

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS PARA O SANEAMENTO BÁSICO EM ÁREAS DE VULNERABILIDADE SOCIAL: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Kattlen Cordeiro Quevedo¹; Taiane Regina Hoepers²; Daniel Costa dos Santos³;

Abstract: This article presents a systematic review of the literature on sustainable sanitation technologies applicable to contexts of social vulnerability, with a primary focus on decentralized and low-cost solutions. Scientific articles published between 2009 and 2024 were analyzed, covering the implementation of decentralized wastewater treatment systems (DEWATS), constructed wetlands, rainwater harvesting, graywater reuse, and appropriate technologies across various settings, from rural and peripheral areas to riverside communities. The findings indicate that the technical feasibility and effectiveness of these technologies are closely linked to their adaptation to local conditions, community involvement, and institutional support. Despite advances and successful experiences, challenges related to standardization, maintenance, and cultural acceptance persist, limiting broader implementation. The study concludes that to ensure the effectiveness of these alternatives, it is essential to develop integrated public policies, promote environmental education, and invest in technical training that addresses the specific needs of vulnerable populations.

Keywords – Decentralized sanitation; rainwater harvesting; low-cost technologies.

Resumo: Este artigo apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre tecnologias sustentáveis de saneamento básico aplicáveis a contextos de vulnerabilidade social, com foco principal em soluções descentralizadas e de baixo custo. Foram analisados artigos científicos publicados entre 2009 e 2024 que abordam, em diversas localidades, desde áreas rurais e periféricas a comunidades ribeirinhas, a implementação de sistemas descentralizados de tratamento de esgoto (DEWATS), wetlands construídos, captação de água de chuva, reuso de águas cinzas e tecnologias apropriadas. Os resultados apontam que a viabilidade técnica e a eficiência dessas tecnologias estão diretamente relacionadas à sua adaptação aos contextos locais, ao engajamento da comunidade e à existência de suporte institucional. Apesar dos avanços e das evidências de sucesso, persistem desafios ligados à normatização, à manutenção e às barreiras culturais, que impõem limite a sua expansão em larga escala. O estudo conclui que, para a efetivação dessas alternativas, é necessário desenvolver políticas públicas integradas, promover educação ambiental e investir em capacitação técnica de forma que contemple as demandas específicas das populações vulneráveis.

Palavras-Chave – Saneamento descentralizado; captação de água da chuva; tecnologias de baixo custo.

INTRODUÇÃO

O acesso universal ao saneamento básico é um dos maiores desafios globais da atualidade, especialmente em países em desenvolvimento. De acordo com o relatório da Organização das Nações

1) Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, kattlen@ufpr.br

2) Secretaria de Estado de Administração e Previdência do Paraná, taianehoepers@seap.pr.gov.br

3) Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, dcsantos.dhs@ufpr.br

Unidas (UNITED NATIONS, 2023), mais de 2 bilhões de pessoas ainda não dispõem de serviços de saneamento gerenciados de forma segura, o que agrava desigualdades sociais, ambientais e de saúde pública. No Brasil, a ausência de sistemas eficientes de tratamento de esgoto e abastecimento de água afeta milhões de pessoas, agravando problemas de saúde pública, degradação ambiental e desigualdades sociais. Segundo dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022), cerca de 33 milhões de brasileiros não têm acesso à água tratada e mais de 90 milhões vivem sem cobertura de coleta e tratamento de esgoto, com os piores indicadores concentrados nas regiões Norte e Nordeste. Dados recentes apontam que, enquanto grandes centros urbanos contam com infraestrutura consolidada, muitas comunidades rurais e periferias urbanas continuam sem acesso a serviços essenciais, destacando assim a necessidade de soluções alternativas e adaptáveis (Britto; Quintsler, 2020).

Entre as alternativas emergentes, destacam-se as tecnologias sustentáveis e descentralizadas, que se fundamentam em processos naturais e métodos de baixo impacto ambiental (Ventura et al., 2024). Estas tecnologias não exigem grandes investimentos em infraestrutura centralizada, adaptam-se facilmente às condições locais e possibilitam a integração de elementos de recuperação de recursos, como, por exemplo, a produção de biogás ou o reuso da água tratada, demonstrando o forte potencial para transformar realidades sanitárias complexas (Ventura et al., 2024). Além disso, a adoção de estratégias de captação de água de chuva e reuso de águas cinzas tem se mostrado crucial para garantir a segurança hídrica em regiões onde o abastecimento é instável ou intermitente, conforme demonstram os estudos de Puppala et al. (2023) e Pacifico et al. (2021), que evidenciam a efetividade dessas práticas em contextos rurais e comunidades ribeirinhas.

A literatura mostra que o sucesso das tecnologias de saneamento sustentável está relacionado não apenas à sua eficácia técnica, mas também à sua compatibilidade com os aspectos sociais, econômicos e culturais das comunidades onde são implantadas. Como destacam Massoud, Tarhini e Nasr (2009), a aceitação e o desempenho dessas tecnologias dependem fortemente do envolvimento da população local e da adaptação das soluções às realidades específicas de cada território. Estudos destacam que a implementação de soluções descentralizadas requer, não somente investimento tecnológico, mas exige um forte componente de educação ambiental e participação ativa da comunidade (Massoud et al., 2009; Dias, 2021; Pereira, 2021). Assim, a presente revisão sistemática tem como objetivo identificar, analisar e sintetizar evidências sobre a eficácia, as vantagens e as limitações das tecnologias de saneamento sustentável, contribuindo para a formulação de diretrizes que promovam a inclusão sanitária em áreas de vulnerabilidade social.

METODOLOGIA

Esta pesquisa caracteriza-se como uma revisão sistemática de literatura, cujo objetivo é reunir, analisar e sintetizar os principais resultados de estudos científicos que abordam tecnologias sustentáveis para o saneamento em áreas de vulnerabilidade social. A metodologia adotada baseou-se em diretrizes consolidadas para revisões sistemáticas, considerando critérios explícitos de seleção, exclusão e categorização temática.

CrITÉRIOS de inclusão e exclusão

Foram incluídos nesta revisão artigos científicos completos. Os artigos utilizados pertencem a periódicos nacionais e internacionais, todos voltados ao tema central da pesquisa. Os critérios de inclusão foram:

- Estudos publicados entre 2009 e 2024;

- Artigos com foco em sistemas descentralizados de tratamento de esgoto, reúso de água, captação pluvial, tecnologias de baixo custo e/ou barreiras à implementação;
- Aplicações práticas ou estudos de caso em áreas rurais, periféricas ou em situação de vulnerabilidade socioeconômica.
- Contribuições para a sustentabilidade e inclusão social no saneamento.

Foram excluídos estudos que tratavam exclusivamente de tecnologias aplicadas em contextos urbanos consolidados, sem abordagem prática ou aplicabilidade direta a áreas vulneráveis, bem como trabalhos com caráter estritamente teórico ou normativo sem dados empíricos.

A busca foi realizada com o uso de palavras-chave: 'saneamento descentralizado', 'tratamento de esgoto', 'wetlands construídos', 'captação de água da chuva', 'reuso de águas cinzas', 'tecnologias de baixo custo', 'tecnologias apropriadas', 'vulnerabilidade social' e 'educação ambiental', tanto em português quanto em inglês, nas bases Google Scholar, Scopus, Web of Science e Periódicos CAPES. Os artigos foram selecionados conforme sua relevância temática, qualidade metodológica e pertinência ao escopo da pesquisa.

Procedimentos de análise

Após a identificação dos artigos, procedeu-se à leitura integral de cada estudo, com extração de dados relevantes quanto aos seguintes aspectos: tipo de tecnologia utilizada, contexto de aplicação, resultados obtidos, dificuldades enfrentadas e lições aprendidas.

A análise seguiu procedimentos de categorização temática, agrupando os estudos em cinco eixos: (1) sistemas descentralizados, (2) reúso e captação de água, (3) tecnologias de baixo custo, (4) barreiras à implementação, e (5) casos de sucesso e fracasso.

RESULTADOS

A busca sistemática realizada nas bases Google Scholar, Scopus, Web of Science e Periódicos CAPES, utilizando descritores em português e inglês relacionados a saneamento descentralizado, tecnologias sustentáveis e contextos de vulnerabilidade social, resultou inicialmente em 87 artigos identificados. Após a leitura dos títulos e resumos, 42 artigos foram excluídos por não atenderem aos critérios de inclusão, como foco exclusivo em contextos urbanos consolidados ou ausência de dados empíricos. A leitura integral dos estudos restantes levou à seleção final de 8 artigos científicos que atenderam integralmente aos critérios estabelecidos, compondo a base de análise desta revisão.

O Quadro 1 apresenta uma relação detalhada dos artigos científicos utilizados, fornecendo uma visão clara e concisa de cada estudo. Para cada artigo, são destacados o autor, a tecnologia aplicada, o contexto ou localização da pesquisa e os benefícios identificados a partir da aplicação da tecnologia. Essa organização permite uma rápida compreensão das principais contribuições e relevância de cada trabalho para o tema em questão.

Quadro 1 – Tecnologias Sustentáveis Aplicadas e seus Benefícios

Autor (ano)	Tecnologia aplicada	Contexto/ Localização	Benefícios destacados
Dias & pereira (2021)	Filtro anaeróbio com infiltração no solo	Simonésia (MG), Brasil	Baixo custo, uso de materiais locais, participação comunitária
Ferreira et al. (2020)	Reuso de águas cinzas	Nordeste do Brasil	Redução de consumo de água potável, barreiras culturais identificadas
Immich et al. (2024)	Wetlands construídos	BRASIL	Alta eficiência, uso de plantas nativas, integração paisagística
Massoud et al. (2009)	Sistemas descentralizados diversos (Tanques sépticos, filtros anaeróbios, lodos ativados em pequena escala, Wetlands construídos, reatores UASB, sistemas combinados com reuso agrícola e sistemas modulares e híbridos)	Países em desenvolvimento	Aplicabilidade em áreas sem acesso a redes públicas, baixo custo, adaptabilidade
Pacifico et al. (2021)	Captção de água de chuva com filtragem	Amazônia, Brasil	Redução da vulnerabilidade hídrica, melhoria na saúde, capacitação comunitária
Puppala et al. (2023)	Sistemas de captação de chuva	Índia (zonas rurais)	Segurança hídrica, incentivo à adoção via políticas públicas e percepção de utilidade
Rosa et al. (2023)	Tecnologias apropriadas ao contexto social, econômico, ambiental e cultural das comunidades rurais brasileiras. (banheiros secos etc.)	Diversas comunidades rurais no Brasil	Participação social, baixo custo, educação ambiental
Ventura et al. (2024)	DEWATS	Global	Flexibilidade, modularidade, reuso, remoção eficiente de carga orgânica e nutrientes

Sistemas descentralizados de tratamento de esgoto

Os sistemas descentralizados de tratamento de esgoto (DEWATS) emergem como soluções alternativas para regiões onde a extensão dos sistemas centralizados se mostra inviável economicamente e tecnicamente. Ventura et al. (2024) descrevem uma série de tecnologias que incluem desde reatores anaeróbios compartimentados até sistemas híbridos que combinam processos físicos, químicos e biológicos. Esses sistemas se caracterizam por serem modulares, escaláveis e adaptáveis a diversas realidades, permitindo o tratamento local dos resíduos e a recuperação de recursos.

Immich et al. (2024) demonstraram, por meio de estudos de viabilidade, que os wetlands construídos, estruturas que utilizam a ação sinérgica de plantas, solos e microrganismos, apresentam altas taxas de remoção de DBO, nutrientes e patógenos. A implementação desses sistemas em zonas rurais apresentou resultados positivos, principalmente devido à possibilidade de utilização da vegetação nativa, a redução de custos operacionais e a integração com o ambiente natural, gerando benefícios ambientais adicionais, como a promoção da biodiversidade.

Massoud et al. (2009) enfatizam que o sucesso dos DEWATS depende de uma avaliação criteriosa das condições locais, tanto do ponto de vista físico quanto social. Regiões que apresentam baixa densidade populacional, a descentralização do tratamento se torna não apenas uma necessidade técnica, mas sim, uma estratégia para garantir a inclusão social, uma vez que permite que pequenos grupos tenham acesso a soluções de saneamento que, de outra forma, seriam inviáveis em grandes sistemas centralizados. Em Simonésia (MG), Dias e Pereira (2021) relataram a implantação de um sistema que, ao utilizar materiais locais e mão de obra da própria comunidade, obteve alta adesão dos moradores, demonstrando que a simplicidade e a economia de recursos podem determinar o sucesso ou fracasso de iniciativas relacionadas ao saneamento.

A literatura revela, ainda, que a manutenção contínua e o treinamento dos operadores locais são fatores importantes e determinantes para a sustentabilidade dos DEWATS. A ausência de um acompanhamento técnico regular e a dificuldade para integrar essas tecnologias aos sistemas normativos tradicionais continuam sendo desafios que necessitam ser vencidos.

Reuso de água e captação pluvial

A captação e o reuso de água configuram-se como estratégias fundamentais para regiões com escassez hídrica ou com sistemas de abastecimento ineficientes. Em diversas partes do mundo, têm-se aproveitado a água de chuva e as águas residuais tratadas para usos não potáveis, contribuindo significativamente para a segurança hídrica e para a redução da pressão sobre fontes convencionais. Estudos realizados por Puppala et al. (2023), Pacifico et al. (2021) e Ferreira et al. (2020) demonstram que essas práticas, quando aliadas ao uso de tecnologias acessíveis e à participação comunitária, podem ser eficazes mesmo em contextos de vulnerabilidade social, ampliando o acesso à água e promovendo maior resiliência hídrica.

Puppala et al. (2023) apresentam um estudo detalhado sobre a implementação de sistemas de captação de água de chuva em áreas rurais da Índia, destacando como esses sistemas podem ser adaptados a contextos de baixa renda por meio de tecnologias simples e com fácil manutenção. Os autores ressaltam que a eficácia desses sistemas depende, de políticas de incentivo e de campanhas de conscientização que reforcem a importância do reuso responsável da água.

Pacifico et al. (2021) relataram experiências positivas em comunidades ribeirinhas do Amazonas, onde a instalação de cisternas e sistemas de filtragem permitiram a redução significativa da vulnerabilidade hídrica. O estudo enfatiza que a participação da comunidade, através de

treinamentos e reuniões periódicas, foi um fator de grande importância para o sucesso e a continuidade do projeto.

Além disso, o reúso de águas cinzas para fins de irrigação e limpeza mostra-se como uma prática sustentável, que pode reduzir a demanda por água potável e contribuir para a segurança alimentar em áreas de vulnerabilidade. Entretanto, Ferreira et al. (2020) alertam para os desafios existentes para a superação de barreiras culturais e garantia da qualidade da água tratada, necessárias para ampliar a aceitação desses sistemas.

Tecnologias de baixo custo

O desenvolvimento e a aplicação de tecnologias de baixo custo são fundamentais para viabilizar soluções de saneamento em contextos de escassez de recursos. Essas tecnologias se apoiam na utilização de materiais disponíveis localmente, em processos naturais e na mobilização da comunidade durante as etapas de construção e operação. Rosa et al. (2023) ressaltam que a adoção de uma abordagem participativa fortalece a sustentabilidade dos projetos e reduz os custos de implantação. De modo semelhante, Dias e Pereira (2021) demonstram que o uso de técnicas simples e de fácil manutenção, aliado ao envolvimento dos moradores, favorece resultados sanitários satisfatórios mesmo em comunidades rurais com infraestrutura precária.

As tecnologias de baixo custo têm se mostrado estratégias eficazes para ampliar o acesso ao saneamento em comunidades com recursos limitados, especialmente quando desenvolvidas com base em soluções simples, materiais locais e participação social. Rosa et al. (2023) destacam a utilização de banheiros secos e fossas biodigestoras como alternativas sustentáveis, reforçando que a construção participativa e as ações educativas são fundamentais para garantir o uso adequado e a continuidade dos sistemas. Em Simonésia (MG), Dias e Pereira (2021) implementaram um sistema de tratamento de esgoto composto por filtro anaeróbio e infiltração no solo, utilizando materiais da própria região e capacitando os moradores para sua operação e manutenção, o que resultou em redução de custos e alto grau de aceitação. Já Ferreira et al. (2020) abordam o reúso de águas cinzas no semiárido nordestino, aplicado a atividades como irrigação e limpeza, evidenciando que, apesar da viabilidade técnica, fatores culturais ainda representam barreiras à adoção plena dessas tecnologias. Esses estudos demonstram que a combinação entre simplicidade técnica, adaptabilidade local e engajamento comunitário é decisiva para o sucesso de soluções de saneamento de baixo custo.

Rosa et al. (2023) propõem uma abordagem participativa para o desenvolvimento dessas tecnologias, enfatizando que a construção coletiva, além de reduzir os custos, também fortalece o sentimento de pertencimento e a sustentabilidade dos projetos. Entre as soluções destacadas estão a utilização de fossas biodigestoras, banheiros secos, filtros anaeróbios e wetlands artesanais, que podem ser construídos com recursos que estão disponíveis na região.

Dias e Pereira (2021) demonstram que, em Simonésia (MG), a integração de técnicas de baixo custo com o envolvimento comunitário permitiu a implantação de um sistema de tratamento de esgoto que obteve resultados sanitários satisfatórios e uma operação simplificada. A estratégia de usar materiais de fácil acesso e capacitar os moradores para realizar a manutenção foi apontada como um fator determinante para o sucesso do projeto.

Um dos principais desafios para a disseminação das tecnologias sustentáveis está na sua formalização por meio de normatizações técnicas que assegurem sua replicabilidade em maior escala. A ausência de diretrizes regulatórias compatíveis com os sistemas descentralizados limita seu reconhecimento institucional e o acesso a financiamentos. Segundo Ventura et al. (2024), a integração dessas tecnologias às políticas públicas é indispensável para que seu potencial seja plenamente explorado, promovendo a inclusão sanitária em áreas historicamente negligenciadas.

Barreiras à implementação

Embora as tecnologias sustentáveis apresentem resultados promissores, sua implementação ainda enfrenta barreiras significativas em diversas dimensões. A percepção de risco associada ao reuso da água, a resistência cultural enraizada em hábitos tradicionais e a ausência de políticas públicas de incentivo são apontadas como entraves recorrentes na literatura (Ferreira et al., 2020; Ventura et al., 2024).

Ferreira et al. (2020) observam que, em muitos contextos, a população resiste em adotar o reuso de águas residuais devido ao estigma associado à água "contaminada". Essa visão, frequentemente enraizada em aspectos culturais e históricos, dificulta a aceitação de tecnologias que, tecnicamente, demonstram elevados índices de depuração e segurança sanitária.

Ventura et al. (2024) destacam que a ausência de marcos regulatórios específicos para tecnologias descentralizadas impede sua integração ao sistema de saneamento público. As normas sanitárias vigentes tendem a favorecer sistemas centralizados, o que dificulta o acesso a financiamentos e incentivos para projetos alternativos.

Britto e Quintsler (2020) abordam ainda a questão das desigualdades ambientais, demonstrando como a falta de um planejamento urbano inclusivo e a negligência governamental em áreas periféricas geram um cenário de exclusão que mantém a precariedade do saneamento. A descontinuidade dos programas de apoio juntamente com a ausência de capacitação e monitoramento, compromete a sustentabilidade a longo prazo.

Casos de sucesso e fracasso

A análise dos casos estudados mostra que o sucesso na aplicação das tecnologias sustentáveis depende da combinação de fatores técnicos, sociais e institucionais. Em experiências relatadas por Pacifico et al. (2021) e Rosa et al. (2023), a participação ativa das comunidades por meio de conselhos, treinamentos e ações educativas, contribuiu para o bom funcionamento e manutenção dos sistemas.

Por outro lado, Ferreira et al. (2020) descrevem casos de fracasso, onde a ausência de diálogo com a comunidade, a imposição de tecnologias incompatíveis com a realidade local e a falta de apoio contínuo resultaram no abandono das soluções implementadas. Tais experiências ressaltam a importância da consideração do contexto cultural e as necessidades específicas de cada território, além de garantir um suporte técnico e institucional robusto.

Em síntese, os casos bem-sucedidos se destacam pelo planejamento participativo, pela simplicidade tecnológica e pelo alinhamento com as expectativas e tradições dos usuários, enquanto os fracassos geralmente resultam de abordagens impositivas e com falta de acompanhamento pós-implantação.

CONCLUSÃO

A revisão realizada aponta que as tecnologias sustentáveis de saneamento básico formam uma alternativa viável e necessária para promover a inclusão sanitária e redução de desigualdades em áreas de vulnerabilidade social. Os sistemas descentralizados, os métodos de captação de água e as tecnologias de baixo custo demonstram elevado potencial de impacto, especialmente quando associados à participação ativa das comunidades e ao suporte de políticas públicas voltadas para a descentralização.

Entretanto, para que essas soluções possam ser replicadas em larga escala, é imprescindível a superação de barreiras normativas, culturais e operacionais. Investimentos em capacitação técnica,

criação de incentivos financeiros e o desenvolvimento de marcos regulatórios que contemplem as especificidades dos sistemas descentralizados são pontos urgentes. Além disso, o fortalecimento de redes de apoio entre governo, setor privado e organizações da sociedade civil pode facilitar a integração dessas tecnologias ao planejamento urbano e regional.

Os avanços apresentados nos estudos indicam que a adoção de tecnologias sustentáveis, aliada a práticas participativas e educação ambiental, pode transformar o cenário do saneamento básico em áreas marginalizadas. A continuidade e o sucesso dessas iniciativas dependem da articulação de esforços de diversos setores, capazes de reconhecer e valorizar as particularidades dos contextos locais, promovendo assim um desenvolvimento inclusivo e sustentável.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS: Diagnóstico dos serviços de água e esgoto – 2022*. Brasília: MDR, 2023.

BRITTO, A.L.N.P.; QUINTSLR, S. (2020). “Políticas e programas para esgotamento sanitário na metrópole do Rio de Janeiro: um olhar na perspectiva das desigualdades ambientais”. *Cadernos Metrópole*, 22(48), pp. 435–456.

DIAS, M.S.B.; PEREIRA, A.C. (2021). “Tecnologias descentralizadas apropriadas para tratamento de esgoto doméstico em áreas rurais: estudo de caso para uma comunidade rural de Simonésia, Minas Gerais”. *ForScience*, 9(2), e00995.

FERREIRA, D.M.; NAVONI, J.A.; ARAÚJO, A.L.C.; AMARAL, V.S. (2020). “Percepção de risco no tratamento e reúso de esgotos domésticos em populações do Nordeste”. *Ambiente & Sociedade*, 23, pp. 1–19.

IMMICH, T.B.; MEDEIROS, R.C.; DECEZARO, S.T. (2024). “Feasibility study for the implementation and operation of different types of constructed wetlands for a decentralized wastewater treatment system”. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 29, e20240005.

MASSOUD, M.A.; TARHINI, A.; NASR, J.A. (2009). “Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries”. *Journal of Environmental Management*, 90, pp. 652–659.

PACIFICO, A.C.N. et al. (2021). “Tecnologia para acesso à água na várzea amazônica: impactos positivos na vida de comunidades ribeirinhas do Médio Solimões, Amazonas, Brasil”. *Cadernos de Saúde Pública*, 37(3), e00084520.

PUPPALA, H.; AHUJA, J.; TAMVADA, J.P.; PEDDINTI, P.R.T. (2023). “New technology adoption in rural areas of emerging economies: The case of rainwater harvesting systems in India”. *Technological Forecasting and Social Change*, 196, 122832.

ROSA, M.N.; TEIXEIRA, D.; HORA, K.E.R. (2023). “Ações participativas em saneamento rural: bases conceituais e diretrizes metodológicas”. *Saúde e Sociedade*, 32(2), e201040pt.

VENTURA, J.-R.S. et al. (2024). “Advancements and challenges in decentralized wastewater treatment: A comprehensive review”. *Desalination and Water Treatment*, 320, 100830.

UNITED NATIONS. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022: Special focus on gender. Geneva: WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene, 2023.