

TRATAMENTO DE ÁGUA PRODUZIDA PARA IRRIGAÇÃO: UMA REVISÃO DA LITERATURA

N. R. SÁ^{1,*}, L. E. R. BEZERRA², L. P. S. ROSA³

^{1,2,3} UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE, SÃO CRISTOVÃO, BRASIL

*nathalia.2002.sa@gmail.com

Este estudo tem como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre as técnicas de tratamento da água produzida (AP) para reuso na irrigação agrícola. Para tal, realizou-se uma revisão da literatura no *Google Scholar* e no Portal de Periódicos CAPES. Os resultados indicam que sistemas multi-barreira combinando pré-tratamento, processos de membranas (como osmose reversa) e adsorção são os mais empregados e atingem eficiências de remoção de contaminantes entre 95-97%, viabilizando o efluente para uso agrônomo seguro e representando uma opção frente a escassez hídrica.

Palavras-chave: Água produzida, tecnologias de tratamento, irrigação e reuso agrícola.

INTRODUÇÃO

As regiões áridas e semiáridas, que cobrem 41% da superfície terrestre e abrigam 2,1 bilhões de pessoas, enfrentam uma escassez de água cada vez mais intensa, agravada pelas mudanças climáticas. Essas mesmas regiões são responsáveis por 44% da produção mundial de alimentos e sustentam 50% do rebanho global, o que torna a disponibilidade hídrica uma questão crítica para a segurança alimentar (Echchel et al., 2018).

Nesse contexto, a água produzida (AP), historicamente tratada como resíduo, passou a ser reconhecida como um recurso hídrico alternativo estratégico (Abdelhamid et al., 2025), especialmente porque as principais regiões produtoras de hidrocarbonetos frequentemente coincidem com regiões áridas e semiáridas (Echchel et al., 2018).

A AP é o principal efluente gerado durante as atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural. Ela é trazida à superfície juntamente com o óleo e o gás e resulta da mistura entre a água naturalmente presente nos reservatórios e os fluidos injetados que retornam durante o processo produtivo. O volume gerado é expressivo: somente nos Estados Unidos foram gerados mais de 25 bilhões de barris de AP em 2021, um aumento de 6% em relação a 2017 (Abdelhamid et al., 2025).

A composição da AP é extremamente complexa e variável. Nela já foram identificados pela EPA (*Environmental Protection Agency*) mais de 600 compostos químicos distintos, contendo compostos orgânicos como hidrocarbonetos, incluindo BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos), ácidos

orgânicos, óleos e graxas (Ali et al., 2021; Abdelhamid et al., 2025). Contém ainda sais dissolvidos, metais pesados como Fe, Cr, Cd, Se, Mo, V, Ni e Zn (Ali et al., 2021), além de aditivos químicos e material radioativo de ocorrência natural (Edirisooriya et al., 2026). Essa composição pode variar de acordo com a geologia da formação, o tipo de hidrocarboneto produzido, a idade do reservatório e os aditivos utilizados nas operações (Ali et al., 2021; Edirisooriya et al., 2026).

A presença de contaminantes como hidrocarbonetos, metais pesados e sais dissolvidos impede que a AP seja utilizada diretamente em qualquer aplicação, exigindo tratamento prévio. Por isso, apesar do seu potencial como recurso hídrico alternativo, ela é majoritariamente descartada. Globalmente, cerca de 45% de toda a AP gerada, aproximadamente 8,5 bilhões de m³ anuais, não recebe qualquer aproveitamento benéfico, sendo destinada à injeção em poços profundos ou ao descarte superficial (Echchel et al., 2018). Somente na Bacia Permian, nos Estados Unidos, 44% do volume produzido é descartado via poços de injeção (Edirisooriya et al., 2026). Essa prática, embora amplamente utilizada, está associada a impactos ambientais significativos, como a contaminação de aquíferos e lençóis freáticos (Ali et al., 2021), além da ocorrência de eventos sísmicos induzidos pelo aumento da pressão subterrânea (Edirisooriya et al., 2026).

Diante da complexidade da AP, seu aproveitamento exige sistemas de tratamento capazes de remover os mais diversos contaminantes. As tecnologias disponíveis abrangem desde métodos físicos convencionais, como sedimentação gravitacional,

hidrociclones e flotação a gás, até processos avançados de separação por membranas, como osmose reversa (OR) e destilação por membranas (Abdelhamid *et al.*, 2025). O tratamento primário, que remove óleo e sólidos suspensos, alcança cerca de 80% de eficiência, enquanto estágios secundários, baseados em catálise biológica e química, podem remover até 99% dos hidrocarbonetos residuais (Ali *et al.*, 2021). Complementarmente, processos oxidativos avançados (AOPs), como ozonização e fotocatálise, têm sido investigados para degradar compostos orgânicos recalcitrantes (Abdelhamid *et al.*, 2025). A tendência atual é a combinação de diferentes métodos em sistemas multi-barreira, que integram as vantagens de cada tecnologia para enfrentar a variabilidade da composição da AP (Abdelhamid *et al.*, 2025; Ali *et al.*, 2021).

Uma vez tratada, a AP pode ter diferentes destinos. Globalmente, a maior parte é reinjetada para recuperação avançada de petróleo (52-56%), enquanto o reuso benéfico, que inclui irrigação agrícola, dessedentação animal e recarga de aquíferos, ainda representa uma fração minoritária, cerca de 3% do volume total, com projeção de crescimento para 7% até 2020 (Echchelh *et al.*, 2018). Dentre essas aplicações, a irrigação agrícola desponta como uma das mais promissoras, especialmente porque as principais regiões produtoras de hidrocarbonetos frequentemente coincidem com áreas áridas e semiáridas que enfrentam escassez hídrica crônica (Echchelh *et al.*, 2018; Edirisooriya *et al.*, 2026). O aproveitamento da AP para irrigação, inclusive para culturas comerciais como o algodão (Ali *et al.*, 2021), insere-se diretamente nonexo energia-água-alimento, oferecendo uma fonte hídrica alternativa capaz de revitalizar o setor agrícola nessas regiões (Edirisooriya *et al.*, 2026).

Diante desse panorama, este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre as técnicas de tratamento de água produzida aplicadas ao reuso na irrigação agrícola. Busca-se compilar e analisar as principais tecnologias empregadas, os parâmetros de qualidade exigidos e as discussões científicas acerca da viabilidade agrônômica e ambiental dessa prática, identificando lacunas de conhecimento e tendências para pesquisas futuras.

MATERIAL E MÉTODOS

Esta revisão da literatura tem como objetivo compilar e analisar as principais técnicas utilizadas no tratamento de água produzida, avaliando as tecnologias mais empregadas, os parâmetros de qualidade exigidos e as discussões científicas acerca da viabilidade desse efluente na irrigação agrícola.

Para tanto, foi realizado um levantamento bibliográfico no *Google Scholar* e no Portal de Periódicos CAPES, consultando bases de dados como *Web of Science*, *ScienceDirect* e *Scopus*. Adicionalmente, utilizou-se a ferramenta de Inteligência Artificial *Semantic Scholar* para mapear e comparar o volume de publicações elegíveis.

A estratégia de busca baseou-se na combinação de palavras-chave estruturadas por meio dos operadores booleanos AND e OR. Essa abordagem delimitou o universo amostral ao escopo pretendido, garantindo a consistência e a reprodutibilidade da pesquisa em todas as plataformas. Os termos utilizados e o quantitativo de artigos localizados estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1. Termos de busca utilizados na pesquisa bibliográfica.

Termos de busca
"Produced Water"
"Oilfield wastewater"
"Produced Water Treatment"
"Produced Water Treatment Technologies"
"Irrigation"
"Agricultural Reuse"

Os termos de busca foram definidos em língua inglesa devido à predominância desse idioma nas publicações científicas das áreas de petróleo, gás e tratamento de efluentes, ampliando a abrangência da revisão. Como critérios de delimitação, aplicaram-se filtros para selecionar artigos publicados nos últimos 10 anos, escritos em inglês e classificados por relevância nas plataformas. À medida que a pesquisa avançava, esses termos foram combinados e refinados para direcionar a busca a aspectos específicos do tratamento e reuso do efluente. Posteriormente, realizou-se a triagem dos resultados por meio da leitura de títulos, resumos e palavras-chave, priorizando-se artigos originais, de revisão e documentos técnicos focados na caracterização da água produzida, nos impactos ambientais de seu descarte, nas tecnologias de tratamento e em sua aplicação na irrigação.

Entre os estudos elegíveis, foram selecionados para discussão aqueles que abordavam tecnologias de tratamento de água produzida, sua aplicação para o reuso na irrigação agrícola, o desempenho dos

processos empregados e os parâmetros de qualidade da água tratada. Também foram priorizados artigos de maior relevância científica, considerando sua pertinência ao tema, atualidade e recorrência nas diferentes bases de dados consultadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Levantamento bibliográfico

Como resultado do levantamento bibliográfico, foi obtida uma quantidade significativa de documentos relacionados ao tratamento e reúso da água produzida. Os quantitativos encontrados para cada termo de busca nas bases consultadas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Quantitativo de documentos encontrados para os termos de busca utilizados.

Termos específicos de busca	Google Scholar	Periódicos CAPES
"Produced Water"	34100	3841
"Produced Water Treatment"	10500	337
"Produced Water Treatment Technologies"	1360	16
"Produced Water" AND Irrigation	8910	135
"Produced Water" AND "Agricultural Reuse"	340	3

Visando proporcionar uma melhor visualização dos resultados obtidos na revisão da literatura, os trabalhos identificados serão apresentados de forma segregada conforme as bases de dados utilizadas na busca (*Web of Science*, *ScienceDirect*, *Scopus*, *Semantic Scholar* e *Google Scholar*). Em todas as buscas as palavras-chaves apresentadas na Tabela 1 foram utilizadas.

i. Resultados da busca na *Web of Science*:

Os resultados da pesquisa na *Web of Science* revelaram um total de 459.854 artigos. Refinando a busca com filtros como: "referências citadas enriquecidas", "os últimos 10 ano", tipo de documentos ser apenas artigos, línguas: ser apenas artigos em inglês, foram encontrados 73.486 artigos. A distribuição anual dos artigos retornados pela *Web of Science* para a combinação de palavras-chave voltada ao tratamento e reúso agrícola é apresentada na Figura 1.

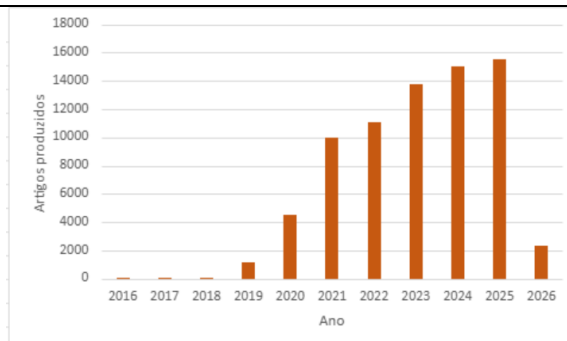


Figura 1: Artigos retornados pela *Web of science* utilizando palavras-chaves: *produced water OR oilfield wastewater AND treatment technologies AND irrigation OR agricultural reuse*, entre os anos de 2016 a 2026.

A Figura 1 evidencia uma tendência de crescimento no número de publicações ao longo dos últimos dez anos, indicando o aumento do interesse científico pelo tratamento e reúso da água produzida. A redução observada em 2026 deve-se ao fato de o ano ainda estar em andamento no momento da realização da busca bibliográfica. Esse crescimento pode ser atribuído ao aumento da geração de água produzida pela indústria de petróleo e gás, à intensificação da escassez hídrica em diversas regiões do mundo e à busca por alternativas sustentáveis para o reúso desse efluente.

Entre os principais artigos encontrados para utilização de água produzida tratada na irrigação, Malhas *et al.*, (2021) avaliaram a eficiência de um sistema multietapas integrado para o tratamento de água produzida de campos de petróleo, combinando processos convencionais e tecnologia de membranas. O arranjo tecnológico compreendeu um tratamento biológico por aeração e uma etapa química de coagulação e floculação, seguidos por um sistema de purificação composto por membranas de osmose inversa (OI) e desinfecção por radiação ultravioleta (UV). A rota proposta demonstrou elevada eficácia na redução de contaminantes, alcançando percentuais de remoção de 94,23% de sólidos suspensos totais (SST), 95,86% de sólidos dissolvidos totais (SDT) e 98,0% de turbidez, embora tenha demandado proposição de pós-tratamento oxidativo complementar para o ajuste da demanda química de oxigênio (DQO).

Ali; Ijaola e Asmatulu, (2021) utilizaram diferentes etapas multifásicas para o tratamento da água produzida. Primeiramente, o efluente é alimentado em um separador trifásico, para reduzir a concentração da água bruta, após essa fase ele é encaminhado a um tanque de sedimentação com aeração para facilitar a remoção dos óleos e decantar os sólidos presentes. Após a decantação a água passa por três filtros acoplados, o de areia, o composto por carvão ativado granular feito de tâmara e zeólita, e por último um

filtro cerâmico feito de argila com serragem. O sistema demonstrou sustentabilidade e baixo custo, alcançando até 80% de recuperação de água limpa, permitindo que seus parâmetros finais fossem viáveis para o uso agrícola. Comparando essas duas abordagens, observa-se um compromisso entre eficiência e simplicidade operacional: o sistema de Malhas *et al.* (2021), por empregar osmose reversa e desinfecção UV, atinge remoções superiores a 94% para SST, SDT e turbidez, mas depende de etapas de pós-tratamento oxidativo adicionais e de maior investimento em membranas, o que pode limitar sua aplicação em propriedades rurais de pequeno porte. Já o sistema de Ali, Ijaola e Asmatulu (2021), baseado em filtração sequencial com materiais de baixo custo (areia, carvão ativado e argila), apresenta menor eficiência de recuperação (80%), porém maior simplicidade e viabilidade econômica, favorecendo sua aplicação em contextos de escassez de recursos técnicos e financeiros. Essa comparação evidencia que a escolha da rota tecnológica para o reúso na irrigação deve considerar não apenas a eficiência de remoção de contaminantes, mas também o custo, a complexidade operacional e o porte da propriedade agrícola a ser atendida, fatores diretamente relacionados à viabilidade prática do reúso proposto neste estudo.

ii. Resultados da busca no *ScienceDirect*

No banco de dados da *ScienceDirect*, utilizando as palavras-chave selecionadas acima, foram encontrados mais de um milhão de trabalhos. Com a aplicação dos filtros de artigos publicados nos últimos 10 anos, artigos em inglês e artigos de pesquisa, os resultados mantiveram-se altos, sendo assim mais dificultoso uma estimativa de quantos artigos nos últimos 10 anos foram produzidos em média. Sendo assim buscando os de mais relevâncias, foi possível analisar os:

Recentemente, o estudo de Edirisooriya *et al.*, (2026) utilizou uma escala piloto, para a purificação de água produzida hipersalina. Sua metodologia consistiu em um pré-tratamento, para remoção dos sólidos suspensos, dessalinização por congelamento fracionado multistágios (FD), filtração por carvão ativado, para remoção de compostos remanescentes e por último osmose reversa. Os autores afirmaram que essa rota de tratamento alcançou uma eficiência de remoção de contaminantes superior a 95%, atingindo a qualidade necessária para aplicações terrestres, como irrigação agrícola. De acordo com Smeda *et al.*, (2024) a combinação de processos clássicos de coagulação-floculação seguidos de sedimentação e filtração em areia a adsorção em carvão ativado, apresenta uma rota tecnológica eficiente de remoção

de contaminantes em até 97%. Dessa forma, concluiu-se que a água tratada por essa proposta pode ser seguramente utilizada para irrigação e que ela representa uma técnica economicamente viável para regiões de escassez de água crônica.

Ao contrastar essas duas rotas, nota-se que a dessalinização por congelamento fracionado associada à osmose reversa, utilizada por Edirisooriya *et al.* (2026), é particularmente vantajosa para o tratamento de AP hipersalina, situação comum em muitos campos petrolíferos, mas tende a demandar maior consumo energético em razão das etapas de resfriamento. Em contraste, a rota de coagulação-floculação seguida de filtração em areia e adsorção em carvão ativado, empregada por Smeda *et al.* (2024), apresenta menor complexidade e custo, sendo mais adequada para AP com salinidade moderada. Ambas as rotas, no entanto, convergem para o mesmo patamar de eficiência (95-97%) e para a mesma conclusão prática: a água tratada atende aos parâmetros exigidos para irrigação, reforçando que a seleção da tecnologia deve ser guiada pelas características específicas da AP a ser tratada e pelo contexto econômico da aplicação agrícola pretendida.

iii. Resultados da busca no Scopus

Na seleção do banco de dados da Scopus, utilizando as palavras chaves sugeridas, foi possível encontrar cerca de 5158 artigos. Após utilizar os filtros de artigos dos últimos 10 anos, apenas artigos de pesquisa, e artigos em inglês, obteve-se uma redução para 4521 artigos selecionados. Embora a busca tenha sido extensa, selecionando os 30 primeiros artigos de relevância, o banco de dados fez buscas de artigos apenas para o tratamento de água, porém dos artigos focados para o tratamento de AP eles não tinham o objetivo de tratamento para irrigação, sendo assim não foi possível selecionar artigos viáveis para o estudo em questão.

iv. Resultados da busca no *SemanticScholar*

Realizando a busca com o auxílio da IA (inteligência artificial), foram encontrados 934 artigos. A utilização dos filtros como: artigos dos últimos 10 anos, artigos ordenados por relevância, reduziu esse quantitativo para 619 artigos, entre eles foi possível identificar artigos relevantes com objetivos para irrigação.

v. *Google Scholar*

No *Google Scholar*, a busca foi realizada aplicando o filtro de período personalizado de 2016 a 2026, ordenação por relevância e exclusão de patentes e citações. Diferentemente das demais bases, o *Google Scholar* não dispõe de filtro por idioma ou por tipo de

documento, o que resulta em volumes mais elevados e abrangentes. Diante do grande volume de resultados e da ausência de filtros refinados, priorizou-se a leitura dos artigos mais citados e relevantes entre os primeiros resultados de cada busca, conforme a ordenação padrão da plataforma.

A distribuição dos artigos retornados pelo *Google Scholar* para um período de dez anos e com a combinação de palavras-chave voltada ao tratamento e reuso agrícola é apresentada na Figura 2.

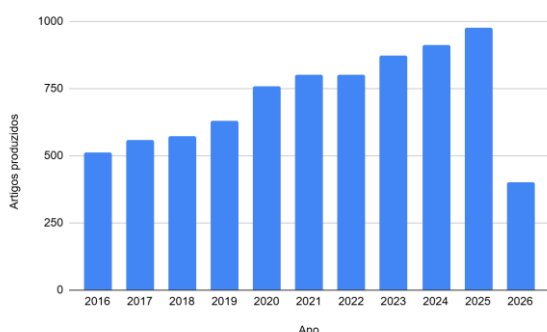


Figura 2: Artigos retornados pelo *Google Scholar* utilizando palavras-chaves: *produced water OR oilfield wastewater AND treatment technologies AND irrigation OR agricultural reuse*, entre os anos de 2016 a 2026.

A tendência observada no *Google Scholar* é consistente com aquela identificada na *Web of Science*. Apesar das diferenças no número absoluto de documentos recuperados entre as bases, decorrentes de seus distintos critérios de indexação e abrangência, ambas apresentam crescimento no número de publicações ao longo dos últimos anos. Esse comportamento reflete a evolução do interesse científico pelo tema e reforça que esse aumento é observado de forma consistente em diferentes bases de dados.

Dentre os artigos mais relevantes retornados pelo *Google Scholar*, destaca-se a revisão de Abdelhamid *et al.* (2025), que fornece um panorama abrangente do estado da arte do tratamento de água produzida. Nele os autores descrevem 14 tecnologias organizadas nas categorias de separação óleo-água (adsorção, biotratamento), dessalinização (troca iônica, destilação, eletrodialise convencional e reversa, ativação eletroquímica, eletrodeionização) e tratamento por membranas (osmose reversa, microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração). A revisão também relata um estudo de caso da GE na Califórnia, no qual um sistema de membranas em três estágios, seguido de troca iônica produziu água com TDS de 1000 ppm, atendendo ao padrão para irrigação. Entretanto, os autores não conseguiram uma remoção de boro satisfatória, uma vez que ele

permaneceu acima do limite legal de 0,75 ppm, exigindo uma etapa adicional de remoção.

Adicionalmente, a busca na mesma base também retornou a revisão de Echchel et al. (2018), publicada no periódico *Agricultural Water Management*, que se destaca por abordar o reuso da AP especificamente para a irrigação de culturas alimentares em regiões áridas. O artigo analisa 474 amostras de água produzida de diferentes origens (convencional, gás de xisto e metano de carvão — CBM), coletadas nos Estados Unidos, Austrália, África do Sul e Catar, e constata que apenas 8,4% delas atenderiam naturalmente aos padrões de qualidade para irrigação estabelecidos pela FAO (*Food and Agriculture Organization*), considerando condutividade elétrica (CE) e Razão de Adsorção de Sódio (RAS). Esses dois parâmetros estão diretamente relacionados aos riscos mais relevantes associados à irrigação com AP identificados pelos autores: a salinização e a sodificação dos solos. Diante desse cenário, o artigo também discute estratégias de adaptação da água produzida voltadas para a irrigação a fim de viabilizar o seu reuso. Entre elas, destacam-se a diluição com água doce, a dessalinização por osmose reversa de baixa pressão (com custo estimado de USD 0,24/m³), a aplicação de corretivos de solo como gesso e enxofre para mitigar a sodificação, e a seleção de culturas com maior tolerância à salinidade. Os autores apontam que a combinação dessas estratégias é um caminho promissor para mitigar os riscos de degradação do solo e assegurar a viabilidade agrônômica e ambiental do reuso em terras secas.

Reunindo as evidências discutidas ao longo desta revisão, observa-se que as tecnologias de tratamento de AP se organizam em três grandes grupos com desempenhos e aplicações distintas quanto à viabilidade do reúso agrícola. Os sistemas multi-barreira baseados em membranas (osmose reversa, ultra e nanofiltração), como os relatados por Malhas *et al.* (2021), Edirisooriya *et al.* (2026) e Abdelhamid *et al.* (2025), oferecem as maiores eficiências de remoção (94-99%) e são capazes de atender a parâmetros rigorosos como o TDS, mas exigem maior investimento em infraestrutura e energia, além de apresentarem limitação específica na remoção de boro, contaminante que frequentemente permanece acima do limite agrônômico recomendado. Já as rotas baseadas em adsorção e filtração convencional (areia, carvão ativado, argila), como as de Ali, Ijaola e Asmatulu (2021) e Smeda *et al.* (2024), apresentam eficiências ligeiramente inferiores, mas configuram-se como alternativas de menor custo e maior simplicidade operacional, mais compatíveis com a realidade de pequenos produtores rurais. Por fim, estratégias de manejo agrônômico complementares ao tratamento, como a diluição, a correção do solo com

gesso e enxofre e a seleção de cultivares tolerantes à salinidade (Echchelh *et al.*, 2018), mostram-se essenciais para viabilizar o reúso mesmo quando a água tratada não atinge plenamente os padrões da FAO. Essa análise comparativa reforça que a viabilidade do reúso da AP para irrigação agrícola, objetivo central desta revisão, não depende de uma única tecnologia ideal, mas da combinação adequada entre eficiência de tratamento, custo, escala de aplicação e manejo agrônômico complementar.

CONCLUSÃO

A presente revisão da literatura evidenciou um crescimento consistente no número de publicações sobre o tratamento e reúso agrícola da água produzida (AP) ao longo da última década, refletindo o interesse científico crescente pelo tema diante da intensificação da escassez hídrica global. Essa tendência é acompanhada pela consolidação dos sistemas multi-barreira, que combinam pré-tratamento físico, processos de membranas (como a osmose reversa) e etapas de polimento por adsorção ou troca iônica, como a rota tecnológica mais eficaz para adequar a AP aos padrões agrônômicos exigidos pela irrigação.

Entre os principais desafios identificados, destaca-se a persistência de contaminantes traço, como o boro, mesmo após tratamentos de alta eficiência, exigindo etapas adicionais de polimento. Do ponto de vista agrônômico, a literatura mostra que apenas uma pequena fração da AP gerada globalmente atenderia naturalmente aos padrões da FAO, sendo a salinização e a sodificação dos solos os riscos mais recorrentes, sobretudo em regiões áridas e semiáridas, onde a evaporação intensifica o acúmulo de sais. Outro desafio evidenciado é o compromisso entre eficiência de tratamento e viabilidade econômica: tecnologias de membrana alcançam as maiores remoções de contaminantes, mas demandam maior investimento, enquanto rotas de menor custo, baseadas em adsorção e filtração convencional, apresentam eficiências ligeiramente inferiores, o que pode restringir sua aplicação a contextos de escassez de recursos técnicos e financeiros.

Como lacunas de pesquisa, observa-se a escassez de estudos de longo prazo sobre os efeitos cumulativos da irrigação com AP nas propriedades físico-químicas do solo e na produtividade agrícola, bem como a ausência de critérios padronizados de qualidade que considerem a diversidade de culturas e tipos de solo. Também é limitado o número de análises de viabilidade econômica em escala real, que comparem os custos do tratamento da AP aos de fontes hídricas alternativas, além de estudos que avaliem os riscos sanitários e ambientais associados ao uso contínuo desse efluente em sistemas produtivos de alimentos. Para viabilizar essa prática, é essencial combinar o

tratamento com estratégias de manejo agrônômico, como a diluição com água doce, a aplicação de corretivos de solo e a seleção de culturas tolerantes à salinidade.

Diante do exposto, a AP tratada configura-se como uma alternativa estratégica para mitigar a escassez hídrica em regiões áridas e semiáridas, desde que sua viabilidade seja assegurada pela integração entre tecnologias de tratamento adequadas ao contexto de aplicação e estratégias de manejo agrônômico complementares, apontando a necessidade de pesquisas futuras que avancem sobre as lacunas aqui identificadas.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Sergipe (UFS), pelo suporte institucional e pela infraestrutura disponibilizada para a execução deste trabalho. Ao programa de Iniciação Científica da instituição, pela concessão da bolsa de IC, fundamental para o desenvolvimento e dedicação exclusiva a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABDELHAMID, C. et al. Produced Water Treatment Technologies: A Review. **Energies**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 1-23, jan. 2025. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
- ALI, S.; IJAOLA, A. O.; ASMATULU, E. Multifunctional water treatment system for oil and gas-produced water. **Sustainable Water Resources Management**, [S.L.], v. 7, n. 6, p. 1-17, dez. 2021. Springer.
- ECHCHELH, A.; HESS, T.; SAKRABANI, R. Reusing oil and gas produced water for irrigation of food crops in drylands. **Agricultural Water Management**, [S.L.], v. 206, p. 124-134, jul. 2018. Elsevier B.V.
- EDIRISOORIYA, E. M. N. T. et al. Separation performance in pilot-scale fractional freeze desalination and reverse osmosis for produced water reuse. **Desalination**, [S.L.], v. 622, p. 1-15, mar. 2026. Elsevier B.V.
- MALHAS, R. N. et al. Treating Kuwait's oilfield water via conventional methods and membrane technology. **Desalination and Water Treatment**, [S.L.], v. 209, p. 121-130, jan. 2021. Desalination Publications.
- SMEDA, A. et al. An efficient integrative method for a sustainable environmental management of produced water: application on the Zelten oil field, Sirte basin, Libya. **Kuwait Journal of Science**, [S.L.], v. 51, n. 1, p. 1-12, jan. 2024. Kuwait University.