

AGRICULTURA SUSTENTÁVEL COM REÚSO DE EFLUENTES TRATADOS: BENEFÍCIOS NUTRICIONAIS, REGULAMENTAÇÃO E RISCOS À SAÚDE

SUSTAINABLE AGRICULTURE WITH REUSE OF TREATED EFFLUENTS: NUTRITIONAL BENEFITS, REGULATION, AND HEALTH RISKS

AGRICULTURA SOSTENIBLE CON REUTILIZACIÓN DE EFLUENTES TRATADOS: BENEFICIOS NUTRICIONALES, REGULACIÓN Y RIESGOS PARA LA SALUD

Rafaela Dantas de Lucena Rocha¹, Ana Paula Alves Feitosa de Amorim², Thamires Carolayne Cavalcanti Moura³, Ilka Djanira Ferreira do Nascimento⁴, Maria Cristiane Neves de Carvalho⁵

DOI: 10.54899/dcs.v22i85.3858

Recibido: 22/11/2025 | Aceptado: 26/11/2025 | Publicación en línea: 04/12/2025.

RESUMO

O aumento populacional e a intensificação da produção agrícola ampliam a demanda por água e nutrientes, reforçando a necessidade de estratégias sustentáveis para garantir a segurança hídrica e alimentar. O uso de águas residuárias tratadas na agricultura surge como uma alternativa viável, especialmente em regiões áridas e semiáridas, por fornecer água de irrigação e nutrientes essenciais ao solo e às plantas. Estudos apontam que o efluente proveniente de estações de tratamento de esgoto (ETE) pode suprir significativa parcela das necessidades nutricionais das culturas, reduzindo o uso de fertilizantes minerais e promovendo a economia circular. Além disso, a presença de macro e micronutrientes contribui para práticas como a biofortificação agrônômica, uma estratégia promissora para elevar o teor nutricional de culturas básicas e mitigar deficiências nutricionais em populações vulneráveis. Entretanto, o uso do efluente tratado requer atenção quanto à qualidade físico-química e microbiológica, visto que sais, metais pesados e patógenos podem representar riscos ambientais e sanitários. Normas e diretrizes internacionais e nacionais orientam limites de segurança, métodos de aplicação e padrões de monitoramento, ressaltando a importância do manejo adequado e da escolha de sistemas de irrigação de menor exposição, como o gotejamento. No Brasil, embora avanços regulatórios tenham ocorrido, ainda há desafios para consolidar um marco normativo abrangente para o reúso agrícola. Assim, o reúso de águas residuárias tratadas revela-se uma prática estratégica para aumentar a eficiência no uso da água,

¹ Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru, Pernambuco, Brasil. E-mail: rafadantas_lucena@hotmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0673-1579>

² Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru, Pernambuco, Brasil. E-mail: ana.afeitosa@ufpe.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0283-3466>

³ Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru, Pernambuco, Brasil. E-mail: tccmoura@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4762-3849>

⁴ Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), Caruaru, Pernambuco, Brasil. E-mail: ilkadjanira@hotmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5575-7578>

⁵ Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco, Brasil. E-mail: engenheiramariacristiane@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9350-742X>

promover a biofortificação agrônômica e estimular sistemas agrícolas mais sustentáveis, desde que acompanhado de regulamentação consistente e monitoramento adequado.

Palavras-chave: Biofortificação Agrônômica. Legislação. Irrigação. Escassez Hídrica. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Population growth and the intensification of agricultural production increase the demand for water and nutrients, reinforcing the need for sustainable strategies to ensure water and food security. The use of treated wastewater in agriculture emerges as a viable alternative, especially in arid and semi-arid regions, by providing irrigation water and essential nutrients to the soil and plants. Studies indicate that effluent from wastewater treatment plants (WWTPs) can supply a significant portion of the nutritional needs of crops, reducing the use of mineral fertilizers and promoting a circular economy. Furthermore, the presence of macro and micronutrients contributes to practices such as agronomic biofortification, a promising strategy to increase the nutritional content of staple crops and mitigate nutritional deficiencies in vulnerable populations. However, the use of treated effluent requires attention to its physicochemical and microbiological quality, since salts, heavy metals, and pathogens can represent environmental and sanitary risks. International and national norms and guidelines establish safety limits, application methods, and monitoring standards, emphasizing the importance of proper management and the choice of irrigation systems with lower exposure, such as drip irrigation. In Brazil, although regulatory advances have occurred, challenges remain in consolidating a comprehensive regulatory framework for agricultural reuse. Thus, the reuse of treated wastewater proves to be a strategic practice to increase water use efficiency, promote agronomic biofortification, and stimulate more sustainable agricultural systems, provided it is accompanied by consistent regulation and adequate monitoring.

Keywords: Agronomic Biofortification. Legislation. Irrigation. Water Scarcity. Sustainability.

RESUMEN

El crecimiento poblacional y la intensificación de la producción agrícola incrementan la demanda de agua y nutrientes, lo que refuerza la necesidad de estrategias sostenibles para garantizar la seguridad hídrica y alimentaria. El uso de aguas residuales tratadas en la agricultura se perfila como una alternativa viable, especialmente en regiones áridas y semiáridas, al proporcionar agua de riego y nutrientes esenciales al suelo y a las plantas. Estudios indican que los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) pueden cubrir una parte significativa de las necesidades nutricionales de los cultivos, reduciendo el uso de fertilizantes minerales y promoviendo una economía circular. Además, la presencia de macro y micronutrientes contribuye a prácticas como la biofortificación agronómica, una estrategia prometedora para aumentar el contenido nutricional de los cultivos básicos y mitigar las deficiencias nutricionales en poblaciones vulnerables. Sin embargo, el uso de efluentes tratados requiere atención a su calidad físicoquímica y microbiológica, ya que las sales, los metales pesados y los patógenos pueden representar riesgos ambientales y sanitarios. Las normas y directrices internacionales y nacionales establecen límites de seguridad, métodos de aplicación y estándares de monitoreo, enfatizando la importancia de una gestión adecuada y la elección de sistemas de riego con menor exposición, como el riego por goteo. En Brasil, si bien se han producido avances regulatorios,

persisten desafíos para consolidar un marco regulatorio integral para la reutilización agrícola. Por lo tanto, la reutilización de aguas residuales tratadas resulta ser una práctica estratégica para aumentar la eficiencia del uso del agua, promover la biofortificación agronómica y estimular sistemas agrícolas más sostenibles, siempre que se acompañe de una regulación consistente y un monitoreo adecuado.

Palabras clave: Biofortificación Agronómica. Legislación. Riego. Escasez de Agua. Sostenibilidad.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

O contínuo crescimento populacional está aumentando a demanda por alimentos em todo o mundo. Como resultado, há uma necessidade crítica de melhorar a eficiência do uso da água na agricultura e explorar recursos alternativos para irrigação. Anualmente, são produzidos aproximadamente 380 km³ de águas residuárias globalmente (Natasha *et al.*, 2020), o que corresponde a 15% de toda a água utilizada na agricultura (Kama *et al.*, 2023). Com o avanço da urbanização, a quantidade de águas residuárias continuará a crescer, portanto, as águas residuárias tratadas têm sido propostas como uma fonte viável de água para irrigação. Isso tem impulsionado a busca por soluções que promovam uma agricultura sustentável nas regiões áridas e semiáridas do Brasil, visando não apenas o fortalecimento da economia local, mas também o desenvolvimento de pequenos e médios agricultores (Valeriano *et al.*, 2018).

Dentre essas soluções, está o uso de subprodutos de valor agregado do tratamento de esgotos domésticos, como por exemplo os esgotos e lodos tratados (Lonigro *et al.* 2016; Libutti *et al.* 2018). A presença de nutrientes essenciais às plantas nesses subprodutos, em especial nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), é uma das grandes vantagens do uso agrícola deles, principalmente por reduzir, e até mesmo substituir, a aplicação de fertilizantes minerais ao solo, além de fornecer água às plantas, no caso particular dos esgotos tratados. Entretanto, os conhecimentos sobre essa prática de fertirrigação e adubação orgânica ainda precisam ser aprofundados, principalmente, sob diferentes tipos de cultivo, condições edafoclimáticas e de aplicação a longo prazo (Libutti *et al.* 2018).

A ampliação da produtividade de alimentos tem contribuído tanto para o aumento do consumo de água como para a diminuição das reservas de micronutrientes no solo, o que tem

impactado na qualidade desses alimentos. Assim, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de melhorar a qualidade nutricional dos alimentos, e dentre elas está a biofortificação (Silva, 2017).

A biofortificação é uma estratégia eficaz para aumentar o conteúdo de micronutrientes em plantas comestíveis (Kumar *et al.*, 2019; Prom-U-Thai *et al.*, 2020; Szerement *et al.*, 2022; Inácio *et al.*, 2018), é normalmente realizada através de três métodos principais: melhoramento de plantas tradicional, práticas agronômicas e engenharia genética no melhoramento de plantas (Keith *et al.*, 2018). A biofortificação agronômica se destaca como um dos métodos mais simples e econômicos para aumentar o teor de micronutrientes nas plantas.. Isto é alcançado pelo fornecimento direto de micronutrientes às plantas através da aplicação de fertilizantes minerais ou foliares, ou aumentando a solubilidade e mobilidade dos elementos minerais no solo (Szerement *et al.*, 2022). Globalmente, o arroz, o trigo e o milho fornecem mais de 50% das necessidades calóricas e são alvo de grandes programas de biofortificação para aliviar deficiências de micronutrientes.

O principal atrativo do uso de efluente de ETE na agricultura é seu potencial como fonte valiosa de nutrientes para as plantas, permitindo a redução do uso de fertilizantes minerais em cultivos agrícolas (Kihila *et al.*, 2014), além de suprir as necessidades hídricas das plantas. O aproveitamento agrícola desse efluente está fundamentado também na sua disponibilidade durante todo o ano, em municípios que são contemplados com sistema de esgotamento sanitário. Ademais, com o aproveitamento do efluente de ETE, tem-se a possibilidade de reduzir os custos com técnicas avançadas de remoção de nutrientes para atender aos padrões de lançamento em corpos hídricos (Moyo *et al.*, 2015).

O uso sustentável de águas residuárias no setor agrícola requer uma gestão de utilização adequada e monitoramento periódico dos solos irrigados com águas residuárias, a fim de abordar com precisão as compensações envolvidas na irrigação de águas residuárias. A depender da fonte de água de reúso, os benefícios podem incluir o aumento de macronutrientes do solo (N, P e K) e micronutrientes (Fe, Se e Zn) que podem aumentar a fertilidade do solo e a produtividade das culturas (Szerement *et al.*, 2022). Jaramilo (2017) mostrou que a irrigação de águas residuárias pode suprir de 50 a 100% das necessidades de fertilizantes de certas culturas (por exemplo, milho e trigo), o que tem implicações profundas para a economia da produção.

Segundo Nutti (2010), alimentos biofortificados são uma forma sustentável e de baixo custo para ajudar no combate à desnutrição de populações carentes. A biofortificação é uma

técnica agrícola que consiste em aumentar o teor de micronutrientes de cultivares básicas, como por exemplo o feijão, o milho e a batata, podendo ser realizada por melhoramento genético, transgenia ou fortificação agronômica via aplicação de fertilizantes no solo, nas folhas ou nas sementes (Inocencio, 2014; Silva, 2017).

Diante deste cenário, o presente estudo pretende relacionar o uso do esgoto tratado como fonte de biofortificação e como uma prática vantajosa do ponto de vista econômico e segura sob a perspectiva ambiental e de saúde pública.

REFERENCIAL TEÓRICO

Qualidade da Água de Reúso para Irrigação Agricultura e suas Vantagens

Com a escassez de água afetando grande parte do mundo, diversas estratégias têm sido implementadas para reduzir a dependência da captação de águas superficiais e subterrâneas para variados usos. Esse problema é especialmente grave nas áreas rurais, onde o consumo de água para irrigação agrícola é elevado. Nesse cenário, o uso de efluentes de estações de tratamento de esgoto (ETE) na agricultura tem despertado grande interesse. No entanto, para que essa prática seja segura e vantajosa economicamente, o esgoto sanitário precisa ser adequadamente tratado para uso agrícola. Além disso, é necessário adotar práticas de manejo que minimizem os riscos sanitários (Marques *et al.*, 2022).

Segundo Saliba *et al.* (2018), mais de 90% das águas residuárias residuárias usadas na irrigação agrícola não são tratadas, especialmente em países em desenvolvimento. Por isso, é essencial planejar adequadamente o método de aplicação dos efluentes tratados, a fim de evitar a contaminação microbiana dos produtos finais, reduzir a dispersão de contaminantes no ar e garantir a segurança dos operadores do sistema.

Os avanços tecnológicos no tratamento e reutilização de águas residuárias possibilitaram sua aplicação em diversas áreas, desde a revitalização de ecossistemas aquáticos até a conformidade com rígidos padrões de qualidade de água potável (Jodar-Abellan *et al.*, 2019). O uso de efluentes na agricultura, como os provenientes de ETEs, requer a identificação de um elemento químico de referência, que pode ser um nutriente essencial ao crescimento das plantas, como nitrogênio, fósforo e potássio, ou substâncias indesejáveis que possam comprometer a qualidade do solo, das plantas e das águas subterrâneas, como sódio, boro e metais pesados

(Matos e Matos, 2017). Com base nessa identificação, é calculada a dose máxima de água residuária a ser aplicada, evitando sobrecarga nutricional nas plantas e a introdução de substâncias prejudiciais no sistema.

A qualidade do efluente é fundamental para seu uso agrícola e é regulada por leis, normas e resoluções. O tratamento do esgoto deve atender aos padrões estabelecidos para garantir a segurança do uso. O efluente de ETE pode apresentar desafios, como elevados níveis de sólidos, salinidade, pH inadequado, excesso de elementos químicos e presença de patógenos (Ayers e Westcot, 1985; Marques *et al.*, 2017; Matos e Matos, 2017).

Os efluentes de ETE contêm diversos elementos químicos, alguns dos quais são nutrientes para as plantas, enquanto outros são potenciais poluentes. O solo tem uma capacidade tampão para neutralizar a entrada desses elementos, mas a contaminação ocorre quando essa capacidade é ultrapassada (Matos e Matos, 2017). Por isso, é essencial conhecer a origem e as características do efluente antes de sua aplicação no solo (Mekki *et al.*, 2014). Elementos não nutritivos em excesso podem causar fitotoxicidade e outros riscos ambientais (Bakari *et al.*, 2019), como o sódio (Na), ferro (Fe), boro (B), cobre (Cu), manganês (Mn), alumínio (Al) e cloretos.

Efluentes predominantemente de origem doméstica, com pouca contribuição industrial, geralmente apresentam esses elementos em concentrações abaixo dos níveis tóxicos para o solo e as plantas. O pH do efluente, que geralmente se aproxima da neutralidade, ajuda a minimizar problemas na fertirrigação. Recomenda-se que o pH se mantenha entre 6 e 9. A quantidade de nutrientes aplicada deve corresponder à capacidade de absorção das plantas, com a dose máxima de efluente sendo definida com base no elemento químico de referência. Definir valores de referência para as variáveis físico-químicas do efluente no solo é uma tarefa complexa, pois o solo muda gradualmente e torna difícil estabelecer limites absolutos. Mudanças de 10 a 20% nos valores de referência só são relevantes quando consideradas em conjunto com outros fatores que afetam o rendimento agrônômico (Ayers e Westcot, 1985; Pescod, 1992). Embora haja valores de referência estabelecidos, a habilidade de gerenciamento do usuário pode influenciar a interpretação e aplicação desses valores (Matos e Matos, 2017).

O uso de efluentes de ETE na agricultura é atraente por sua riqueza em nutrientes essenciais para as plantas, o que reduz a necessidade de adubos minerais nos cultivos (Kihila *et al.*, 2014), além de suprir parte das demandas hídricas das plantas. O efluente também está disponível durante todo o ano, principalmente em municípios com sistemas de esgotamento sanitário, reduzindo os custos associados a técnicas de remoção de nutrientes e ao atendimento

de padrões ambientais rigorosos para descarte em corpos d'água (Moyo *et al.*, 2015).

O uso sustentável de águas residuárias na agricultura exige gestão criteriosa e monitoramento contínuo dos solos irrigados com essas águas para garantir um equilíbrio adequado (Rezapour *et al.*, 2012). Dependendo da origem da água de reúso, os benefícios podem incluir o aumento de macronutrientes (N, P e K) e micronutrientes (Fe, Mn, Zn e Cu), melhorando a fertilidade e produtividade das culturas (Rezapour *et al.*, 2011). Em algumas culturas, como milho e trigo, a irrigação com águas residuárias pode suprir entre 50% e 100% das necessidades de fertilizantes, o que traz benefícios econômicos significativos para a agricultura. No entanto, o acúmulo de metais pesados e poluentes orgânicos devido ao uso de águas residuárias não tratadas pode representar um risco para a saúde do sistema solo-água-planta (Rezapour *et al.*, 2012; Andrews *et al.*, 2002).

A utilização agrícola de esgoto sanitário tratado se mostra uma alternativa importante para a recuperação de recursos, agregando valor aos sistemas produtivos e diminuindo a dependência de adubos minerais e fontes de água para irrigação (Marques *et al.*, 2022). Entretanto, a aceitação mais ampla dessa prática ainda enfrenta desafios, já que muitos desconhecem seus benefícios potenciais, como a recuperação de nutrientes e a economia de água. A reutilização de águas residuárias tratadas contribui para reduzir o descarte de efluentes em corpos d'água naturais e oferece uma fonte confiável de água para usos que não requerem alta qualidade. Isso promove a conservação dos recursos de água potável, que tendem a ser escassos em muitas regiões. A reutilização de águas residuárias é especialmente vantajosa em áreas áridas e semiáridas, onde a água é limitada, ou em cenários onde o tratamento avançado é energeticamente caro e as descargas de efluentes poluem as águas superficiais (Mañas e Heras, 2024).

O uso de água recuperada na irrigação agrícola não apenas economiza recursos hídricos, mas também apoia a economia circular, permitindo o reaproveitamento de nutrientes através da fertirrigação. Com isso, é possível reduzir a necessidade de fertilizantes minerais adicionais, contribuindo para a sustentabilidade do sistema (Radley-Gardner *et al.*, 2016).

DIRETRIZES PARA O USO DO EFLUENTE TRATADO NA AGRICULTURA

Além do estabelecimento de normas federais sobre corpos receptores e padrões de lançamento de efluentes, conforme as Resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama) nº 357, de 17 de março de 2005 (Brasil, 2005), e nº 430, de 13 de maio de 2011 (Brasil,

2011), órgãos ambientais estaduais vêm estudando e propondo padrões de qualidade para o reúso de efluentes tratados, voltados para fins não potáveis. Isso legaliza mais uma ferramenta relevante na gestão dos recursos hídricos. Segundo Mota et al. (2007), a reutilização da água é uma medida eficaz para o controle da poluição e uma alternativa importante para aumentar a oferta em regiões com escassez de recursos hídricos. Dessa forma, o reúso planejado se torna uma prática essencial para reduzir a exploração de mananciais e a demanda por água bruta, uma vez que muitos usos podem ser atendidos com água de qualidade inferior.

Conforme Hespanhol (2003), é essencial institucionalizar, regulamentar e promover o reúso de água no Brasil, de forma que a prática siga princípios técnicos adequados, seja economicamente viável, socialmente aceita e segura do ponto de vista ambiental. Para isso, é necessária uma legislação federal que oriente a criação de legislações estaduais e municipais, visando a padronização de parâmetros e assegurando a qualidade físico-química e microbiológica da água reutilizada, respeitando as particularidades locais.

A regulamentação do reúso de água começou em 1918, na Califórnia (EUA), com a aplicação de esgoto tratados em culturas que não são consumidas cruas (Angelakis et al., 2018; Shoushtarian e Negahban-Azar, 2020). A Organização Mundial da Saúde (OMS) publicou suas primeiras diretrizes para o reúso de água na irrigação em 1973, e, em 2006, introduziu diretrizes de risco microbiológico para o uso da água na agricultura (Tabela 1). Em 2017, a OMS utilizou a metodologia de Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico (AQRM) para estabelecer um guia sobre a produção de água potável a partir do reúso (OMS, 2017).

Tabela 1

Diretrizes para monitoramento em sistemas de tratamento em grande escala de águas cinza para uso na agricultura

Água cinza para uso em	Ovos de helmintos (número L ⁻¹)	<i>E. coli</i> (número 100mL ⁻¹)
Irrigação restrita ^a	< 1	< 100.000 ^b Flexibilizado para < 1.000.000 quando a exposição é limitada ^c ou o recrescimento é provável.
Irrigação irrestrita de culturas a serem ingeridas cruas	< 1	< 1.000 Flexibilizado para < 10.000 para culturas que se desenvolvem distantes do nível do solo ou irrigação por gotejamento.

Fonte: Adaptado de Santos (2021)

Nota: ^a Uso de água residuária para irrigar culturas não consumidas cruas por humanos (OMS, 2006b). ^b Esses valores são aceitáveis devido ao alto potencial de recrescimento de *E. coli* e outros coliformes fecais em água cinza. ^c A limitação pode ser obtida, entre outras, pelo uso de irrigação localizada e morte de organismos em função do intervalo de tempo entre a irrigação e a colheita (OMS, 2006).

A USEPA também propõe parâmetros e padrões de diversas modalidades de reúso da água, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2

Modalidades de reúso e parâmetros e padrões físico-químicos recomendados

Modalidades de reúso	Parâmetros recomendados
Irrigação com acesso restrito proibido ou pouco frequente: gramados, áreas florestadas. Represas paisagísticas: em que o contato primário não é permitido Reúso na construção civil: compactação do sono, controle de poeira, lavagem de agregado e preparo de concreto.	pH: 6 a 9
	DBO $\leq$ 30 mg/L
	SST $\leq$ 30 mg/L
	CF – Não detectável
Reúso agrícola: plantação de alimentos que não são processados industrialmente, irrigação de superfície por aspersão de quaisquer alimentos, incluindo aqueles que podem ser consumidos crus.	Cloro residual $\geq$ 1 mg/L
	pH: 6 a 9
	DBO $\leq$ 10 mg/L
	Turbidez $\leq$ 2 uT/L
Reúso agrícola: plantação de alimentos processados industrialmente, irrigação de superfície de pomares e vinhedos. Reúso agrícola: plantação de não alimentos (pasto para gado, forragem, fibras, grãos). Reúso industrial: torres de resfriamento	CF – Não detectável
	Cloro residual $\geq$ 1 mg/L
	pH: 6 a 9
	DBO $\leq$ 30 mg/L
Reúso urbano: todos os tipos de irrigação de áreas ajardinadas (campos de golfe, cemitérios, lavagem de carros, descargas de banheiros, combate a incêndio, sistemas comerciais de ar condicionado e outros usos com acesso a exposição semelhante à água). Represas de uso recreacional: contato secundário (como pesca, e remo) ou contato primário quando permitido	SST $\leq$ 30 mg/L
	CF $\leq$ 200/100 mL
	Cloro residual $\geq$ 1 mg/L
	pH: 6 a 9
	DBO $\leq$ 10 mg/L
	Turbidez $\leq$ 2 uT
	CF – Não detectável
	Cloro residual $\geq$ 1 mg/L

Fonte: USEPA (2004).

Os primeiros estados brasileiros a estabelecer critérios e regulamentações para o reúso de água foram a Bahia (2010), Ceará (2017), São Paulo (2017), Minas Gerais (2020) e Rio Grande do Sul (2020) (Santos *et al.*, 2020). Com o acúmulo de experiências e o desenvolvimento de tecnologias capazes de produzir água de melhor qualidade, além do aumento da demanda por usos mais exigentes, as regulamentações passaram por atualizações para incluir padrões mais restritivos, especialmente para usos mais nobres, como o reúso para fins potáveis. Na Tabela 3, são apresentados cronologicamente os padrões de qualidade da água de reúso para diferentes

modalidades e os principais aspectos das diretrizes do Programa Interáguas, assim como das legislações estaduais que estabelecem padrões de reúso no Brasil. Além dos diferentes padrões estabelecidos, observam-se aspectos específicos relacionados: (i) à definição de responsabilidades para os produtores, distribuidores e usuários da água de reúso; (ii) à exigência de licenciamento obrigatório; (iii) à abordagem dos riscos microbiológicos à saúde pública e ao meio ambiente; (iv) aos níveis de restrição para cada tipo de reúso; (v) à frequência de monitoramento; e (vi) à indicação de tecnologias de tratamento de esgoto necessárias para alcançar a qualidade definida nos padrões (Santos e Lima, 2022).

Em relação ao reúso de água, apesar da evolução geral da regulamentação no Brasil e no mundo, o país conta atualmente com uma base legal insatisfatória para a sistematização dessa prática. Os principais aspectos levantados para a elaboração de uma regulamentação da prática de reúso são: a abordagem das tipologias de reúso alinhadas aos padrões compatíveis com as tecnologias de tratamento de esgoto de amplo domínio da engenharia e da capacidade de pagamento dos usuários no território nacional, entre outras (Santos e Lima, 2022).

RISCOS A SAÚDE

O uso de águas residuárias na irrigação exige uma análise cuidadosa de diversos fatores ambientais e agrícolas, como a demanda hídrica das plantas, o manejo da irrigação e a drenagem do solo. A quantidade exata de água necessária deve ser definida com base nas condições climáticas locais e nas características das culturas, sendo essencial evitar o excesso de aplicação. O manejo eficiente da irrigação, realizado no momento e na quantidade adequada, é fundamental para minimizar a lixiviação de contaminantes e a perda de água por evaporação. Solos com boa drenagem interna facilitam a remoção de sais para além da zona radicular das plantas, mas também aumentam o risco de contaminação do lençol freático (Braga e Lima, 2014).

No que se refere aos riscos microbiológicos, os patógenos presentes nas águas de reúso, relevantes para a saúde humana e ambiental, incluem bactérias, helmintos, protozoários e vírus (Mancuso e Santos, 2013). Estudos recentes apontam a presença de microrganismos patogênicos em águas de reúso, que podem representar riscos à saúde pública, mesmo após tratamento com desinfecção por cloro. Patógenos como norovírus (Francy *et al.*, 2012; Eftim *et al.*, 2017), *Salmonella* spp. (Francy *et al.*, 2012) e *Cryptosporidium* (Lim, Wu, Jiang, 2017) têm sido identificados, além de bactérias como *Escherichia coli* e o grupo de geohelmintos (Mancuso e

Santos, 2013).

Tabela 3

Padrões de qualidade da água de reúso para diferentes modalidades

Regulamentos	Padrões de reúso	Modalidades de reúso	Aplicabilidade e aspectos relevantes
Bahia - Resolução CONERH nº 75/2010	Categoria A: Coliformes: 103 Org·100 mL ⁻¹ (Ct). Categoria B: Coliformes: 104 Org·100 mL ⁻¹ (Ct).	Categoria A: irrigação, inclusive hidroponia, de qualquer cultura incluindo produtos alimentícios consumidos crus. Categoria B: irrigação, inclusive hidroponia, de produtos alimentícios não consumidos crus e não alimentícios, forrageiras, pastagens, árvores, revegetação e recuperação de áreas degradadas	Fins agrícolas e/ou florestal; sem restrição de nível de tratamento; características recomendadas pela OMS; apresenta responsabilidades para o produtor da água de reúso.
Ceará - Resolução COEMA nº 02/20171	Urbano (exceto irrigação paisagística): Coliformes: 5 x 103 Org·100 mL ⁻¹ (Ct). Irrigação paisagística: Coliformes: 103 Org·100 mL ⁻¹ (Ct). Agrícola/florestal-a – Coliformes: ND Org·100 mL ⁻¹ (Ct). Agrícola/florestal-b – Coliformes: 103 Org·100 mL ⁻¹ (Ct). Ambiental - Coliformes: 104 Org·100 mL ⁻¹ (Ct). Aquicultura - Coliformes: 103 Org·100 mL ⁻¹ (Ct).	Urbano: irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações e combate de incêndio em área urbana. Agrícola/florestal-a: culturas a serem consumidas cruas, cuja parte consumida tenha contato direto com a água de irrigação. Agrícola/florestal-b: demais culturas. Ambiental: implantação de projetos de recuperação do meio ambiente. Aquicultura: criação de animais e cultivo de vegetais aquáticos.	Voltado para lançamento de efluentes, reúso direto de água, reúso externo (agrícola/florestal, urbano, ambiental, industrial e aquicultura) e reúso interno; apresenta padrões mais restritivos para uso agrícola florestal-a.
Programa Interáguas - 2018	Agrícola restrito – Coliformes: 103 Org·100 mL ⁻¹ (Ct); DBO: 30 mg·L ⁻¹ ; Cloro residual livre: > 1,0 mg·L ⁻¹ . Agrícola irrestrito – Coliformes: 10 Org·100 mL ⁻¹ (Ct); Turbidez: 5 NTU; DBO: 15 mg·L ⁻¹ ;	Agrícola irrestrito: irrigação de cultura alimentícia que se desenvolve rente ao solo sem processamento prévio. Agrícola restrito: irrigação de cultura alimentícia que se desenvolve distante do solo sem ou após processamento prévio; irrigação de culturas não destinadas ao consumo humano; cultivo de florestas plantadas. Urbano irrestrito: irrigação paisagística, bacias sanitárias e lavagem de logradouros. Urbano restrito: irrigação paisagística e	Voltado para fins agrícolas, urbano, ambiental, industrial e aquicultura; apresenta níveis de tratamento mínimos; recomendações de licenciamento para cada tipo de reúso; considera-se as dimensões ambientais, econômico-financeira, social, cultural e de saúde pública.

	Cloro residual livre: $> 1,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ · Urbano restrito – Coliformes: $103 \text{ Org}\cdot 100 \text{ mL}^{-1} \text{ (Ct)}$; Turbidez: 5 NTU; DBO: $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Cloro residual livre: $> 1,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ · Urbano irrestrito – Coliformes: $10 \text{ Org}\cdot 100 \text{ mL}^{-1} \text{ (Ct)}$; Turbidez: 5 NTU; DBO: $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Cloro residual livre: $> 1,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ · Industrial – Coliformes: $103 \text{ Org}\cdot 100 \text{ mL}^{-1} \text{ (Ct)}$. Ambiental – Coliformes: $103 \text{ Org}\cdot 100 \text{ mL}^{-1} \text{ (Ct)}$; DBO: $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ · Aquicultura – Coliformes: $103 \text{ Org}\cdot 100 \text{ mL}^{-1} \text{ (Ct)}$; DBO: $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	outros usos em áreas restritas, tais como desobstrução de redes de esgoto, construção civil, lavagem de veículos e combate a incêndio. Industrial: Aplicação em vários processos e atividades industriais. Ambiental: Aplicação em lagoas urbanas, manutenção de wetlands e aumento da disponibilidade hídrica para fins ambientais. Aquicultura: criação de peixe ou cultivo de vegetais aquáticos.	
São Paulo - Resolução Conjunta SES/ SIMA nº 01/2020	Classe A – Coliformes: ND (Ct/E.coli); Turbidez: 2 NTU; DBO: $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Cloro residual livre: $\geq 1,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ · Classe B – Coliformes: $200 \text{ Org}\cdot 100 \text{ mL}^{-1} \text{ (Ct)}$, $120 \text{ Org}\cdot 100 \text{ mL}^{-1} \text{ (E. coli)}$; DBO: $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; SST: $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; Cloro residual total: $\geq 1,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Classe A (Irrestrito): irrigação paisagística; lavagem de logradouros e espaços públicos e privados; construção civil; desobstrução de galerias; lavagem de veículos; combate a incêndio. Classe B (Restrito): exclusivamente a todos os anteriores, exceto combate a incêndio.	Fins urbanos; restritivos em relação aos padrões; tratamento mínimo secundário, desinfecção e filtração; apresenta atribuições para produtor e usuário da água de reúso; identificação dos veículos e tanques.
Rio Grande do Sul - Resolução	Urbano Classe A – Coliformes: $200 \text{ Org}\cdot 100 \text{ mL}^{-1} \text{ (Ct)}$; Cloro residual total: $< 1,0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.	Urbano Classe A (irrestrito): irrigação paisagística em locais de acesso irrestrito, lavagem de logradouros e veículos. Urbano	Voltado para fins urbanos, industriais, agrícola e florestais; licenciamento ambiental

CONSEMA nº 419/2020	Urbano Classe B – Coliformes: 103 Org·100 mL⁻¹ (Ct). Agrícola/florestal – Coliformes: 104 Org·100 mL⁻¹ (Ct).	Classe B (restrito): irrigação paisagística em locais de acesso limitado ou restrito, abatimento de poeira, construção civil, ETEs e desobstrução de tubulações. Agrícola/florestal: irrigação de qualquer cultura, exceto frutos, hortaliças, raízes e tubérculos com contato direto com o solo ou com a água para consumo humano na forma crua.	para o gerador ou usuário da água de reúso.
Minas Gerais - Deliberação Normativa CERH nº 65/2020	Agrossilvipastoril amplo – Coliformes: 104 Org·100 mL⁻¹ (Ct/E. coli). Agrossilvipastoril limitado – Coliformes: 106 Org·100 mL⁻¹ (Ct/E. coli). Urbano amplo – Coliformes: 103 Org·100 mL⁻¹ (Ct/E. coli). Urbano limitado (exceto desobstrução de galerias) - Coliformes: 104 Org·100 mL⁻¹ (Ct/E. coli). Desobstrução de galerias: 107 Org·100 mL⁻¹ (Ct/E. coli)	Agrossilvipastoril amplo: fertirrigação superficial, localizada ou por aspersão. Agrossilvipastoril limitado: fertirrigação superficial ou localizada, evitando contato da água de reúso com o produto alimentício. Urbano amplo: lavagem de pátios, logradouros ou outros com exposição similar; lavagem de veículos comuns; descargas sanitárias. Urbano limitado: lavagem de veículos especiais e externa de trens e aviões, controle de poeira, combate a incêndio, desobstrução de galerias.	Voltado para fins agrossilvipastoris², urbanos, ambientais e industriais; padrões mais flexíveis; objetiva a aplicação e o incentivo da prática; padrões para reúso em fertirrigação; apresenta responsabilidades para o produtor, distribuidor e usuário da água de reúso.

Fonte: (Santos e Lima, 2022).

A contaminação por patógenos pode ocorrer em qualquer modalidade de reúso. No entanto, algumas práticas, como a irrigação por gotejamento com águas residuárias, apresentam menor risco. Os maiores riscos surgem quando há contato direto com a água de reúso, como durante a irrigação por aspersão, que pode contaminar alimentos destinados ao consumo humano e animal, além de possibilitar a inalação de aerossóis e o contato por meio da pele (Mancuso e Santos, 2013).

Apesar dos riscos relacionados à exposição rotineira ou acidental à água de reúso com microrganismos, isso não significa que todos os indivíduos expostos desenvolverão doenças. Além da patogenicidade do microrganismo, a saúde da pessoa exposta, incluindo seu sistema imunológico e nutricional, bem como o tipo de contato, são fatores determinantes. A presença de patógenos na água indica um risco elevado de contrair doenças (Côrtes, 2010; Pinto *et al.*, 2014). Entre as enfermidades e problemas ambientais associados ao reúso de água contaminada estão gastroenterite, disenteria, febre tifoide, eutrofização de corpos d'água, toxicidade para plantas e danos aos ecossistemas aquáticos.

CONCLUSÃO

O reúso de águas residuárias tratadas na agricultura é uma estratégia viável e promissora para suprir simultaneamente demandas hídricas e nutricionais das culturas, respondendo positivamente à questão central da pesquisa. A literatura demonstra que o efluente proveniente de ETE, quando manejado adequadamente, é capaz de fornecer significativa parcela de macro e micronutrientes essenciais, reduzir a dependência de fertilizantes minerais e favorecer o aumento da produtividade agrícola, especialmente em regiões áridas e semiáridas, onde a disponibilidade hídrica é limitada.

A utilização de águas de reuso na agricultura promove maior segurança hídrica, reduz custos de produção e fortalece a agricultura familiar, ao mesmo tempo em que oferece meios para ampliar a qualidade nutricional dos alimentos por meio da biofortificação. No âmbito científico, o estudo reforça a importância de integrar conhecimentos das áreas de saneamento, agronomia, nutrição e saúde pública, contribuindo para o avanço teórico e metodológico sobre reúso de água, manejo de nutrientes e avaliação de riscos.

As principais lacunas existentes na pesquisa, estão relacionadas à ausência de uma regulamentação federal abrangente no Brasil, à variabilidade na qualidade dos efluentes entre

diferentes regiões, e à carência de estudos de longo prazo que avaliem impactos cumulativos no solo, nas plantas e na saúde humana. Além disso, poucos trabalhos abordam de forma integrada a interação entre reúso agrícola e biofortificação, o que representa um campo ainda emergente e pouco explorado.

Diante disso, recomenda-se que futuras pesquisas aprofundem o monitoramento de parâmetros físico-químicos e microbiológicos em diferentes sistemas de irrigação, realizem análises de risco quantitativas e explorem o potencial da biofortificação agrônômica com nutrientes presentes nos efluentes, especialmente em cultivos básicos como arroz, milho, feijão e hortaliças. Também se destaca a necessidade de avanços na regulamentação nacional e na aceitação pública do reúso, com políticas que aprimorem a segurança sanitária, a eficiência do tratamento e a adoção de tecnologias apropriadas.

Sendo assim o reúso de efluentes tratados aliado à biofortificação agrônômica constitui numa estratégia integrada e de alto potencial para a agricultura sustentável, desde que apoiada por práticas de manejo adequadas, instrumentos normativos consistentes e esforços contínuos de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2002). *The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method*. *Soil Science Society of America Journal*.
- Angelakis, A. N., Asano, T., Bahri, A., Jimenez, B., & Tchobanoglous, G. (2018). *Water reuse: From ancient to modern times and the future*. *Agricultural Water Management*.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper 29). FAO.
- Bakari, Z., et al. (2019). *Assessment of wastewater irrigation impacts on soil and plant contamination*. *Environmental Monitoring and Assessment*.
- Braga, B., & Lima, J. E. F. W. (2014). *Recursos hídricos e irrigação no Brasil*. EMBRAPA.
- Brasil. (2005). *Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005*.
- Brasil. (2011). *Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011*.
- Côrtes, J. A. (2010). *Doenças de veiculação hídrica: Fundamentos e riscos*. FUNASA.
- Eftim, S., et al. (2017). *Occurrence of norovirus in reclaimed water*. *Water Research*.

- Francy, D. S., et al. (2012). *Occurrence of pathogens in wastewater reuse. Applied and Environmental Microbiology.*
- Hespanhol, I. (2003). *A reutilização de água no Brasil: Oportunidades e restrições. Revista DAE.*
- Inácio, C. T., et al. (2018). *Biofortification strategies for micronutrient improvement in crops. Journal of Agricultural Science.*
- Inocencio, M. F. (2014). *Biofortificação agrônômica: Avanços e desafios. Revista Brasileira de Ciências Agrárias.*
- Jaramillo, M. F. (2017). *Wastewater irrigation and nutrient supply in agriculture. Agricultural Water Management.*
- Jodar-Abellan, A., et al. (2019). *Wastewater reuse trends and perspectives. Water.*
- Kama, et al. (2023). *Global wastewater production and agricultural water demand. Journal of Environmental Management.*
- Keith, L. M., et al. (2018). *Agronomic biofortification: Techniques and applications. Journal of Plant Nutrition.*
- Kihila, J., et al. (2014). *Reuse of treated wastewater as fertilizer and irrigation water. Physics and Chemistry of the Earth.*
- Kumar, et al. (2019). *Biofortification strategies for improving micronutrient content. Plant Science Today.*
- Libutti, A., et al. (2018). *Reuse of treated municipal wastewater for agriculture. Agricultural Water Management.*
- Lim, M., Wu, J., & Jiang, S. (2017). *Occurrence of Cryptosporidium in reclaimed water. Water Research.*
- Lonigro, A., et al. (2016). *Irrigation with treated wastewater: Impacts and perspectives. Agricultural Water Management.*
- Mancuso, P. C. S., & Santos, H. F. (2013). *Reúso de água. Manole.*
- Mañas, A. M., & Heras, J. (2024). *Water reuse and circular economy in agriculture. Resources, Conservation and Recycling.*
- Marques, L. A., et al. (2017). *Agricultural use of treated sewage effluent. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental.*
- Marques, L. A., et al. (2022). *Reuso de efluente de ETE na agricultura. Engenharia Ambiental.*
- Matos, A. T., & Matos, M. P. (2017). *Irrigação com água residuária: Qualidade e manejo. Revista Engenharia na Agricultura.*

- Mekki, A., et al. (2014). *Wastewater reuse and soil quality. Environmental Monitoring and Assessment*.
- Mota, F. S. B., et al. (2007). *Reúso planejado de água no Brasil. Revista DAE*.
- Moyo, M., et al. (2015). *Wastewater irrigation: Effects on soil and crops. Water SA*.
- Natasha, N., et al. (2020). *Global wastewater volumes and reuse potential. Scientific Reports*.
- Nutti, M. (2010). *Biofortificação no combate à fome oculta. EMBRAPA*.
- OMS. (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater in agriculture*.
- OMS. (2017). *Potable reuse: Guidance for producing safe drinking water*.
- Pescod, M. B. (1992). *Wastewater treatment and reuse in agriculture. FAO*.
- Pinto, U., et al. (2014). *Public health risks from wastewater reuse. Journal of Water and Health*.
- Prom-U-Thai, et al. (2020). *Micronutrient enrichment in crops through fertilization. Journal of Plant Nutrition*.
- Radley-Gardner, O., et al. (2016). *Circular economy and nutrient recovery. Journal of Cleaner Production*.
- Rezapour, S., et al. (2011). *Soil and crop response to long-term wastewater irrigation. Soil Science*.
- Rezapour, S., et al. (2012). *Heavy metal accumulation under wastewater irrigation. Environmental Earth Sciences*.
- Saliba, R., et al. (2018). *Wastewater irrigation practices and risks in developing countries. Environmental Science and Pollution Research*.
- Santos, H. F. (2021). *Reúso seguro de água e diretrizes internacionais. UNESP*.
- Santos, H. F., & Lima, A. A. (2022). *Diretrizes para reúso de água no Brasil. Revista DAE*.
- Santos, H. F., et al. (2020). *Regulamentação do reúso no Brasil. Revista DAE*.
- Shoushtarian, F., & Negahban-Azar, M. (2020). *Worldwide regulations on water reuse. Water*.
- Silva, E. R. (2017). *Biofortificação de alimentos: Fundamentos e aplicações. UFRN*.
- Szerement, J., et al. (2022). *Micronutrient uptake and agronomic biofortification. Environmental Geochemistry and Health*.
- USEPA. (2004). *Guidelines for water reuse. U.S. Environmental Protection Agency*.
- Valeriano, P. F., et al. (2018). *Agricultura sustentável no semiárido. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola*