala real desses sistemas.

A nona conclusão está relacionada à justiça climática. A distribuição de áreas verdes precisa responder aos lugares de maior risco térmico e hidrológico. Intervenções que aumentam qualidade ambiental em territórios valorizados, mas não reduzem vulnerabilidade periférica, melhoram indicadores médios sem necessariamente construir resiliência equitativa.

A décima conclusão é a necessidade de integrar métricas técnicas a métricas sociais e ambientais. Um projeto não deve ser avaliado somente pela redução de vazão ou temperatura, mas também por durabilidade, custo, biodiversidade, uso do espaço, acessibilidade, manutenção e distribuição dos benefícios.

8. LIMITAÇÕES DO ESTUDO

A principal limitação desta revisão decorre da amplitude conceitual das infraestruturas verdes e das soluções baseadas na natureza. Diferentes tradições técnicas utilizam termos semelhantes para intervenções que podem apresentar funções e escalas bastante distintas. A tentativa de sintetizar arborização, coberturas verdes, sistemas de drenagem sustentável e regeneração de frentes d'água dentro de uma mesma análise permite compreender complementaridades sistêmicas, mas não substitui estudos específicos de dimensionamento.

A segunda limitação corresponde à heterogeneidade metodológica da literatura. Revisões recentes mostram diferenças entre medições de temperatura de superfície, temperatura do ar e conforto térmico, além de variações de escala e duração. Galalizadeh *et al.* (2024) demonstram explicitamente que essa diversidade interfere na comparação dos resultados.

A terceira limitação está relacionada ao predomínio de simulações e estudos de curto prazo em determinados campos, especialmente coberturas verdes e desempenho térmico. Salih e Nagy (2024) destacam a ampla utilização de CFD e simulação energética, ao mesmo tempo em que apontam desafios para representar interações vegetação-microclima.

A quarta limitação é geográfica. A produção científica permanece concentrada em determinadas regiões e cidades, dificultando extrapolações para climas tropicais, contextos informais e cidades com menores capacidades institucionais.

Por fim, esta revisão não apresenta fluxograma PRISMA próprio com números de identificação e exclusão porque não foi realizada exportação bibliográfica integral e dupla triagem especificamente para o manuscrito. Não foram inventados números. Uma versão posterior poderá transformar a presente síntese em revisão sistemática PRISMA estrita mediante protocolo registrado, busca reproduzível e avaliação formal da qualidade dos estudos.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise realizada demonstra que as infraestruturas verdes deixaram de ocupar posição periférica no debate sobre planejamento urbano e passaram a constituir um componente tecnicamente relevante das estratégias contemporâneas de adaptação climática, gestão de águas pluviais, mitigação térmica e regeneração de sistemas urbanos. O avanço mais importante dessa mudança não consiste simplesmente em plantar mais árvores ou multiplicar pequenas intervenções vegetadas, mas em reconhecer que solo, água, vegetação e processos ecológicos podem desempenhar funções de infraestrutura quando são planejados, dimensionados, conectados e mantidos com o mesmo grau de intencionalidade empregado nos sistemas convencionais. A literatura analisada sustenta de maneira consistente que arborização, espaços verdes, coberturas vegetadas, biorretenção, pavimentos permeáveis, wetlands e outras soluções baseadas na natureza podem reduzir diferentes componentes da vulnerabilidade

urbana, sobretudo relacionados ao calor e ao escoamento superficial, mas também demonstra que esses benefícios variam significativamente conforme clima, morfologia, escala, espécies, solo, manutenção e metodologia de avaliação. Essa variabilidade impede transformar infraestrutura verde em receita universal e reforça precisamente sua natureza técnica: cada solução precisa responder a um diagnóstico específico de risco, disponibilidade espacial, regime hidrológico, características do ambiente construído e objetivos de desempenho. O planejamento regenerativo surge, nesse contexto, como uma perspectiva capaz de reorganizar a relação entre cidade e ambiente ao abandonar a ideia de que a função da infraestrutura é apenas resistir ou remover rapidamente os efeitos da natureza e reconhecer que parte desses processos pode ser integrada ao próprio funcionamento urbano.

Para a engenharia civil, essa transformação exige um alargamento da concepção de infraestrutura sem abandono dos requisitos clássicos de segurança, confiabilidade e desempenho. Sistemas verdes não devem ser tratados como alternativas frágeis à engenharia convencional, mas como componentes que precisam ser submetidos a critérios técnicos compatíveis com sua função e combinados à infraestrutura cinza sempre que o nível de risco, a densidade urbana ou as restrições espaciais assim exigirem. A evidência disponível favorece particularmente essa abordagem híbrida, na qual tubulações, canais, reservatórios e estruturas de proteção coexistem com áreas de retenção, infiltração, arborização, parques inundáveis e recuperação de margens. Essa arquitetura possui uma vantagem importante: cria redundância e distribui funções ao longo do território, reduzindo a dependência de grandes estruturas centralizadas e utilizando diferentes componentes para enfrentar distintos níveis de evento. Chuvas frequentes podem ser

controladas parcialmente na fonte por soluções distribuídas, enquanto eventos extremos continuam exigindo sistemas robustos de extravasamento e defesa; de maneira semelhante, árvores e espaços verdes podem reduzir exposição térmica cotidiana, mas não eliminam a necessidade de edificações adequadas, estratégias passivas, acesso a resfriamento e políticas de proteção durante ondas de calor. A infraestrutura verde, portanto, não deve ser apresentada como substituta ideológica das soluções convencionais, mas como parte de uma engenharia mais diversificada, adaptativa e capaz de explorar processos físicos e ecológicos de maneira complementar. Essa interpretação é consistente com a literatura sistemática recente e com o próprio enquadramento adotado pelo IPCC para o desenvolvimento urbano resiliente ao clima.

No domínio térmico, os resultados demonstram que a vegetação possui capacidade concreta de modificar microclimas urbanos, sobretudo mediante sombreamento e evapotranspiração, mas também deixam claro que metas genéricas de arborização ou expansão de áreas verdes são insuficientes quando não se especifica onde, como e para quem o benefício será produzido. A cobertura de copa precisa ser planejada de acordo com exposição solar, circulação de pedestres, densidade construída, corredores de mobilidade e vulnerabilidade socioeconômica, enquanto a seleção de espécies deve considerar desenvolvimento radicular, disponibilidade hídrica, capacidade de sombreamento, compatibilidade com redes e manutenção. As evidências sobre árvores urbanas demonstram que o desempenho térmico varia entre climas e morfologias e que resultados obtidos por sensoriamento remoto não devem ser interpretados como equivalentes automáticos à experiência térmica ao nível do pedestre. Em consequência, projetos de mitigação do calor

precisam combinar medições de campo, modelagem e indicadores de conforto humano, evitando que reduções expressivas da temperatura de superfície sejam apresentadas como prova suficiente de redução de risco. Essa mesma lógica aplica-se aos telhados e paredes verdes: os sistemas apresentam potencial de reduzir temperaturas superficiais e determinadas cargas térmicas das edificações, mas seu desempenho depende do sistema construtivo, substrato, irrigação, vegetação e clima. Um planejamento regenerativo maduro precisa, portanto, abandonar metas predominantemente quantitativas, como número de árvores plantadas ou metros quadrados de cobertura verde, e avançar para metas de desempenho, como cobertura de sombra, redução de exposição térmica, sobrevivência da vegetação e distribuição territorial dos benefícios.

Na gestão das águas pluviais, a contribuição da infraestrutura verde revela de maneira ainda mais explícita a necessidade de integrar planejamento e engenharia. A impermeabilização urbana altera o balanço hidrológico e concentra vazões, e as soluções de drenagem sustentável atuam precisamente na tentativa de reter, infiltrar, evaporar e retardar parcelas da chuva antes que atinjam as redes convencionais. A literatura sistemática analisada identifica SUDS, LID, infraestrutura verde e infraestrutura azul-verde entre as abordagens mais recorrentes de adaptação a enchentes e demonstra benefícios de intervenções como coberturas verdes, biorretenção e sistemas permeáveis. Contudo, a existência de efeitos favoráveis não autoriza a afirmação de que essas soluções eliminariam a necessidade de dimensionamento hidráulico rigoroso ou resolveriam sozinhas inundações extremas. O desempenho depende da capacidade de armazenamento em relação à área contribuinte, da intensidade e duração da chuva, das propriedades

do solo e das condições antecedentes de umidade, além do estado de manutenção. A engenharia precisa trabalhar com eventos de diferentes frequências e níveis de serviço, utilizando infraestrutura verde para reduzir volumes e picos nas faixas em que sua contribuição é tecnicamente viável e garantindo rotas de excedência e sistemas convencionais adequados aos eventos superiores. A resiliência está justamente na combinação de estratégias e na capacidade de o sistema continuar funcionando quando uma determinada camada de defesa é superada, em vez de concentrar toda a proteção em uma única solução.

O caráter regenerativo dessas estratégias torna-se mais evidente quando o planejamento deixa de enxergar cada intervenção como elemento isolado e passa a reorganizar o território a partir de redes ecológicas e hidrológicas. Jardins de chuva espalhados sem relação com a bacia podem produzir benefícios locais, mas seu impacto sistêmico será limitado; corredores vegetados, áreas de retenção, parques inundáveis, margens restauradas e espaços permeáveis conectados a uma estratégia de bacia possuem maior potencial de alterar o comportamento urbano. O mesmo raciocínio vale para calor: aumentar vegetação em locais já arborizados pode elevar a média municipal de cobertura e produzir pouco efeito sobre populações mais expostas. A infraestrutura verde precisa, portanto, ser integrada aos instrumentos de planejamento territorial, aos planos de drenagem, aos códigos de obras, ao sistema viário, às políticas habitacionais e ao planejamento de espaços públicos. Essa integração representa uma das maiores diferenças entre uma intervenção “verde” pontual e um planejamento urbano efetivamente regenerativo. Na primeira situação, a natureza é introduzida como compensação ou ornamento; na segunda, passa a participar da organização funcional da cidade. A regeneração não se

limita à recuperação estética de áreas degradadas, mas procura restituir processos anteriormente interrompidos, como infiltração, evapotranspiração, conectividade de habitats e capacidade de acomodação das águas. Em frentes fluviais urbanas, por exemplo, isso pode significar combinar defesa física, recuperação de margens, parques inundáveis e aumento de permeabilidade, transformando uma obra de controle de risco em intervenção simultaneamente hidráulica, ecológica e urbana.

A manutenção constitui um dos pontos decisivos para que essa transformação não permaneça apenas no discurso de projeto. Sistemas verdes são frequentemente apresentados como soluções de baixo custo ou baixa manutenção, porém essa generalização pode comprometer sua eficácia. Árvores precisam de condições adequadas de estabelecimento e manejo; pavimentos permeáveis exigem limpeza para controlar colmatagem; sistemas de biorretenção precisam de inspeção, remoção de sedimentos e manejo da vegetação; telhados verdes requerem acompanhamento de impermeabilização, drenagem e cobertura vegetal; wetlands urbanos dependem do comportamento hidráulico e da qualidade da água. O planejamento de ciclo de vida precisa identificar responsabilidades antes da implantação, prever recursos e estabelecer indicadores capazes de detectar perda de desempenho. A própria infraestrutura cinza já demonstrou historicamente os custos de um modelo baseado em construção sem manutenção adequada, e repetir essa lógica com infraestrutura verde seria especialmente problemático porque sistemas vivos podem apresentar degradação gradual pouco percebida até que um evento extremo revele a perda de capacidade. A engenharia regenerativa precisa, assim, deslocar parte de sua atenção da entrega da obra para o desempenho durante sua vida útil, adotando monitoramento

e gestão adaptativa. Essa exigência também aponta uma importante lacuna científica identificada pelas revisões: muitos estudos avaliam intervenções em períodos curtos ou por modelagem, enquanto a evidência sobre desempenho real após anos ou décadas de operação continua insuficiente em diversos contextos.

A distribuição dos benefícios constitui outro eixo que precisa ser incorporado às decisões técnicas. Infraestrutura verde pode ser simultaneamente estratégia climática e instrumento de qualificação urbana, mas essas vantagens não são necessariamente distribuídas de forma equitativa. Bairros com maior renda frequentemente já dispõem de arborização, parques e superfícies permeáveis em quantidade superior, enquanto territórios periféricos podem apresentar elevada densidade construtiva, pouca sombra, drenagem precária e maior exposição a enchentes. Se novos investimentos continuarem concentrados onde existem melhores condições urbanísticas, a cidade pode aumentar sua área verde média sem reduzir as desigualdades de risco. O planejamento regenerativo precisa, por isso, associar mapas de calor, inundação e vulnerabilidade socioeconômica à priorização das intervenções, fazendo com que o investimento seja orientado pela necessidade e não apenas pela facilidade física de implantação. Além disso, os efeitos de valorização imobiliária devem ser acompanhados por políticas urbanas capazes de evitar que a população que historicamente suportou a degradação seja deslocada depois da melhoria ambiental. Embora esse problema ultrapasse as atribuições da engenharia civil, ele não pode ser ignorado por projetos que pretendam ser classificados como regenerativos, pois a resiliência de uma cidade não deve ser medida apenas pela capacidade de sua infraestrutura de resistir ao clima, mas também

pela capacidade de proteger as pessoas mais expostas sem reproduzir novas formas de exclusão.

A mitigação climática representa uma contribuição complementar importante, mas precisa ser tratada com proporcionalidade científica. Arborização, solos urbanos e coberturas vegetadas podem armazenar carbono, e o resfriamento proporcionado por vegetação pode reduzir a demanda de energia em determinadas edificações, especialmente durante períodos quentes. Ao mesmo tempo, a magnitude desses benefícios não substitui a necessidade de descarbonizar energia, mobilidade, materiais e processos construtivos, responsáveis por parcelas muito maiores das emissões urbanas. O valor estratégico das infraestruturas verdes encontra-se menos na promessa de neutralizar emissões e mais na possibilidade de produzir sinergias entre adaptação, mitigação, biodiversidade e qualidade urbana. Um corredor arborizado pode reduzir exposição térmica, favorecer deslocamentos a pé, conectar habitats e contribuir para armazenamento de carbono; um telhado verde pode reter chuva e reduzir parte da carga térmica; um parque inundável pode aumentar armazenamento hídrico e oferecer espaço de lazer. Essa multifuncionalidade torna economicamente mais relevante analisar os benefícios de maneira integrada, evitando comparações nas quais uma infraestrutura verde é avaliada apenas por uma única função e confrontada com uma estrutura convencional projetada exclusivamente para desempenhar aquela função. A avaliação econômica precisa considerar custos de ciclo de vida e múltiplos serviços, mas também evitar contabilizar como benefício aquilo que não foi demonstrado ou que depende de condições específicas.

Por fim, a revisão evidencia que a transição para cidades regenerativas exige uma transformação institucional comparável à

transformação física. A literatura sobre soluções baseadas na natureza mostra que a efetividade depende de capacidade administrativa, integração intersetorial, participação dos atores, financiamento e monitoramento, além das características técnicas do projeto. A engenharia civil precisa dialogar mais intensamente com urbanismo, arquitetura da paisagem, ecologia, hidrologia, saúde pública e gestão ambiental, porque as infraestruturas multifuncionais ultrapassam limites profissionais tradicionalmente rígidos. Prefeituras e concessionárias também precisam adaptar instrumentos de contratação e manutenção, uma vez que sistemas vivos nem sempre se encaixam em modelos administrativos desenvolvidos para obras convencionais. A padronização de indicadores de desempenho constitui outra necessidade, sobretudo diante da heterogeneidade observada nas pesquisas sobre temperatura e drenagem. Sem protocolos comparáveis, torna-se difícil acumular evidência, avaliar retorno do investimento e definir normas técnicas consistentes. Ao mesmo tempo, a padronização não pode ignorar o caráter contextual dessas soluções, razão pela qual o objetivo deve ser estabelecer critérios comuns de avaliação sem presumir desempenho uniforme em climas, solos e morfologias diferentes.

Conclui-se, portanto, que as infraestruturas verdes podem ocupar papel estruturante no planejamento urbano contemporâneo quando deixam de ser tratadas como complementos paisagísticos e passam a integrar os próprios sistemas técnicos de drenagem, conforto climático, regeneração ambiental e gestão de riscos. A evidência científica disponível sustenta seu potencial para reduzir calor e escoamento superficial e mostra vantagens adicionais relacionadas à biodiversidade e à qualidade dos espaços urbanos, mas igualmente demonstra que a eficácia depende de projeto,

escala, contexto e manutenção. O paradigma mais consistente não é o da substituição integral da infraestrutura cinza, mas o da construção de redes híbridas, adaptativas e multifuncionais nas quais processos naturais e sistemas de engenharia compartilham a tarefa de manter as cidades habitáveis diante de condições climáticas mais severas. O planejamento regenerativo amplia essa perspectiva ao estabelecer como objetivo não apenas resistir aos impactos futuros, mas recuperar progressivamente funções hidrológicas, ecológicas e climáticas perdidas durante a urbanização. Para que essa ambição se traduza em resultados mensuráveis, será necessário integrar as soluções aos códigos urbanos, aos planos de drenagem, aos investimentos de infraestrutura, às políticas de arborização e às estratégias de adaptação, garantir manutenção durante todo o ciclo de vida e priorizar territórios de maior vulnerabilidade. Sob essas condições, a engenharia civil pode desempenhar papel central na transição de cidades construídas predominantemente para controlar processos naturais para cidades capazes de conviver com eles, utilizando a própria infraestrutura como instrumento de regeneração, adaptação e resiliência climática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGHALOO, Kamaleddin; SHARIFI, Ayyoob; HABIBZADEH, Nader; ALI, Tausif; CHIU, Yie-Ru. How nature-based solutions can enhance urban resilience to flooding and climate change and provide other co-benefits: a systematic review and taxonomy. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 95, art. 128320, 2024. DOI: 10.1016/j.ufug.2024.128320.

ALEKSEJEVA, Jelena; VOULGARIS, Gerasimos; GASPARATOS, Alexandros. Systematic review of the climatic and non-climatic

benefits of green roofs in urban areas. *Urban Climate*, v. 58, art. 102133, 2024. DOI: 10.1016/j.uclim.2024.102133.

ALONZO, Michael; IBSEN, Peter Christian; LOCKE, Dexter. Urban trees and cooling: a review of the recent literature (2018 to 2024). *Arboriculture & Urban Forestry*, v. 51, n. 5, art. jauf.2025.023, 2025. DOI: 10.48044/jauf.2025.023.

FERRARIO, Francesco; MOURATO, João Morais; RODRIGUES, Miguel Silva; DIAS, Luís Filipe. Evaluating Nature-based Solutions as urban resilience and climate adaptation tools: a meta-analysis of their benefits on heatwaves and floods. *Science of the Total Environment*, v. 950, art. 175179, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175179.

GALALIZADEH, Saman; MORRISON-SAUNDERS, Angus; HORWITZ, Pierre; SILBERSTEIN, Richard; BLAKE, David. The cooling impact of urban greening: a systematic review of methodologies and data sources. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 95, art. 128157, 2024. DOI: 10.1016/j.ufug.2023.128157.

HU, Qi; LI, Yanjing. Cooling benefits of urban tree canopy: a systematic review. *Sustainability*, v. 16, n. 12, art. 4955, 2024. DOI: 10.3390/su16124955.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Cities, settlements and key infrastructure. In: PÖRTNER, Hans-Otto et al. (ed.). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

LI, Haiwei; ZHAO, Yongling; WANG, Chenghao; ÜRGE-VORSATZ, Diana; CARMELIET, Jan; BARDHAN, Ronita. Cooling efficacy of trees across cities is determined by background climate, urban

morphology, and tree trait. *Communications Earth & Environment*, v. 5, art. 754, 2024. DOI: 10.1038/s43247-024-01908-4.

MARZIO, Sara; TOSI, Jacopo; POGGI, Francesca; AMADO, Miguel. Nature-based solutions for urban waterfront regeneration: a systematic review of frameworks, strategies and applications. *City and Environment Interactions*, v. 29, art. 100281, 2026. DOI: 10.1016/j.cacint.2025.100281.

MOSISA, Gemechis B.; BEDADI, Bobe; DALLE, Gemedo; TASSIE, Nega. Nature-based solutions for urban climate resilience: implementation, contribution, and effectiveness. *Nature-Based Solutions*, v. 8, art. 100245, 2025. DOI: 10.1016/j.nbsj.2025.100245.

SALIH, Kawar; BÁTHORYNÉ NAGY, Ildikó Réka. Review of the role of urban green infrastructure on climate resiliency: a focus on heat mitigation modelling scenario on the microclimate and building scale. *Urban Science*, v. 8, n. 4, art. 220, 2024. DOI: 10.3390/urbansci8040220.

SOLTANIFARD, Hadi; AMANI-BENI, Majid. The cooling effect of urban green spaces as nature-based solutions for mitigating urban heat: insights from a decade-long systematic review. *Climate Risk Management*, v. 49, art. 100731, 2025. DOI: 10.1016/j.crm.2025.100731.

¹ Engenharia Civil pela Universidade de Pernambuco. Lattes: <https://lattes.cnpq.br/4853763196279866>. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)