



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS AMBIENTAIS
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

Elton Costa Cardoso

Aplicações da água residuária das salinas solares: revisão de literatura sistemática

MOSSORÓ

2024

Elton Costa Cardoso

Aplicações da água residuária das salinas solares: revisão de literatura sistemática

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Oliveira Batista

MOSSORÓ

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do autor, sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu respectivo autor sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

CC268 Cardoso, Elton Costa.

aa Aplicações da água residuária das salinas solares: revisão de
literatura sistemática. / Elton Costa Cardoso. - 2024.
47 f. : il.

Orientador: Rafael Oliveira Batista. Monografia (graduação) -
Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2024.

1. água-mãe. 2. indústria salineira. 3. recuperação de subprodutos.
4. tanques de evaporação. 5. tratamento de efluentes. I. Batista, Rafael
Oliveira, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com
AACR2 e os dados fornecidos pelo autor.
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência Bibliotecária:
Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Elton Costa Cardoso

Aplicações da água residuária das salinas solares: revisão de literatura sistemática

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Defendida em: 18 / 10 / 2024.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
RAFAEL OLIVEIRA BATISTA
Data: 25/10/2024 19:24:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rafael Oliveira Batista (UFERSA)
Presidente



Documento assinado digitalmente
ANTONIO DIEGO DA SILVA TEIXEIRA
Data: 25/10/2024 21:34:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Antônio Diego da Silva Teixeira (PPGMSA/UFERSA)
Membro Examinador



Documento assinado digitalmente
HELIO NOGUEIRA BEZERRA
Data: 25/10/2024 21:56:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Me. Hélio Nogueira Bezerra (PPGMSA/IFRN)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Esta monografia representa o encerramento de uma importante etapa da minha vida acadêmica, e seria impossível chegar até aqui sem o apoio e a colaboração de diversas pessoas, às quais dedico minha mais sincera gratidão.

Agradeço a Deus, acima de tudo, por me permitir trilhar essa trajetória com força e determinação, fornecendo o suporte necessário para me manter firme nesse objetivo e por colocar em meu caminho pessoas maravilhosas que me motivam e fazem tudo valer a pena.

Agradeço de modo especial ao meu orientador, Professor Doutor Rafael Oliveira Batista, que, com a sabedoria dos grandes mestres, guiou meu caminho, não apenas por meio da orientação e ensino profissional, mas também pela dedicação e constante sinceridade. Sua postura é digna da minha mais profunda admiração, tanto profissional quanto pessoal. Você é um exemplo de sabedoria e competência. Obrigado pelos conhecimentos compartilhados, pela atenção, paciência, compreensão e pela rigorosidade com que me conduziu. Cada conselho e sugestão foram essenciais para o aperfeiçoamento deste estudo, e sua confiança em meu potencial foi um verdadeiro incentivo nos momentos de dúvida.

Agradeço à minha esposa, Tamara de Jesus Cardoso, pelo apoio e compreensão em todos os momentos de dificuldade, e ao meu filho, Pedro Gael, pela paciência nos diversos momentos em que não pude estar presente. Vocês sempre acreditaram em mim, oferecendo palavras de encorajamento nas dificuldades e celebrando cada conquista. Sem vocês, nada disso seria possível. Aos meus pais, Teódas e Doralice, e aos meus irmãos, vai o meu mais profundo agradecimento pelo amor incondicional, apoio emocional e sacrifícios feitos ao longo desta jornada.

Aos meus amigos e colegas, que compartilharam comigo os desafios e alegrias da vida acadêmica, deixo o meu muito obrigado. As trocas de experiências, os momentos de descontração e o apoio mútuo ao longo dessa caminhada a tornaram muito mais leve e prazerosa.

Gostaria também de agradecer aos professores do Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental, cujas aulas e orientações contribuíram significativamente para a construção do conhecimento que embasa este trabalho. Cada ensinamento deixou uma marca importante na minha formação, e sou profundamente grato por todas as oportunidades de aprendizado.

Por fim, deixo um agradecimento especial a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste sonho. Esta conquista não é apenas minha, mas de todos vocês que estiveram ao meu lado ao longo dessa jornada.

A todos, o meu muito obrigado!

ÉPIGRAFE

<A conquista do conhecimento é um processo contínuo de aprimoramento intelectual, que se dá através da investigação e da busca incessante pela compreensão dos fenômenos que permeiam a nossa realidade. É por meio da pesquisa e da reflexão que expandimos os horizontes do saber e nos tornamos agentes transformadores do mundo=>

Albert Einstein

RESUMO

A região Nordeste enfrenta desafios complexos devido à variabilidade climática, escassez de recursos naturais e limitações na produção agrícola. Porém, o clima da região eleva o estado do Rio Grande do Norte à condição de maior produtor de sal do país, respondendo por 77,3% da produção total de sal nacional e 95,4% da produção de sal marinho do país. A presente revisão sistemática da literatura tem como objetivo estudar as principais aplicações das águas residuárias provenientes de salinas solares para fins agrícolas, industriais e energéticos. Para levantar dados e informações sobre o tema, foi realizada uma pesquisa bibliográfica, levantando as principais tecnologias disponíveis para recuperação de sal, abordando aspectos técnicos, estimativa de custos energéticos, eficiência na recuperação de produtos e viabilidade de reaproveitamento de efluentes de salineiras solares em sistemas de produção agrícola. A investigação mostra que, embora a indústria de produção de sal contribua significativamente para o crescimento econômico regional, gera efluentes e outros resíduos salinos que, se não tratados, podem poluir e alterar as características do ambiente. O efluente das salinas solares contém minerais valiosos como sódio, magnésio, cálcio e potássio, que podem ser utilizados para fins agrícolas (como fertilizantes), na indústria química e até para geração de energia. Os resultados mostram que técnicas como MSF e MED, apesar de serem eficientes, têm uma pegada energética maior, enquanto tecnologias baseadas em membranas como RO, embora menos eficientes, consomem menos energia. A pesquisa também aponta as limitações no tratamento e reaproveitamento desses resíduos, destacando a necessidade de tecnologias mais eficientes para extração de subprodutos, a fim de mitigar os impactos ambientais e aumentar a sustentabilidade da indústria nacional de produção de sal.

Palavras-chave: água-mãe; indústria salineira; recuperação de subprodutos; tanques de evaporação; tratamento de efluentes.

ABSTRACT

The Northeast region faces complex challenges due to climate variability, scarcity of natural resources, and limitations in agricultural production. However, the region's climate elevates the state of Rio Grande do Norte to the status of the largest salt producer in the country, accounting for 77.3% of the total national salt production and 95.4% of the country's sea salt production. The present systematic literature review aims to study the main applications of wastewater from solar saltworks for agricultural, industrial, and energy purposes. To gather data and information on the subject, a bibliographical research was conducted, surveying the main technologies available for salt recovery, addressing technical aspects, estimated energy costs, efficiency in product recovery, and the feasibility of reusing mother liquor in agricultural production systems. The research shows that, although the salt production industry significantly contributes to regional economic growth, it generates effluents and other saline waste that, if untreated, can pollute and alter the environment's characteristics. The effluent from solar saltworks contains valuable minerals such as sodium, magnesium, calcium, and potassium, which can be used for agricultural purposes (as fertilizers), in the chemical industry, and even for energy generation. The results show that techniques like MSF and MED, despite being efficient, have a larger energy footprint, whereas membrane-based technologies like RO, though less efficient, are less energy-intensive. The research also points out the limitations in treating and reusing these wastes, highlighting the need for more efficient technologies for by-product extraction in order to mitigate environmental impacts and increase the sustainability of the national salt production industry.

Keywords: mother water; salt industry; by-product recovery; evaporation tanks; affluent treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	3	Fluxograma da produção de sal.....	26
Figura 2	3	Ordem de precipitação nas salineiras dos principais sais encontrados na água do mar.....	31
Figura 3	3	Produção integrada com reúso da salmoura.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a. C.	Antes de Cristo
ANM	Agência Nacional de Mineração
BO ₃	Trióxido de boro
B	Boro
bar	Unidade de pressão
Bé	Baumé
BO ₃ ²⁻	Borato
Br	Bromo
Ca	Cálcio
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
CaSO ₄	Sulfato de cálcio
CaSO ₄ -2H ₂ O	Sulfato de cálcio hidratado
Cl ⁻	Cloreto
CO ₃ ²⁻	Carbonato
Cu	Cobre
CuHCF	Cuprato hexacianoferrato
Dr	Doutor
DK	Membrana de nanofiltração da Dow Filmtec
ED	Eletrodialise
EUA	Estados Unidos da América
ex.	Exemplo
F ⁻	Fluoreto
Fe ₂ O ₃	Óxido férrico
g	Gramas
HCO ₃	Bicarbonato
IRC747	Resina quelante AmberLite™
K	Potássio
KCl	Cloreto de potássio
km	Quilômetro
kWh	Quilowatt-hora
Li	Lítio

m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
MD	Destilação por membrana
MED	Destilação multiefeito
MF	Microfiltração
Mg	Magnésio
mg	Miligrama
MgCl ₂	Cloreto de magnésio
MgO	Óxido de Magnésio
MgSO ₄	Sulfato de magnésio
ml	Mililitro
mm	Milímetro
mol	Unidade de medida
MSF	Destilação flesh multiestágio
MTX8010	Resina de troca iônica polimérica macroporosa
Na	Sódio
NaBr	Brometo de sódio
NaCl	Cloreto de sódio
NF	Nanofiltração
NF90	Membrana de nanofiltração da Synder Filtra ^{瑞婉} on
NFS	Membrana de nanofiltração da Synder Filtra ^{瑞婉} on
NFX	Membrana de nanofiltração da Osmonics
OMS	Organização Mundial da Saúde
OPAS	Organização Pan-Americana de Saúde
ppm	Partes por milhão
PRO	Osmose retardada por pressão
Prof	Professor
RO	Osmose reversa
S940	Resina quelante Purolite
SbTreat	Resina para tratamento de antimônio da NURES®
SO ₄ ²⁻	Sulfato
sp	Densidade

Sr	Estrôncio
SrTreat	Resina para tratamento de estrôncio da NURES®
U	Urânio
UF	Ultrafiltração
US\$	Dólar Americano
VNF1	Membrana de nanofiltração Vontron
W	Watt

LISTA DE SÍMBOLOS

~	Aproximadamente
°	Grau
°Bé	Graus Baumé
°C	Graus Célsius
≥	Maior ou igual
®	Marca registrada
%	Porcentagem
\$	Cifrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	Objetivos gerais	17
2.2	Objetivos específicos.....	17
3	METODOLOGIA	18
4	REVISÃO DE LITERATURA.....	19
4.1	Caracterização do Semiárido	19
4.2	Importância do sal.....	20
4.2.1	Para as primeiras civilizações.....	20
4.2.2	Cenário Global.....	21
4.2.3	Cenário Nacional	22
4.3	Salinas solares: funcionamento e produção de água residuária	24
4.4	Impactos Ambientais.....	27
4.5	Nutrientes para fins de adubação	29
4.6	Principais aplicações da água residuária de salinas solares	32
4.6.1	Tecnologias de recuperação.....	32
4.6.1.1	Membrana.....	32
4.6.1.2	Eletrodialise.....	33
4.6.1.3	Extração por sorção	34
4.6.1.4	Operação térmica.....	35
4.6.1.5	Geração de energia	36
4.6.2	Técnicas de reúso.....	37
4.6.2.1	Regeneração de zonas úmidas	37
4.6.2.2	Aplicações agrícolas.....	38
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

Com 1,56 milhão de km² (18,2% do território do país), a Região Nordeste do Brasil abrange a maior parte do Semiárido brasileiro; o qual está inserido nos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e uma parte do norte de Minas Gerais, que fica na Região Sudeste (Silva *et al.*, 2010).

Sob um olhar panorâmico, do ponto de vista climático, a região é caracterizada como semiárida devido às marcantes variações tanto temporais quanto espaciais na precipitação pluvial, além das elevadas temperaturas que prevalecem ao longo do ano (Moura; Sobrinho; Silva, 2019). Tais condições contribuem para que a região apresente volumes de água insuficientes em seus mananciais para o atendimento das necessidades da população (Sudene, 2021).

Por outro lado, as condições climáticas do semiárido brasileiro, atribuem à região grande potencial para a produção de sal marinho por evaporação solar, em indústrias salineiras, especialmente na zona costeira; ao todo, a linha costeira brasileira possui aproximadamente 9.198 km de extensão, mas é a região nordeste que possui melhores condições de produção (Costa *et al.*, 2013).

Sendo, os oceanos compostos por cerca de $1,3 \times 10^{18}$ toneladas de água, das quais cerca de 3,5% são de sais dissolvidos, o que representa uma reserva mineral significativamente maior do que a maioria das reservas terrestres disponíveis e que são extraídos anualmente, demonstram o grande potencial a ser explorado (Loganathan; Naidu; Vigneswaran, 2017).

O clima favorável eleva o Estado do Rio Grande do Norte ao patamar de maior produtor, com cerca de 5,7 milhões de toneladas, ano, correspondendo a 77,3% da produção total de sal nacional e a 95,4% da produção de sal marinho do país (BRASIL, 2019), tornando as salineiras um pilar fundamental para o crescimento econômico local e regional, exercendo um importante impacto positivo através da criação de oportunidades de emprego e contribuição na arrecadação da região por meio de pagamento de impostos (Costa *et al.*, 2013).

Embora a atividade salineira contribua significativamente para o crescimento econômico regional, assim como outras atividades industriais, também gera efluentes que podem poluir e mudar as características do ambiente (Fernandes *et al.*, 2020). Segundo Ferreira, Miranda e Gomes (2015), este empreendimento traz, entre outros impactos negativos, a interrupção dos cursos d'água, devastação de manguezais, salinização de áreas produtivas e

férteis, alteração da umidade da região pelo incremento da evaporação das salinas, alteração de ecossistema marinho e terrestre com redução da fauna.

Os efluentes gerados pela atividade salineira como a salmoura, popularmente conhecida como água-mãe e lodo de salmoura são, geralmente, lançados aos corpos hídricos, sem qualquer tratamento ou uso comercial (Silva, 2021).

Os quatro metais essenciais mais concentrados na água do mar são o sódio (Na), magnésio (Mg), cálcio (Ca) e potássio (K). Esses elementos podem ser comercialmente extraídos na forma de íons cloreto (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}) e carbonato (CO_3^{2-}). Podendo, ainda, o Mg ser obtido na forma de óxido de magnésio (MgO), conforme apontado por Loganathan, Naidu e Vigneswaran (2017).

Portanto, existe um grande potencial de subprodutos que podem ser extraídos durante os processos da produção do sal por evaporação, como os valiosos minerais citados que poderiam ter diversas aplicações na agricultura, em outros processos industriais e energéticos, potencializando os ganhos econômicos desses empreendimentos, aumentando a sustentabilidade das empresas e mitigando os possíveis problemas ambientais (Silva, 2021).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Realizar uma revisão de literatura sistemática abordando as aplicações da água residuária das salinas solares para fins agrícolas, industriais e energéticos, com o intuito de analisar e sintetizar o conhecimento atual sobre o tema.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar as principais características da água residuária das salinas solares;
- Levantar as diversas aplicações potenciais da água residuária das salinas solares em diferentes setores, como agrícola, industrial e ambiental;
- Avaliar os impactos ambientais associados ao descarte do efluente das salinas solares;
- Investigar os métodos e tecnologias disponíveis para o tratamento e reutilização da água residuária das salinas solares; e
- Fornecer embasamento para novos temas e oportunidades de pesquisa.

3 METODOLOGIA

Esta pesquisa abordou as aplicações da água residuária das salinas solares para fins agrícolas, industriais e energéticos, analisando e sintetizando o conhecimento atual sobre o tema, por meio de uma revisão da literatura sistemática baseada em diversas fontes, como artigos, monografias, teses, dissertações, revistas, livros e arquivos digitais, entre outros meios de pesquisa.

Inicialmente foi realizada uma pesquisa documental aprofundada sobre os conceitos básicos fundamentais relacionados a produção de sal no Brasil e no mundo, buscando interligá-los às situações globais sobre os impactos gerados, principalmente no que concerne a falta de tratamento das águas residuárias provenientes dos processos de produção do sal marinho. Os dados coletados através dessa pesquisa documental foram apresentados de maneira a esclarecer e proporcionar a devida compreensão aos leitores sobre o tema abordado ao longo da revisão.

A pesquisa documental foi conduzida por meio de consultas ao Portal de Periódicos da Capes, Google Acadêmico, ScienceDirect e Scientific Electronic Library Online (SciELO), utilizando as seguintes palavras-chaves em português: <salinas solares=, "água residuária de salinas solares", "tratamento de água residuária de salinas solares", "reutilização de água residuária" e <recuperação de sais/minerais= e em inglês: <solar saltworks=, wastewater from solar saltworks=, wastewater treatment from solar saltworks =, <wastewater reuse=, <salt/mineral recovery= e <bitter water treatment=. No processo de pesquisa foi estabelecido um intervalo temporal de 10 anos, de 2014 a 2024, sendo que a escolha dos trabalhos teve como critérios a relevância do título e resumo, pertinência do assunto, tipo de estudo, ano de publicação, qualidade metodológica e abordagem multidisciplinar, sendo excluídos os artigos que não apresentaram relação com estes descritores.

Após a conclusão da pesquisa da literatura, as informações mais relevantes relacionadas ao tema proposto neste trabalho foram extraídas e organizadas em citações diretas e indiretas, estruturadas nos seguintes tópicos: Caracterização do Semiárido; importância do sal, para as primeiras civilizações, cenário global, cenário nacional; salinas solares: Funcionamento e produção de água residuária; impactos ambientais; nutrientes para fins de adubação e principais aplicações da água residuária de salinas solares.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Caracterização do Semiárido

Em regiões semiáridas, encontram-se ecossistemas únicos, que incluem vegetações bem definidas, como é o caso da Caatinga no Brasil, inseridas entre áreas de florestas tropicais sazonalmente secas. Esses ambientes abrigam uma diversidade extraordinária de plantas e animais adaptados a essas condições climáticas. Essa biodiversidade desempenha um papel fundamental na preservação da saúde ecológica e da resiliência biológica do planeta (Melo *et al.*, 2023).

Eventos climáticos extremos, como tempestades severas e períodos de seca prolongados, têm ocorrido com uma frequência cada vez maior, refletindo uma tendência crescente de alterações meteorológicas significativas, como apontam estudos realizados por Coelho; Cardoso e Firpo, (2016), Natividade *et al.* (2017) e Lima *et al.* (2018).

Embora as regiões semiáridas sejam de grande importância, elas são particularmente vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas. A ocorrência de secas intensas, somadas ao aumento da variabilidade interanual de precipitação pluvial, frequentemente contribuem para os processos de desertificação (Milhorange *et al.*, 2019).

Para que uma área seja considerada semiárida ela deve atender a uma série de critérios como a redução nos volumes de chuva, o aumento das temperaturas atmosféricas e um incremento na evapotranspiração potencial, contribuindo para uma maior aridez nesses ambientes. A aridez, por sua vez, serve como um indicador primordial do nível de escassez hídrica de determinada região (Silva *et al.*, 2023a).

No Brasil, o semiárido possui uma extensão de 1,03 milhão de km², abrangendo algo em torno de 70% da região Nordeste e cerca de 63% de sua população, o que representa aproximadamente 12% do território do país (Silva; Bezerra, 2020).

O Semiárido brasileiro é caracterizado por possuir insolação média anual, temperaturas anuais médias, evaporação média anual, umidade relativa média, de 2.800 horas, entre 23 °C e 27 °C, de 2.000 mm, 50%, respectivamente, e precipitação pluvial anual máxima, menor ou igual a 800 mm (Sudene, 2021).

Dantas (2021) destaca que não se considera somente a dinâmica das chuvas na delimitação do semiárido brasileiro, mas também o balanço hídrico da região; obtido através

do índice de aridez de Thornthwaite, que relaciona as precipitações pluviais e a evaporação potencial, devendo este ser de até 0,5.

É evidente que o Nordeste enfrenta desafios complexos devido à variabilidade climática, escassez de recursos naturais e limitações na produção agrícola. A falta de precipitação pluvial e a baixa fertilidade dos solos, predominantemente arenosos ou arenoargilosos e rasos, são agravadas pela proximidade de rochas à superfície, dificultando a drenagem e limitando o acesso às águas subterrâneas, conforme apontado por Silva *et al.* (2010).

Silva *et al.* (2010) e Silva *et al.* (2020) destacam que a agricultura, muitas vezes de origem familiar, apesar dos avanços tecnológicos recentes para convívio com as secas, ainda é caracterizada pela baixa tecnologia e eficiência, o que contribui para a degradação dos recursos naturais. Isso resulta em menor participação no mercado e segurança alimentar, afetando as pequenas propriedades rurais e contribuindo para os piores indicadores econômicos e sociais do país.

Diante disso, as salinas solares proporcionam grandes avanços, do ponto de vista econômico, funcionando como uma importante alternativa local, desempenhando um papel fundamental no crescimento econômico da região (Costa *et al.*, 2013).

4.2 Importância do sal

4.2.1 Para as primeiras civilizações

O sal desempenhou um papel significativo no avanço da sociedade ao longo da história, sendo equiparado em valor ao ouro entre as civilizações antigas. Sua importância como produto de grande valia comercial foi inegável, influenciando profundamente o curso do desenvolvimento humano (Elias *et al.*, 2020).

Conforme registros históricos, há mais de 5.000 anos, os egípcios e chineses despontaram e destacaram-se como os pioneiros na produção e utilização do sal (Araújo, 2017).

Evidências arqueológicas revelam que o "ouro branco", como o sal era conhecido na antiguidade, era obtido do mar e de outras fontes salinas a céu aberto, nas proximidades do Mar Morto, antes mesmo da Idade de Bronze. Os sumérios, por volta de 3.500 a.C., já dominavam a técnica de uso do sal para conservar carnes e outros alimentos. Cerca de 1.000 a.C., os troianos também aprenderam a empregar o sal na preservação de peixes, enquanto civilizações

marítimas, como os fenícios, estabeleciam um próspero comércio do produto através do Mediterrâneo (Melo; Carvalho; Pinto, 2008).

Ademais, o sal era um condimento de grande apreço na antiga Mesopotâmia, sendo este também reconhecido por suas qualidades medicinais e seu importante papel em rituais. Durante a dinastia Zhou Ocidental (1046 3 771 a.C.), o sal era frequentemente incluído em oferendas rituais, destacando sua significância cultural e religiosa (Hoi, 2011).

A história mostra diversos exemplos do impacto significativo do sal, com a presença desse recurso mineral em determinadas áreas favorecendo o surgimento de cidades e influenciando seus nomes, como Salzburg na Áustria, Salzgitter na Alemanha e Saltville nos Estados Unidos. Populações migraram em busca de sal, e guerras foram travadas para garantir sua obtenção ou proteção (Melo; Carvalho; Pinto, 2008).

Contudo, a tecnologia de mineração do sal veio a se desenvolver na Idade Média, especificamente no século XII. Esse comércio era extremamente lucrativo, embora o acesso ao sal fosse restrito às regiões produtoras. O governo detinha o controle da exploração das jazidas, estabelecendo o primeiro monopólio estatal. No Império Romano, o sal era tão valioso que os soldados eram pagos com ele, originando a palavra salário, <salarium=, em latim (Freixa, 2017).

4.2.2 Cenário Global

O sal desempenha um papel crucial em diversos países, sendo amplamente utilizado na culinária e em vários processos industriais; sendo essencial para a produção de uma variedade de produtos, incluindo medicamentos, fertilizantes, rações e produtos químicos. Em 2022, o mercado global de sal marinho atingiu um valor superior a 18 bilhões de dólares americanos, com uma produção total de 270 milhões de toneladas métricas. Acredita-se que esse mercado ultrapasse 25 bilhões de dólares americanos até 2032 (Statista, 2023).

A produção doméstica de sal nos EUA cresceu aproximadamente 2,38%, passando de 41 milhões de toneladas em 2022 para 42 milhões de toneladas em 2023, com um valor total estimado de US\$ 2,6 bilhões. A distribuição percentual dos tipos de sal vendidos ou utilizados foi de 46% para sal-gema, 33% para sal de salmoura, 11% para sal por evaporação a vácuo e 10% para sal por evaporação solar (Estados Unidos, 2024).

Embora o sódio seja essencial para as funções fisiológicas, as evidências indicam que a ingestão de sal é excessiva na maioria dos países. As médias estimadas de consumo variam

entre 9 e 12 g/dia, chegando a atingir valores até mesmo superiores a 12 g/dia em alguns países do continente asiático (Ribeiro, 2021).

China (20%), Estados Unidos (15%) e Índia (11%) se destacam como os principais fabricantes de sal, com uma produção combinada de mais de 124 milhões de toneladas métricas em 2022, o Brasil participou com 2,4% (Estados Unidos, 2024). A Austrália foi líder na exportação, enviando cerca de 512 milhões de dólares americanos em sal para diversos países, enquanto os Estados Unidos foram os maiores importadores globais (US\$ 627 milhões) no período analisado (The Observatory of Economic Complexity, 2024).

Organizações como a Pan-Americana da Saúde (OPAS) têm enfrentado desafios para alcançar metas destinadas a reduzir o consumo de sal entre as populações. Isso inclui esforços para reformular produtos processados e ultraprocessados, que são as principais fontes de sódio na alimentação. Nas Américas, o consumo diário de sal varia de 8,5 a 15 gramas por pessoa, muito acima do limite recomendado pela Organização Mundial da Saúde (OMS), que é de 5 gramas (2 gramas de sódio). Esse alto consumo contribui significativamente para a previsão de aumento na produção mundial de sal nos próximos oito anos (Opas, 2021).

4.2.3 Cenário Nacional

No Brasil, a produção e consumo de sal remontam ao período pré-colonial. Sabe-se que existiam salinas naturais, onde o sal se acumulava naturalmente, sobretudo no Nordeste do país, onde algumas tribos indígenas já o utilizava nesse período. Entretanto, somente após a colonização, mais precisamente na segunda metade do século XVI, é que os portugueses viriam a descobrir as grandes salinas do Nordeste setentrional durante suas disputas por partes da colônia. Desde então, o sal marinho vem sendo explorado economicamente (Diniz; Vasconcelos, 2016; Andrade, 2018).

A extração do sal marinho das reservas naturais acumuladas nas zonas de supramaré, zona situada acima do nível médio da preamar (nível máximo da maré), foi aprimorada pelos portugueses, que construíram pequenas salinas artesanais utilizando técnicas já empregadas em outras regiões do Império Colonial Português, como África, China e Índia. A descoberta dessas reservas naturais e a subsequente produção de sal nas salinas impulsionaram o desenvolvimento de diversas atividades a ela relacionadas, tornando-se uma das principais atividades econômicas nas margens dos estuários dos rios no Estado do Rio Grande do Norte (Costa *et al.*, 2014a).

Estudos sobre o consumo de sal (NaCl) ainda são limitados no Brasil e, muitas vezes, por se basearem em questionários, tornam-se imprecisos. Entretanto, sabe-se que o NaCl é composto por aproximadamente 60% de cloro e cerca de 40% de sódio. Nesse sentido, a Pesquisa Nacional de Orçamentos Familiares (2008-2009) mostrou que a ingestão média de sal é de 12 g/dia, equivalente a 4,7 g/dia de sódio, mais do que o dobro do recomendado pela OMS. Em 2013, o Ministério da Saúde incluiu questões sobre consumo de sal na Pesquisa Nacional de Saúde e realizou coletas de urina para estimar esse consumo. Este foi o primeiro estudo nacional a fazer isso, revelando que cerca de 75% da população consome mais de 8 g/dia de sal, com pequenas variações regionais (Mill *et al.*, 2019; Socesp, 2024).

A história mostra que a produção de sal marinho no Brasil é significativa. Porém, insuficiente para o adequado atendimento das necessidades humanas, animais e dos processos industriais devido ao seu elevado nível de demanda. Entretanto, em levantamento realizado de um período de trinta anos (1960 a 1990), identificou-se um significativo crescimento na produção, embora com algumas flutuações anuais (Andrade, 2018).

O Brasil fechou o ano de 2023 ocupando o 11º lugar entre os maiores produtores de sal do mundo, com uma produção total estimada em 6.600.000 toneladas métricas, distribuídas entre sal de evaporação solar, sal-gema e sal de evaporação a vácuo (Estados Unidos, 2024).

Em maio de 2024, as exportações de sal do Brasil alcançaram US\$ 2,17 milhões, enquanto as importações foram de US\$ 6,25 milhões, resultando em um déficit comercial de US\$ 4,08 milhões. Comparado ao mesmo período do ano anterior, a queda nas exportações foi de 40,6%, de US\$ 3,65 milhões para US\$ 2,17 milhões, e as importações diminuíram 23,8%, de US\$ 8,2 milhões para US\$ 6,25 milhões. A maior parte das exportações foi destinada à Nigéria (US\$ 1,94 milhão) e Argentina (US\$ 51,7 mil), enquanto as importações vieram principalmente do Chile (US\$ 5,87 milhões) e Paquistão (US\$ 151 mil). A queda nas exportações foi majoritariamente devido à redução de envios para o Chile, Alemanha e Reino Unido, e a redução nas importações foi influenciada pelo menor volume de compra do Paquistão, Alemanha e África do Sul (The Observatory of Economic Complexity, 2024).

De acordo com a Agência nacional de Mineração (ANM), as principais salinas de evaporação solar do país estão localizadas nos estados do Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí e Rio de Janeiro. Com o estado do Rio Grande do Norte ocupando a posição de maior destaque entre todos os estados produtores, consolidando sua posição como o principal produtor nacional (Brasil, 2018).

4.3 Salinas solares: funcionamento e produção de água residuária

O litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte concentra as maiores salinas de evaporação solar do país. Essas salineiras ocupam uma área total de 41.718 hectares, dos quais 73,5% são, de fato, explorados pela atividade salineira (Camara, 2021). Foi nessa região que, de forma empírica, os produtores identificaram as maiores potencialidades para a produção de sal, o qual atende a maior parte do consumo nacional (Diniz; Vasconcelos, 2017).

Um dos fatores que contribuem para a alta produtividade do empreendimento salineiro é o clima característico da região, com ventos fortes e constantes, longos períodos de seca, alta incidência solar e intensa evaporação diária (Camara, 2021). Somado a isso, estudos realizados por Diniz e Vasconcelos (2017), apontam que, além do clima, as planícies fluviomarinhas dos rios Apodi-Mossoró, Piranhas-Açu e Galinhos-Guamaré reúnem outros condicionantes como solos menos permeáveis, menor transporte longitudinal de sedimentos e assoreamento dos estuários por parte das dunas móveis, maior salinidade das águas e deposição de sedimentos das frações silte e argila, atribuindo a região grandes potencialidades para a produção de sal marinho.

A combinação desses fatores transforma o estuário em um ambiente hipersalino durante grande parte do ano, especialmente na estação seca, com salinidade variando entre 45 e 90 ppm (Camara, 2021). Ecossistemas hipersalinos são considerados ambientes extremos devido às suas elevadas concentrações de sal, muito superiores às da água do mar (~35 ppm). Há exemplo desses ambientes destacam-se salinas solares, lagos naturais e bacias hipersalinas no fundo do mar (Costa *et al.*, 2015).

As salinas solares localizadas próximas à foz dos estuários obtêm água com variações mínimas de salinidade ao longo do ano, o que permite uma produção constante, já que a salinidade do Oceano Atlântico nessa área permanece praticamente estável (~35 ppm). Por outro lado, as salinas situadas nas partes superiores dos estuários são afetadas pelas flutuações sazonais do corpo hídrico, onde os fluxos de águas doce ou salobra são predominantes no período de janeiro a junho, e os maiores níveis de salinidade são observados apenas nas desembocaduras dos rios (Fernandes *et al.*, 2022).

A coleta de água estuarina ou marinha é a etapa inicial da produção de sal nas salinas solares. Nesse processo a água é bombeada do mar, estuário ou canal, também chamado de <levada mãe>, para tanques de grandes dimensões (cerca de 600 a 1.000 m²) e baixa profundidade (entre 0,80 m a 1,00 m). Os cercos, como é conhecido esse tipo de tanque, são

intercomunicados, onde a água vai passando de um para outro a medida em que o nível de salinidade aumenta. A salinidade é medida em graus Baumé (°Bé), que configura a escala de densidade da água salina. Portanto, a água entra no primeiro tanque com 4 °Bé e sai no ultimo com 6 °Bé (Andrade, 2018).

A escala de Baumé foi desenvolvida por Antoine Baumé, que publicou na revista L'Avant, em 1768, instruções para a fabricação de hidrômetros utilizados na medição da densidade de soluções industriais, principalmente para líquidos mais densos que a água, como soluções salinas. Para tanto, existem duas fórmulas usuais, a primeira (equação 1) destinada à líquidos mais pesados e a segunda (equação 2) para líquidos mais leves que a água (Oliveira; Melo Filho; Afonso, 2013; Green; Perry, 2008).

Equação 1, destinada a líquidos mais pesados que a água.

$$^{\circ}\text{Bé} = 145 - \frac{145}{sp}$$

Equação 2, utilizada para líquidos mais leves que a água.

$$^{\circ}\text{Bé} = \frac{140}{sp} - 130$$

Em que:

°Bé - Densidade em graus Baumé

sp - Densidade em g/ml

Quando a salinidade atinge 6 °Bé, a água é transferida para tanques menores, com dimensões entre 400 e 600 m² e mais rasos que os anteriores, conhecidos como evaporadores, conectados por canais de passagem. Durante o processo de evaporação, os evaporadores elevam a salinidade da água de 7 °Bé para 23 °Bé, faixa em que os sais menos solúveis, como o carbonato de cálcio (CaCO₃) e o sulfato de cálcio (CaSO₄), começam a sedimentar. A precipitação do CaSO₄, por exemplo, ocorre quando a salmoura atinge uma concentração de 11,7 °Bé (Oliveira Junior, 2017; Andrade, 2018).

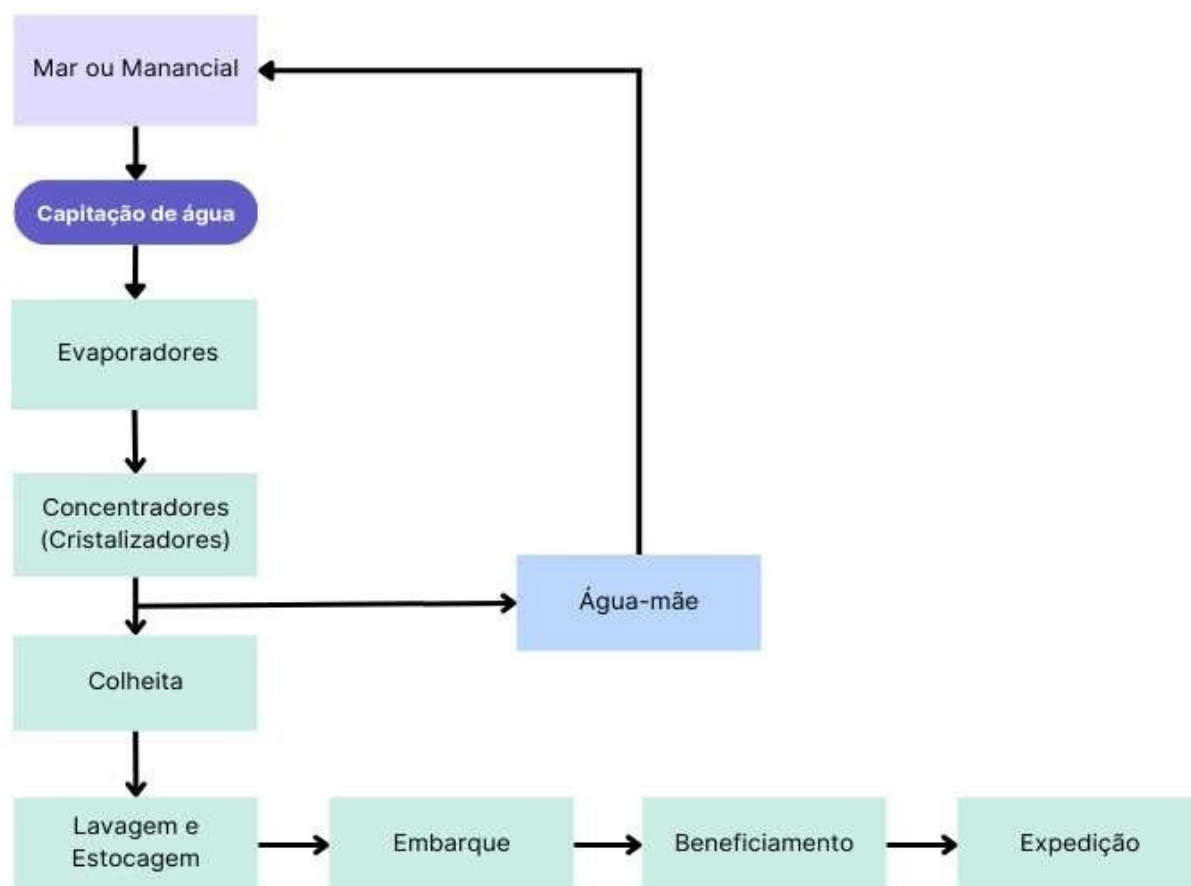
A água, ao atingir 23 °Bé, é conduzida ou bombeada para tanques concentradores (cristalizadores), acelerando o processo de evaporação devido sua pouca profundidade, passando de 24 °Bé para 28 °Bé. É nessa fase que ocorre a formação do cloreto de sódio (NaCl) por precipitação. Quando a água atinge a densidade de 28 °Bé é o momento em que ocorre a

etapa de colheita, pois acima disso o sal perde qualidade devido a precipitação indesejada de outros minerais como o Cloreto de Magnésio (MgCl_2), conforme apontado por Clemente *et al.* (2021).

Para que seja realizada a etapa de colheita do NaCl, o efluente, conhecido como água-mãe, que nesse momento está com cerca de 29 °Bé, é drenado e retorna aos rios ou mar. Então, o sal é coletado, geralmente lavado e empilhado, finalizando o processo de produção do NaCl (Oliveira Junior, 2017).

Frequentemente a produção de sal ocorre entre julho e dezembro, pois durante a estação chuvosa, a evaporação da água é drasticamente reduzida e a chuva impede a formação de uma crosta protetora sobre o sal empilhado (Andrade, 2018). No entanto, o trabalho continua nos meses subsequentes com o beneficiamento do NaCl, ocorrendo em duas etapas: Em primeiro a moagem, direcionada às indústrias agropecuária e de base; em segundo o refino, direcionado ao atendimento das indústrias químicas, farmacêuticas, alimentícias, entre outras (Silva *et al.*, 2023b).

Figura 1: Fluxograma da produção de sal.



Fonte: Autoria própria (2024).

Um ponto importante a ser destacado nesse processo é a geração de água-mãe, que retorna ao corpo hídrico receptor sem o devido tratamento (Oliveira Junior, 2017). O lançamento inadequado do efluente de salinas solares podem causar significativas alterações nas características do corpo receptor (Fernandes *et al.*, 2022).

Nesse sentido a resolução CONAMA n° 430/2011 é a principal norma que regulamenta a disposição de águas residuárias de atividades industriais no Brasil. Ela complementa e atualiza a resolução CONAMA n° 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes para o seu enquadramento, além de estabelecer condições e padrões para que o lançamento de efluentes não comprometa a qualidade hídrica do corpo receptor (Brasil, 2005; Brasil, 2011).

Dessa forma, ambas as resoluções citadas visam proteger a qualidade dos recursos hídricos e minimizar os impactos ambientais das atividades industriais, sendo de fundamental importância o conhecimento de tais impactos, visando o correto atendimento dessas legislações, para que se alcance maior sustentabilidade da atividade salineira (Brasil, 2005; Brasil, 2011).

4.4 Impactos Ambientais

O homem é altamente dependente dos recursos marinhos e dos benefícios econômicos por eles proporcionados. Devido a isso e ao fácil acesso ao mar, a maioria da população mundial passou a residir perto dos oceanos (Vital, 2021).

As regiões próximas aos oceanos, conhecidas como Áreas Úmidas, atuam como zonas de transição entre os ambientes terrestres e aquáticos, sendo frequentemente inundadas por água doce, salobra ou salgada. Essas áreas, que podem ser de origem natural ou artificial, estão presentes tanto em regiões costeiras quanto continentais. No litoral semiárido brasileiro, existe uma rica diversidade de áreas úmidas costeiras e estuarinas, tanto naturais quanto artificiais. As salinas solares nessas áreas são vistas como uma significativa fonte de renda para moradores locais e desempenham importantes serviços ambientais, possuindo grande relevância ecológica na região (Saldanha; Costa, 2019).

Ao captarem água dos estuários ou do mar, as salinas solares passam a abrigar uma biodiversidade típica desses ambientes, incluindo peixes, caranguejos e camarões que são capturados nas fases de larvas ou juvenis pelos sistemas de captação de água. Esta biota é explorada através da pesca artesanal nessas áreas, tornando o pescado uma fonte crucial de sustento e de proteína animal para muitas famílias. Além disso, as salinas funcionam como

habitats alternativos para a biota estuarina, atuando como refúgios e zonas de alimentação em áreas costeiras frequentemente modificadas (Costa *et al.*, 2014b).

No tocante à intensiva ocupação das zonas costeiras, Costa *et al.* (2014b) destacam a importância das salinas solares como refúgios para aves aquáticas migratórias e espécies endêmicas, oferecendo locais para alimentação, abrigo e reprodução. Consideram a conservação dessas espécies um dos principais motivos para a valorização das salinas como zonas úmidas. Para os autores, outro benefício ambiental de grande significância proporcionado pela construção desses ecossistemas artificiais é a transformação de planícies hipersalinas de supramaré em ecossistemas aquáticos produtivos, sem a necessidade de alterações geotécnicas ou químicas do solo.

Por outro lado, a concentração humana em zonas costeiras faz com que esses ambientes tenham que absorver os impactos das atividades antrópicas, aumentando sua vulnerabilidade a desastres (Vital, 2021).

As demandas populacionais e econômicas, por meio do desenvolvimento humano e industrial, exercem fortes pressões aos ecossistemas costeiros, comprometendo sua integridade (Pinheiro, 2016). Para Fernandes *et al.* (2022), aumentos significativos da temperatura dos corpos d'água, geralmente causados por despejos de efluentes dos processos industriais, como é o caso das salineiras solares, podem prejudicar o crescimento e reprodução de organismos aquáticos sensíveis a essas variações. Ou seja, esses efluentes podem modificar as características abióticas dos sistemas.

As zonas costeiras apresentam processos ecológicos, ecossistemas e paisagens com características altamente diversificadas, como manguezais, estuários, praias, barreiras e recifes de coral, cada um com suas próprias dinâmicas físicas e biológicas (Vital, 2021). Os serviços oferecidos por esses ambientes podem estar gravemente ameaçados, afetando o bem-estar humano; entre os mais críticos estão os de provisão, seguidos pelos de regulação, especialmente no que diz respeito ao agravamento das mudanças climáticas (Silva *et al.*, 2024).

Portanto, os efluentes das salineiras solares, podem poluir os ecossistemas estuarinos e marinhos, ocasionando uma série de impactos negativos como a alteração da qualidade da água, causando a migração ou morte de peixes, moluscos e crustáceos. Além disso, entre os impactos negativos mais significantes estão a destruição de manguezais, a interrupção dos cursos d'água, a salinização das áreas de produção, a mudança na umidade regional devido ao aumento da evaporação pela alta salinidade da água e incidência solar, e a alteração dos ecossistemas terrestres (Fernandes *et al.*, 2022).

O desmatamento que, geralmente ocorrem nas áreas de manguezais, resíduos sólidos prejudiciais e descarte inadequado de efluente resultam na perda da biodiversidade local. Já o tráfego terrestre e os resíduos sólidos também causam alterações na composição natural do solo da região, além de contribuir para a poluição dos corpos hídricos. Somado a isso, as salinas solares que começaram suas produções de forma artesanal, hoje são, em sua grande maioria, altamente mecanizadas, produzindo diversos resíduos com alto potencial poluidor em seus processos de manutenção, podem corroborar de forma significativa com os processos de degradação do meio ambiente (Silva *et al.*, 2024).

4.5 Nutrientes para fins de adubação

O uso de fertilizantes atravessa gerações. Sua aplicação teve início durante a Revolução Industrial, passando a ganhar notoriedade e a desempenhar um papel crucial no suporte à crescente população global (Rezende; Gameiro, 2022). O aumento da demanda por fertilizantes impulsiona as importações globais que totalizaram US\$ 151 bilhões em 2022, representando um aumento médio de 119,4% desde 2018, quando as aquisições foram avaliadas em US\$ 68,8 bilhões. Brasil, Índia, Estados Unidos, China continental e França são os principais importadores do produto no mundo e juntos representaram 43,1% das compras em 2022 (Workman, 2023; Oliveira; Dorner; Almeida, 2023).

O Brasil vem se destacando entre os principais fornecedores globais de produtos agropecuários, impulsionado pelo robusto desempenho do agronegócio nacional. Esse crescente desempenho da cadeia agrícola brasileira está diretamente atrelado ao uso de fertilizantes, que são cruciais para sustentar o crescimento contínuo e a alta produtividade das lavouras. Esse aumento da produção agrícola faz com que a demanda por esses insumos ultrapasse a capacidade de produção nacional (Mantovani; Valente; Bastos, 2023).

A demanda brasileira por fertilizantes tem crescido consistentemente, especialmente desde a crise econômica de 2008, com um aumento médio de 8,6% nas vendas, elevando o país a patamares jamais vistos de dependência de fertilizantes e matérias-primas relacionadas, sendo obrigado a ter cerca de 70% dos insumos utilizados provenientes de importações. Este cenário faz com que o setor agrícola brasileiro enfrente desafios significativos, já que a produção nacional de fertilizantes não tem acompanhado o ritmo de consumo, permanecendo praticamente estagnada nos últimos anos (Oliveira; Malagolli; Cella, 2019).

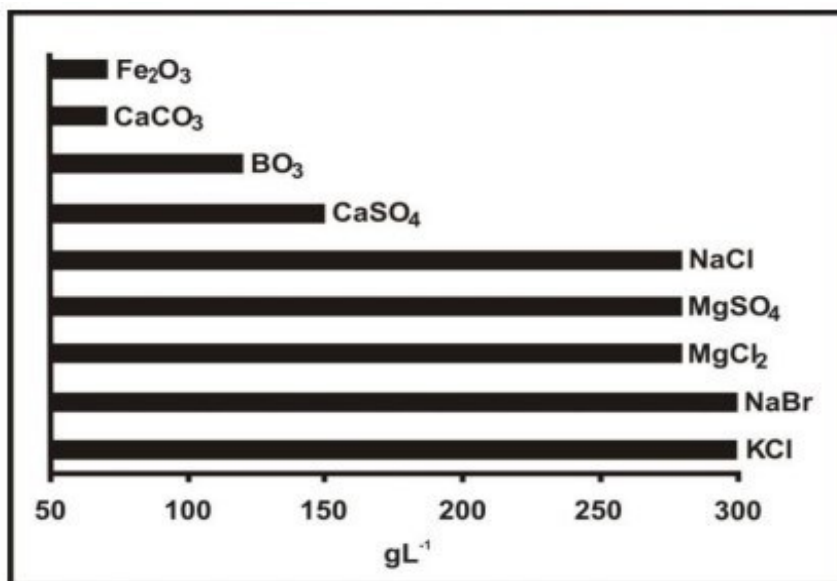
Entre as diferentes categorias de fertilizantes importados pelo país em 2022, destacam-se os produtos à base de nitrogênio (73,6%), fertilizantes potássicos (23%), e fosfáticos (2,7%). Excluindo as subcategorias de fertilizantes minerais ou químicos, o restante, equivalente a 0,6%, corresponderam a fertilizantes de origem animal ou vegetal (Workman, 2023).

Embora o país seja o oitavo com maiores reservas de potássio no mundo, sua exploração é limitada, resultando em baixa produção doméstica. No que se refere ao nitrogênio, o Brasil possui boa capacidade industrial, entretanto, esse seguimento encontra-se majoritariamente parado ou arrendado para o setor privado. Quanto ao fósforo, as reservas brasileiras são predominantemente do tipo ígnea, com teor de fósforo inferior às rochas marinhas importadas. Esses insumos são, geralmente, cotados em dólar deixando-os vulneráveis as oscilações de mercado e afetando o custo de produção agrícola (Rezende; Gameiro, 2022).

Sabe-se que o percentual médio de sais dissolvidos na água do mar é de 3,5%, ou seja, 35 gramas de sais para cada litro de água (Pinheiro, 2016). Os principais íons, que juntos representam 99,9% dos sais encontrados na água do mar, incluem os cátions Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ , Sr^{2+} e os ânions Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Br^- , BO_3^{2-} e F^- , em ordem decrescente de concentração (Loganathan; Naidu; Vigneswaran, 2017).

Nesse contexto, as salineiras solares funcionam como uma importante alternativa para a redução da dependência brasileira de fertilizantes importados. De acordo com o exposto no item 4.3, no processo de produção de sal marinho os sais dissolvidos se precipitam de maneira ordenada e sequencial, sendo os de menor solubilidade em primeiro (Figura 01). Em termos de precipitação em grandes quantidades, o sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), conhecido como gipsita, é o primeiro a precipitar, seguido pelo CaSO_4 (anidrita) e pelo NaCl , entre outros minerais (Costa *et al.*, 2014a; Camara, 2021).

Figura 2: Ordem de precipitação nas salineiras dos principais sais encontrados na água do mar.



Fonte: Costa *et al.* (2014a).

Durante o processo de extração do sal da água do mar, uma variedade de minerais como Na, Ca, Mg, K, Li, Sr, B e U é gerada como subproduto na salmoura remanescente. Em um estudo de caso, Oliveira Junior (2017) identificou que a água-mãe remanescente de uma salineira apresentou cerca de 82,80 gramas de cloreto de magnésio e 62,30 gramas de sulfato de magnésio por litro de solução.

Abdulsalam *et al.* (2017) em trabalho realizado em uma central de dessalinização na Arábia Saudita, com base nos níveis de minerais dissolvidos na salmoura e uma vazão de 3.393.600 m³/dia de efluente, estimaram que o valor de mercado de Ca, Mg, K e Cu, se fossem extraídos com sucesso da salmoura rejeitada, seria de aproximadamente US\$ 9,07 bilhões por ano.

Loganathan, Naidu e Vigneswaran (2017) destacam que os lucros obtidos a partir da recuperação desses subprodutos dependem especialmente de suas concentrações na salmoura e da cotação de mercado de cada mineral. Para os autores, caso sejam desenvolvidos métodos que permitam a recuperação mais econômica dos minerais (exemplo: Na, Ca, Mg, K, Li, Sr, Br, B e U), estes se tornam mais atrativos, quando comparados com a exploração terrestre. Ainda apontam que se esses minerais puderem ser recuperados de maneira economicamente viável, não apenas os custos de produção de sal serão reduzidos, mas também haverá uma diminuição considerável nos problemas de poluição associados à disposição final da salmoura.

Os efeitos desses minerais, em grandes concentrações no meio receptor, podem ser mitigados com o controle da vazão de efluentes e a adoção de técnicas de tratamento ou reúso.

Essas medidas são essenciais para promover o desenvolvimento sustentável da atividade salineira, considerando sua relevância socioeconômica regional e nacional (Fernandes, 2019).

4.6 Principais aplicações da água residuária de salinas solares

O descarte inadequado da salmoura gerada na produção de sal apresenta grandes riscos ambientais, tornando inviável sua liberação, sem tratamento e devido controle, em corpos d'água e no solo. Nos Emirados Árabes Unidos, por exemplo, o despejo da salmoura em reservatórios sobre solos permeáveis, com pouca capacidade de retenção, já provocou impactos no solo e nas águas subterrâneas, mesmo estas estando a profundidades entre 100 e 150 metros. Isso destaca a necessidade urgente de métodos mais eficientes para o descarte seguro desse efluente (Sánchez; Nogueira; Kalid, 2015).

Nesse sentido várias técnicas de reúso e recuperação de sais contidos na água-mãe vem sendo desenvolvidas nos últimos anos, como processos térmicos, membranas seletivas, precipitação e cristalização, além da utilização direta da salmoura, proporcionando novas perspectivas ao setor de produção de sal marinho. A recuperação de sais e a utilização direta dos resíduos são vistas como estratégias promissoras e sustentáveis. Além disso, a recuperação de sais oferece benefícios adicionais a longo prazo, como a geração de produtos de maior valor a partir do resíduo salino, redução dos custos de descarte e renda extra com a venda de produtos recuperados, além da recuperação significativa de água em diferentes etapas (Bagastyo *et al.*, 2021).

4.6.1 Tecnologias de recuperação

4.6.1.1 Membrana

As tecnologias de membranas impulsionadas por pressão têm ganhado destaque sendo amplamente utilizadas em diversos processos industriais, municipais e domésticos, para tratamento de águas residuárias e dessalinização da água do mar, sendo uma das soluções mais eficientes em termos de consumo de energia para realizar separação de forma sustentável. As membranas são classificadas como osmose reversa (RO), nanofiltração (NF), ultrafiltração (UF) e microfiltração (MF), com cada categoria sendo aplicada a diferentes tipos de separação,

conforme a necessidade específica do processo e tamanho de poros da membrana (Li; Shi; Yu, 2019; Zhang *et al.*, 2020).

As membranas NF, por exemplo, são capazes de reter e separar, de forma eficiente, íons monovalentes e multivalentes, além de distinguir pequenas moléculas orgânicas com diferentes pesos moleculares (Zhang *et al.*, 2020).

Essa técnica de NF foi aplicada em estudo realizado por Morgante *et al.* (2024) para separar seletivamente íons monovalentes de divalentes, visando otimizar a recuperação mineral de água do mar e salmoura de osmose reversa. Foram testadas cinco membranas comerciais (NF90, NFS, NFX, VNF1 e DK), a fim de avaliar seus desempenhos na retenção de materiais principais e traços sob pressões de 8 a 30 bar, em configurações de folha plana. O principal destaque foi para a membrana DK por sua maior permeabilidade e seletividade para íons multivalentes, mostrando seu potencial e viabilidade econômica para pré-concentração seletiva de minerais, sendo que todas as membranas mostraram rejeição eficiente de cátions multivalentes, com taxas superiores a 90%.

4.6.1.2 Eletrodiálise

A eletrodiálise (ED), assim como RO, é um processo baseado em membranas. Entretanto, diferentemente da osmose reversa em que a água atravessa a membrana sob pressão, enquanto os sais são retidos, na eletrodiálise os sais passam pela membrana sob a ação de uma corrente elétrica. Quando membranas de troca aniônica e catiônica são alternadas entre um ânodo e um cátodo, forma-se uma pilha de ED. Com a aplicação de corrente contínua, os cátions migram em direção ao cátodo e os ânions em direção ao ânodo, criando fluxos dessalinizados (diluídos) e concentrados em canais alternados, permitindo a remoção de íons e pequenas moléculas carregadas de forma controlada, tornando-se uma técnica adequada para pré-dessalinização (Galama *et al.*, 2014).

Em experimento com salmoura de sal marinho, Zhang *et al.* (2022) utilizaram a eletrodiálise para produzir um concentrado de sais monovalentes de alta pureza, do qual o KCl poderia ser recuperado, além de uma solução diluída contendo principalmente sais de magnésio. A pesquisa investigou o desempenho da separação seletiva de íons, avaliando os efeitos das razões Mg^{2+}/K^{+} , temperatura, voltagem aplicada, razão Na/K e razão SO_4^{2-}/K em soluções complexas. A alta concentração de Mg^{2+} reduziu o fluxo e prejudicou a separação de K/Mg .

no sistema Kz, $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^{-}$. O aumento da temperatura e voltagem melhorou o fluxo e a recuperação de K^{+} .

No sistema com Naz, Kz, $\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^{-}$, Zhang *et al.* (2022) observaram que a elevada concentração de Naz prejudicou o fluxo de Kz, enquanto a adição de SO_4^{2-} no sistema reduziu o fluxo de Mg^{2+} , favorecendo a separação de Kz. Após 2,5 horas de eletrodialise seletiva do efluente marinho, a razão Mg^{2+}/Kz diminuiu de 10,31 para 1,15, com recuperação de 89,06% de potássio e consumo energético de 0,089 kWh/mol Kz. O Mg^{2+} e Naz competem com o Kz pelos locais de troca iônica, enquanto o sulfato facilita a separação. Para os autores, embora a aplicação de eletrodialise seletiva seja eficaz, são necessárias melhorias na recuperação, concentração e eficiência energética para uma produção mais eficiente de KCl.

A baixa eficiência energética ainda é considerada um dos principais limitadores na implantação de sistemas de tratamento por ED. Nesse sentido, essa técnica deve ser avaliada de forma criteriosa, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico, em relação à sua viabilidade, devido à potência energética necessária para seu funcionamento, especialmente em projetos de médio e grande porte. Uma alternativa para essa problemática seria a integração de usinas fotovoltaicas ao sistema, o que aumentaria os custos de implantação. Portanto, a viabilidade do tratamento por ED dependerá principalmente dos custos de implantação e operação, assim como do valor de mercado dos produtos que podem ser recuperados.

4.6.1.3 Extração por sorção

O termo sorção refere-se ao processo em que uma substância, conhecida como sorbato, é retida na superfície (adsorção) ou no interior (absorção) de outras substâncias, chamadas de sorventes. O processo de Adsorção refere-se ao uso de materiais sólidos para remover componentes presentes em soluções líquidas e gasosas, através da transferência preferencial dessas substâncias para a superfície ativa do sólido, sendo utilizado desde o século XVIII para resolver diversos problemas relacionados à poluição ambiental (Ani *et al.*, 2024).

Nesse sentido, Vallés *et al.* (2024) analisaram a eficiência do método de sorção, testando três sorventes poliméricos comerciais (IRC747, S940 e MTX8010), dois inorgânicos (SbTreat e SrTreat) e um inorgânico sintetizado (CuHCF), na recuperação de elementos-traços como cobalto, gálio, germânio, rubídio, estrôncio e cério de salmouras de salinas. Nessa análise foram realizados testes cinéticos em tabelas e experimentos de coluna dinâmica. Os primeiros demonstraram rápida retenção desses elementos, em até 30 minutos, pela maioria dos sorventes,

enquanto no segundo os sorventes poliméricos, especialmente os aminofosfônico (IRC747 e S940), apresentaram alta capacidade de sorção para cobalto e gálio ($\geq 2,1$ mg/g).

Ainda segundo Vallés *et al.* (2024), o SrTreat mostrou alta capacidade se sorção para estrôncio (7 mg/g), enquanto o SbTreat alcançou 20 mg/g para gálio e germânio, e o CuHCF, por sua vez, teve maior afinidade por rubídio e cério, com retenções de 10 mg/g e 70 mg/g, respectivamente. A dessorção ácida foi eficaz na recuperação de mais de 70% dos elementos sorvidos, com fatores de concentração de até 708 para cobalto usando os sorventes IRC747 e S940, destacando o potencial de valorização das salmouras de salinas.

Apesar de possuir uma eficácia considerável na recuperação de elementos sorvidos, vale destacar que o tratamento por sorção não elimina a água residuária do processo de produção de sal por evaporação solar. O uso de ácidos no processo de dessorção pode elevar o nível de acidez da água-mãe residual, além de produzir outros resíduos químicos que, se não tratados adequadamente, também podem contaminar o corpo receptor, exigindo tratamentos adicionais antes de seu descarte final.

4.6.1.4 Operação térmica

As tecnologias acionadas por calor, utilizadas em processos de dessalinização, podendo ser empregadas na recuperação de minerais da água-mãe, baseiam-se nos processos de evaporação 4 mecânica ou natural 4 e cristalização. O fornecimento de energia térmica ao sistema, na fase líquida, força sua mudança para vapor ou sólido, proporcionando a separação de um componente dos outros (Sahu, 2021).

Dentre as técnicas de dessalinização térmica destacam-se a destilação flash multiestágio (MSF), destilação multiefeito (MED) e destilação por membrana (MD). Esses métodos elevam a concentração da salinidade até atingir o ponto de saturação, ponto em que os sais cristalizam. Embora eficazes, são intensivos em energia e requerem calor de alta qualidade (Zhang *et al.*, 2021).

Em trabalho realizado por Antonyan (2019), foi feita a comparação do consumo de energia de três métodos (MSF, MED e MD) de dessalinização, categorizando as técnicas existentes. Os resultados mostraram que as técnicas MSF e MED são mais eficientes para águas com elevada salinidade; entretanto, possuem maior pegada energética, com consumos de 17,1 kWh/m³ e 11,9 kWh/m³, respectivamente. Já as tecnologias baseadas em membranas, como RO, apesar de apresentarem menor eficiência, são menos intensivas em energia, variando

conforme o tipo de alimentação: 1,9 kWh/m³ para água salobra e entre 4,3 e 4,4 kWh/m³ para água do mar.

Em um país como o Brasil, onde o custo da energia elétrica ainda é elevado, o tratamento por MSF, MED e MD, assim como os sistemas de tratamento por ED, é muito limitado devido à alta demanda energética, o que aumenta seus custos de operação. Por outro lado, além de proporcionar a recuperação de elementos contidos na água-mãe, esses métodos de tratamento fornecem água de ótima qualidade, que poderia ser utilizada tanto para consumo humano quanto para outras finalidades, minimizando um problema crônico: a falta de água de qualidade no semiárido brasileiro.

As tecnologias baseadas em membranas, apesar de terem uma menor pegada energética, são menos robustas que as tecnologias de MSF, MED e MD. Elas apresentam problemas de incrustações e obstruções, o que reduz sua vida útil e aumenta a necessidade de manutenção. Portanto, cada tecnologia deve ser avaliada e aplicada de acordo com as necessidades de cada região.

4.6.1.5 Geração de energia

A água-mãe residuária de salinas solares possui um bom potencial para geração efetiva de energia. Se o potencial de gradiente em salmouras for bem aproveitado, este pode produzir até 60% de toda a demanda global de eletricidade. Um nível mais elevado de salinidade presente na salmoura tende a aumentar a geração de energia osmótica, o que se configura como uma das vantagens de se utilizar a salmoura do processo de produção de sal (Ogunbiyi, 2021).

A energia osmótica se refere ao processo de osmose retardada por pressão (PRO), onde é usada uma membrana semipermeável para capturar a energia livre de Gibbs, permitindo que a água se mova de uma solução de baixa concentração (como água doce ou efluentes) para uma de alta concentração (como água do mar ou retentado de osmose reversa). Durante a diluição da solução de alta concentração, a energia livre de Gibbs é convertida em pressão hidráulica, que pode ser usada para gerar energia mecânica ou elétrica. A permeabilidade da membrana é crucial para maximizar a geração de energia (Zhang *et al.*, 2021).

Helfer, Lemckert e Anissimov (2014) destacam que o pré-tratamento das soluções de alimentação e extração é necessário para evitar a incrustação e prolongar a vida útil da membrana. Ainda ressaltam que a principal vantagem da tecnologia PRO é sua capacidade de gerar energia de forma constante e confiável, superando fontes renováveis como a eólica e a

solar, além de seus baixos impactos ambientais. Segundo os autores, para que a energia osmótica seja economicamente viável ela precisa gerar uma potência mínima de 5 W/m^2 , tornando essa tecnologia tão ou mais competitiva do que as outras fontes renováveis atuais.

Nesse sentido, testes de PRO utilizando membranas de folha plana e de fibra oca, produzidas com diferentes materiais, foram realizados. Para membranas de folha plana com camada ativa de poliamida com suporte semelhante a uma esponja resultou em uma potência de até 12 W/m^2 , utilizando água deionizada como alimentação e solução de NaCl, sob 15 bar de pressão hidráulica. Já as membranas de fibra oca, vistas como mais vantajosas que as de folha plana para aplicações práticas, devido à sua alta densidade de empacotamento, menor espaço ocupado e facilidade de expansão, fabricadas com um suporte de polietersulfona, atingiram uma densidade de potência de $24,3 \text{ W/m}^2$ sob 20 bar de pressão (Kim *et al.*, 2015).

Embora a PRO seja uma tecnologia que tem mostrado avanços significativos nos últimos anos em termos de capacidade e eficiência na geração de energia, ainda carece de alternativas que garantam sua viabilidade a longo prazo. Essa tecnologia não pode ser avaliada de forma isolada, pois a necessidade de sistemas de pré-tratamento, por exemplo, prejudica consideravelmente sua implementação do ponto de vista técnico e econômico.

4.6.2 Técnicas de reúso

4.6.2.1 Regeneração de zonas úmidas

Uma das técnicas mais importantes que podem ser aplicadas para alcançar um melhor gerenciamento das águas residuárias do processo de produção de sal marinho inclui a regeneração de zonas úmidas, pântanos e ecossistemas salobros em processo de degradação devido à seca. Esses ambientes podem ser aproveitados para o desenvolvimento agrícola, pecuário e industrial (Giwa *et al.*, 2017).

Sistemas de tratamento de zonas húmidas utilizam processos naturais para melhorar a qualidade da água por meio de mecanismos físicos, químicos e biológicos. A água se move lentamente pelos pântanos, prolongando o contato com micro-organismos, que são responsáveis pela maior parte do tratamento. Tanto organismos aeróbicos quanto anaeróbicos ajudam a remover poluentes como nitratos, fosfatos, amônia e manganês. As plantas, além de melhorar a estética, oferecem superfície para o crescimento microbiano. Zonas húmidas construídas e pântanos salobros são métodos de baixo custo e baixa manutenção para o

tratamento de concentrados, com benefícios adicionais como criação de habitats e paisagens atraentes (Chakraborti; Bays, 2023).

Scholes *et al.* (2021) destacam reduções de 60-80% nas concentrações de metais (Cobre e Zinco) em pântanos que tratam águas de processos industriais, através da absorção, adsorção e precipitação. Esses mesmos mecanismos também podem ser aplicados em áreas úmidas, projetadas para remover nutrientes e compostos orgânicos do concentrado de RO, no tratamento da salmoura das salinas solares.

Entretanto, para que esses ambientes possam ser aproveitados para o desenvolvimento da agricultura e pecuária, é necessário avaliar, por meio de pesquisas e monitoramento constante, o potencial de fitoextração das plantas que podem ser cultivadas e/ou utilizadas na alimentação animal. Isso porque elementos como metais pesados, com características de bioacumulação, presentes na água do mar e, conseqüentemente, na água-mãe, podem ser extremamente perigosos e comprometer a saúde da população, reduzindo drasticamente a viabilidade do sistema.

4.6.2.2 Aplicações agrícolas

O uso de terras marginais (ex.: áreas salinizadas) e recursos hídricos alternativos (ex.: águas salinas) será essencial para atender às futuras demandas alimentares da humanidade. Entretanto, o uso desses recursos exige práticas rigorosas de gestão ambiental e monitoramento. Embora não adequadas para culturas comuns, águas salinas podem ser usadas como um componente fundamental na expansão do cultivo de plantas tolerantes ao sal (halófitas), na criação de animais que podem consumir água e forragem salina, e no desenvolvimento da aquicultura salina e de algas, todos essenciais para aumentar a produção de alimentos (Khorsandi; Siadati; Rastegary, 2020).

Salmouras, como as residuárias da produção de sal marinho, podem ser utilizadas para o cultivo ou irrigação de diversas espécies tolerantes ao sal. Entre as opções mais amplamente investigadas estão o cultivo de microalgas e *Artemia* (Giwa *et al.*, 2017).

Microalgas são organismos eucarióticos que realizam fotossíntese, utilizando luz solar, água e dióxido de carbono, liberando oxigênio e gerando biomassa. O ciclo completo de desenvolvimento das microalgas pode variar de 24 horas a vários dias, com capacidade de duplicar sua biomassa a cada poucas horas durante seu estágio de crescimento acelerado (Ahmad *et al.*, 2020). A biomassa das microalgas é uma fonte crucial de alimento para estágios

larvais de peixes, camarões e moluscos, além de demonstrar alta eficiência na produção de biocombustíveis e biogás, podendo ser cultivadas em zonas úmidas artificiais de águas residuárias (Soleimani-Sardo; Khanjani, 2023).

As artemias, conhecidas como camarão de salmoura, pertencem a um grupo de artrópodes, medindo entre 8 e 12 mm. São nativos de regiões da Ásia, Europa, África e Austrália. A maioria das espécies se reproduz sexualmente ou bissexualmente, enquanto uma pequena parte se reproduz por partenogênese, ou seja, sem precisar de um parceiro (Azra *et al.*, 2022). A artemia é um alimento vivo, essencial e econômico, amplamente utilizado na larvicultura de peixes e crustáceos e seus cistos são comercializados em todo o mercado mundial (Van Stappen *et al.*, 2020). As variações globais no preço dos cistos e a alta dependência desse recurso impulsionam sua produção em salinas, bacias artesanais com água salgada não convencional e em canais de drenagem agrícola com alto teor de sal (Soleimani-Sardo; Khanjani, 2023).

Além disso, modelos integrados de produção agrícola demonstram eficácia na gestão estratégica de águas residuárias, como as da produção de sal marinho, diminuindo a pegada ecológica, aumentando a biodiversidade e gerando outros produtos valiosos. A integração de diferentes formas de reaproveitamento da água residuária das salinas solares ao sistema produtivo permite que um subproduto de um processo se transforme em recurso para outro, aumentando os rendimentos agrícolas e promovendo práticas mais sustentáveis, especialmente em regiões como o semiárido brasileiro (Lyra *et al.*, 2021).

Nesse sentido, Sánchez, Nogueira e Kalid (2015) destacam o uso de salmoura na produção de peixes para consumo humano e na geração de forragem para ruminantes locais. Nesse sistema, a salmoura seria utilizada primeiramente na produção de peixes e/ou Spirulina. A água residuária desse processo é então enriquecida com esterco de animais locais e aplicada na irrigação de Atriplex, cujas colheitas servem como alimento para os animais. Essa abordagem visa maximizar o aproveitamento do rejeito de salmoura, ao mesmo tempo que minimiza o impacto ambiental associado a esse efluente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas regiões áridas e semiáridas, devido às baixas precipitações, ocorre escassez hídrica, o que reduz o processo de intemperismo, limitando e afetando as atividades antrópicas, especialmente a agricultura, que demanda e importa grandes quantidades de fertilizantes para suprir suas necessidades nutricionais. Paralelamente, a atividade de produção de sal marinho se destaca no cenário mundial por fornecer sal de alta pureza e qualidade para o atendimento da demanda humana.

Diante do exposto, este trabalho apresentou uma revisão sistemática da literatura sobre as diversas aplicações da água residuária proveniente das salinas solares, com foco em suas potenciais utilizações nos setores agrícola, industrial e energético. Ao longo do estudo, foi possível identificar que a água residuária das salinas solares, normalmente descartada sem tratamento adequado, contém minerais valiosos que, se devidamente aproveitados, podem mitigar os impactos ambientais da atividade salineira e contribuir para a sustentabilidade econômica desses empreendimentos.

Destaca-se que, apesar da atividade salineira oferecer uma série de impactos positivos no âmbito econômico e social, ela também gera um grande volume de efluentes com potencial poluidor, podendo comprometer os ecossistemas estuarinos e marinhos. Esses impactos incluem a alteração da qualidade da água, o que pode causar a migração ou morte de peixes, moluscos e crustáceos.

Além disso, a análise dos dados revelou um cenário promissor para o reaproveitamento desses subprodutos, especialmente em regiões como o Nordeste brasileiro, onde a produção de sal é expressiva e as necessidades por recursos hídricos e minerais são elevadas.

Embora o presente estudo tenha abordado de maneira ampla as aplicações potenciais da água residuária das salinas solares, existem lacunas que precisam ser preenchidas por pesquisas futuras. A maior parte dos trabalhos encontrados na literatura refere-se ao tratamento de águas residuárias da dessalinização de água do mar, tendo como produto principal a água potável, o que demonstra a necessidade de aprofundamento em estudos sobre tecnologias mais eficientes e de menor custo para a extração de minerais presentes na água residuária das salinas solares, como magnésio, potássio e cálcio, maximizando o aproveitamento econômico desses recursos.

Identifica-se, também, a necessidade de pesquisas mais detalhadas sobre os impactos ambientais da reutilização da água residuária de salineiras solares, principalmente em ambientes

estuarinos e marinhos, pois essas são essenciais para garantir que a sustentabilidade seja mantida a longo prazo.

Estudos em projetos-piloto, que explorem a implementação de tecnologias de reúso de águas residuárias em escala industrial, e que avaliem os benefícios econômicos e ambientais, em diferentes contextos geográficos e climáticos, especialmente em pequenas e médias salineiras, são fundamentais para medir o alcance do aproveitamento sustentável e avaliar o potencial de reaplicação em outras regiões.

São necessárias mais investigações para avaliar a eficácia e a segurança do uso da água residuária das salinas solares no setor agrícola, principalmente em solos de regiões semiáridas, que apresentam maior fragilidade. Esses solos exigem o uso de tecnologias apropriadas e práticas agrícolas adaptadas às condições áridas para promover a sustentabilidade da região. Além disso, outras possíveis aplicações industriais também devem ser exploradas.

Por fim, a pesquisa reforça a necessidade de políticas públicas que incentivem o desenvolvimento de soluções sustentáveis para o setor salineiro, promovendo um modelo de produção que alie crescimento econômico à preservação ambiental. O reaproveitamento da água residuária pode não apenas gerar novos mercados e oportunidades, mas também mitigar os impactos negativos dessa atividade sobre os ecossistemas costeiros e estuarinos, assegurando a continuidade da atividade salineira de forma responsável.

REFERÊNCIAS

ABDULSALAM, Alrowaished *et al.* An integrated technique using solar and evaporation ponds for effective brine disposal management. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 36, n. 9, p. 914-925, 2017.

AHMAD, Muhammad Talba *et al.* Applications of microalga *Chlorella vulgaris* in aquaculture. **Reviews in aquaculture**, v. 12, n. 1, p. 328-346, 2020.

ANDRADE, Manoel Correia de. O território do sal: a exploração do sal marinho e a produção do espaço geográfico do Rio Grande do Norte. **Revista GeoInterações**, v. 2, n. 2, p. 71-104, 2018.

ANI, Ijeoma J. *et al.* The Impact of Green Technology on Sorption Processes. 2024.

ANTONYAN, M. Energy footprint of water desalination. Master Thesis, University of Twente 3 Civil and Engineering Management Program, p. 46, 2019.

ARAÚJO, Francisco Clésio Medeiros Dantas de. **Produção do livro paradidático: uma pitada de sal no ensino de geografia**. 2017. Dissertação de Mestrado. Brasil.

AZRA, Mohamad Nor *et al.* Trends and new developments in Artemia research. **Animals**, v. 12, n. 18, p. 2321, 2022.

BAGASTYO, Arseto Yekti *et al.* Resource recovery and utilization of bittern wastewater from salt production: a review of recovery technologies and their potential applications. **Environmental Technology Reviews**, v. 10, n. 1, p. 295-322, 2021.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração (ANM). SUMÁRIO MINERAL 2017. 37. ed. Brasília: ANM, 2019. 201 p. Disponível em: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-deconteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumariomineral/sumariomineral_2017. Acesso em: 14 fev. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União: Sessão 53, Brasília, DF, 18 de maio de 2005. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/atos-normativos-sistema>. Acesso em: 23 de out. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de bio sólido em solos, e dá outras providências. Diário Oficial da União: Sessão 161, Brasília, DF, 21 de agosto de 2020. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/atos-normativos-sistema>. Acesso em: 23 de out. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de

2005. Diário Oficial da União: Sessão 92, Brasília, DF, 16 de maio de 2011. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/atos-normativos-sistema>. Acesso em: 23 de out. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Mineração. **Sumário Mineral brasileiro**. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2018>. Acesso em: 23 jul. 2024.

CAMARA, Marcos Rogério. SALINAS: AMBIENTES EXTREMOS NO NORDESTE DO BRASIL. **CIÊNCIAS DO MAR**, p. 218. Recife, 2021.

CHAKRABORTI, Rajat K.; BAYS, James S. Constructed wetlands using treated membrane concentrate for coastal wetland restoration and the renewal of multiple ecosystem services. **Land**, v. 12, n. 4, p. 847, 2023.

CLEMENTE, Ademir *et al.* Mercado, processo de produção e custos do sal in natura: Um estudo de caso em uma grande salina do Brasil. **Custos e Agronegócio**, v. 17, n. 1, 2021.

COELHO, Caio AS; CARDOSO, Denis HF; FIRPO, Mári AF. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and applied climatology**, v. 125, p. 769-784, 2016.

COSTA, Diógenes Felix da Silva *et al.* Análise dos serviços ambientais prestados pelas salinas solares. **Boletim Gaúcho de Geografia**, v. 41, n. 1, p. 1953209, 2014b.

COSTA, Diógenes Félix da Silva *et al.* Breve revisão sobre a evolução histórica da atividade salineira no estado do Rio Grande do Norte (Brasil). **Sociedade & Natureza**, v. 25, p. 21-34, 2013.

COSTA, Diógenes Félix da Silva *et al.* Geographical location and solar salt production. **Mercator (Fortaleza)**, v. 14, n. 2, p. 91-98, 2015.

COSTA, Diógenes Félix da Silva *et al.* Influência de macroaspectos ambientais na produção de sal marinho no litoral semiárido do Brasil. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 31, n. 3, 2014a.

DANTAS, José Carlos. A geografia dos conflitos territoriais no semiárido brasileiro. 2021.

DINIZ, Marco Túlio Mendonça; VASCONCELOS, Fábio Perdigão. Aspectos históricos e dinâmica locacional da economia salineira brasileira. **Boletim Gaúcho de Geografia**, v. 43, n. 1, 2016.

DINIZ, Marco Túlio Mendonça; VASCONCELOS, Fabio Perdigão. Condicionantes naturais à produção de sal marinho no Brasil. **Mercator (Fortaleza)**, v. 16, p. e16013, 2017.

ELIAS, Miguel *et al.* The role of salt on food and human health. **Salt in the Earth**, v. 19, 2020.

ESTADOS UNIDOS. Geological Survey. **Mineral commodity summaries**. Reston, Virginia, 2024. Disponível em: <https://www.usgs.gov/publications/mineral-commodity-summaries-2024>. Acessado em: 11 Jul 2024.

FERNANDES, Rogério Taygra Vasconcelos. **Atividade salineira em manguezais do semiárido: impactos ambientais e reflexos econômicos da recuperação ou compensação ambiental das áreas degradadas**. 2019.

FERNANDES, Rogério Taygra Vasconcelos *et al.* Capacidade de Diluição de Efluentes da Indústria Salineira em Estuários de Regiões Semiáridas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 217-234, 2020.

FERNANDES, Rogério Taygra Vasconcelos *et al.* Estuaries Environmental Monitoring Associated with Solar Salt Production in the Brazilian Semi-arid. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 65, p. e22210117, 2022.

FERREIRA, Sandra Farias Miranda de; MIRANDA, Antonio Carlos de; GOMES, Haroldo Pereira. Um estudo de uma comunidade de trabalhadores em salinas: o impacto ambiental e uma proposta em educação ambiental. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 8, n. 10, 2015.

FREIXA, Dolores. **Gastronomia no Brasil e no mundo**. BOD GmbH DE, 2017.

GALAMA, A. H. *et al.* Seawater electrodialysis with preferential removal of divalent ions. **Journal of membrane science**, v. 452, p. 219-228, 2014.

GREEN, Don W.; PERRY, Robert H. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 8. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2008.

HELPER, Fernanda; LEMCKERT, Charles; ANISSIMOV, Yuri G. Osmotic power with pressure retarded osmosis: theory, performance and trends3a review. **Journal of Membrane Science**, v. 453, p. 337-358, 2014.

HOI, Elise. Salt of the early civilizations: Case studies on China. **Penn History Review**, v. 18, n. 5, p. 9-7, 2011.

KIM, Jihye *et al.* Recent advances in osmotic energy generation via pressure-retarded osmosis (PRO): a review. **Energies**, v. 8, n. 10, p. 11821-11845, 2015.

LI, Li; SHI, Wenxin; YU, Shuili. Research on forward osmosis membrane technology still needs improvement in water recovery and wastewater treatment. **Water**, v. 12, n. 1, p. 107, 2019.

LOGANATHAN, Paripurnanda; NAIDU, Gayathri; VIGNESWARAN, Saravanamuthu. Mining valuable minerals from seawater: a critical review. **Environmental Science: Water Research & Technology**, v. 3, n. 1, p. 37-53, 2017.

LYRA, Dionysia-Angeliki *et al.* From desert farm to fork: Value chain development for innovative Salicornia-based food products in the United Arab Emirates. In: **Future of sustainable agriculture in saline environments**. CRC Press, p. 181-200, 2021.

MANTOVANI, Gisele Cristina; VALENTE, Amir Mattar; BASTOS, Rogério Cid. Exploratory analysis of soybean production and exports and fertilizer imports by Brazil: Análise exploratória da produção e exportação de soja e importação de fertilizantes pelo Brasil. **Concilium**, v. 23, n. 2, p. 235-248, 2023.

MELO, Janieli de Oliveira *et al.* A Caatinga: Um bioma exclusivamente brasileiro. **Ciência e Cultura**, v. 75, n. 4, p. 01-09, 2023.

MELO, Paulo Roberto Cabral de; CARVALHO, Renato Senna de; PINTO, Dorival de Carvalho. Halita. In: **Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações**. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 551-584.

MILHORANCE, Carolina; SABOURIN, Eric; CHECHI, Andrea Letícia. Adaptação às mudanças climáticas e integração de políticas públicas no semiárido pernambucano. 2019.

MILL, José Geraldo *et al.* Estimativa do consumo de sal pela população brasileira: resultado da Pesquisa Nacional de Saúde 2013. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 22, p. E190009. SUPL. 2, 2019.

MORGANTE, Carmelo *et al.* New generation of commercial nanofiltration membranes for seawater/brine mining: Experimental evaluation and modelling of membrane selectivity for major and trace elements. **Separation and Purification Technology**, v. 340, p. 126758, 2024.

MOURA, Magna Soelma Beserra de; SOBRINHO, José Espínola; SILVA, Thieres George Freire da. **Aspectos meteorológicos do semiárido brasileiro**. 2019.

NATIVIDADE, Ulisses Antônio; GARCIA, Sâmia Regina; TORRES, Roger Rodrigues. Tendência dos índices de extremos climáticos observados e projetados no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 600-614, 2017.

OGUNBIYI, Oluwaseun *et al.* Sustainable brine management from the perspectives of water, energy and mineral recovery: A comprehensive review. **Desalination**, v. 513, p. 115055, 2021.

OLIVEIRA JUNIOR, Sabino de. Potencialidade da produção de óxido de magnésio a partir do efluente salino proveniente da produção de sal marinho no município de Grossos/RN. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 03, p. 894-905, 2017.

OLIVEIRA, Bruno de Moura; MELO FILHO, João Massena; AFONSO, Júlio Carlos. A densidade e a evolução do densímetro. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, p. 1-10, 2013.

OLIVEIRA, Maiara Prates; MALAGOLLI, Guilherme Augusto; CELLA, Daltro. Mercado de fertilizantes: dependência de importações do Brasil. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, n. 1, p. 489-498, 2019.

OLIVEIRA, T. J. A.; DORNER, S. H.; DE ALMEIDA, Rodrigo Estevam Munhoz. A dependência do agronegócio brasileiro em relação aos fertilizantes importados. 2023.

OPAS, ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DE SAÚDE. **OPAS lança novas metas para reduzir consumo de sal na população e prevenir doenças cardiovasculares**: As metas estabelecem reduções graduais no teor de sódio em alimentos embalados frequentemente consumidos, o que ajudará a reduzir a ingestão de sal para menos de cinco gramas por pessoa por dia, o recomendado pela OMS. [S. l.], 28 out. 2021. Disponível em:

<https://www.paho.org/pt/noticias/28-10-2021-opas-lanca-novas-metas-para-reduzir-consumo-sal-na-populacao-e-prevenir-doencas>. Acesso em: 18 jun. 2024.

PINHEIRO, Beliza Maria de Souza. **Avaliação dos possíveis impactos da atividade salineira através do monitoramento da qualidade da água e sedimento do estuário Tomás-Galinhos em Galinhos/RN**. 2016. Dissertação de Mestrado. Brasil.

REZENDE, Vanessa Theodoro; GAMEIRO, Augusto Hauber. **Dependência por fertilizantes minerais importados pelo Brasil: até onde isso é um problema?**. 2022.

RIBEIRO, Beatriz Henriques. **Salt consumption in children and adolescents-impact on blood pressure and cardiovascular health**. 2021.

SAHU, Parul. A comprehensive review of saline effluent disposal and treatment: conventional practices, emerging technologies, and future potential. **Water Reuse**, v. 11, n. 1, p. 33-65, 2021.

SALDANHA, Denise Santos; DA SILVA COSTA, Diógenes Félix. Classificação dos serviços ecossistêmicos prestados pelas áreas úmidas na zona estuarina do Rio Piancó-Piranhas-Açu (Nordeste, Brasil). **Ateliê Geográfico**, v. 13, n. 3, p. 263-282, 2019.

SÁNCHEZ, A. S.; NOGUEIRA, I. B. R.; KALID, R. A. Uses of the reject brine from inland desalination for fish farming, Spirulina cultivation, and irrigation of forage shrub and crops. **Desalination**, v. 364, p. 96-107, 2015.

SCHOLLES, Rachel C. *et al.* Enabling water reuse by treatment of reverse osmosis concentrate: the promise of constructed wetlands. **ACS Environmental Au**, v. 1, n. 1, p. 7-17, 2021.

SILVA LIMA, Maria José de *et al.* Classificação, quantificação e ocorrência de eventos climáticos extremos nas três mesorregiões do estado de Alagoas (BR). **Ciência e Sustentabilidade**, v. 4, n. 2, p. 151-172, 2018.

SILVA, Carlos Daniel *et al.* Utilização da estrutura dpsir para monitorar e identificar as atividades humanas na planície flúviomarinha do rio apodi-mossoró, semiárido BRASILEIRO. **REVISTA GEOGRÁFICA ACADEMICA**, v. 18, n. 1, p. 53-68, 2024.

SILVA, Francisco Eliézer Lima da; BEZERRA, Josué Alencar. Região e Território: um breve olhar sobre a nova delimitação do Semiárido brasileiro. **Revista Homem, Espaço e Tempo**, v. 14, n. 2, p. 66-82, 2020.

SILVA, Lucas Augusto Pereira da *et al.* Mapeamento da aridez e suas conexões com classes do clima e desertificação climática em cenários futuros-Semiárido Brasileiro. **Sociedade & Natureza**, v. 35, p. e67666, 2023a.

SILVA, Pedro Carlos Gama da *et al.* **Caracterização do Semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos**. 2010.

SILVA, Roberto Marinho Alves da *et al.* Características produtivas e socioambientais da agricultura familiar no Semiárido brasileiro: evidências a partir do Censo Agropecuário de 2017. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 55, p. 314-338, 2020.

SILVA, Sergio Luiz Pedrosa *et al.* A indústria salineira do Rio Grande do Norte: análise de fatores para o desenvolvimento. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, v. 12, n. 2, p. 292-323, 2023b.

SILVA, Tiago da Rocha. **Efluentes das salinas**: possibilidade de exploração econômica da cadeia produtiva do sal. 2021.

SOCIEDADE DE CARDIOLOGIA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Teor de sódio na alimentação**. São Paulo: SOCESP, 2024. Disponível em: <https://socesp.org.br/publico/qualidade-de-vida/nutricao/teor-de-sodio-na-alimentacao/>. Acesso em: 05 out. 2024.

SOLEIMANI-SARDO, Mojtaba; KHANJANI, Mohammad Hossein. Utilization of unconventional water resources (UWRS) for aquaculture development in arid and semi-arid regions3a review. **Annals of Animal Science**, v. 23, n. 1, p. 11-23, 2023.

STATISTA. **World salt production from 1975 to 2022 (in million metric tons)**. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/237162/worldwide-salt-production>. Acessado em: 17 Jun 2024.

SUDENE3Superintendência de Desenvolvimento. **Delimitação do Semiárido 2021**: relatório final. 2021.

The Observatory of Economic Complexity. **Salt in Brazil, 2024**. Disponível em: <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/salt/reporter/bra>. Acesso em: 10 jul. 2024.

VALLÈS, V. *et al.* Sorption strategies for recovering critical raw materials: Extracting trace elements from saltworks brines. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, p. 114070, 2024.

VAN STAPPEN, Gilbert *et al.* Review on integrated production of the brine shrimp *Artemia* in solar salt ponds. **Reviews in Aquaculture**, v. 12, n. 2, p. 1054-1071, 2020.

VITAL, Helenice. Geologia, geodinâmica e a formação dos oceanos. **Ciências do Mar**, p. 188. Recife, 2021.

WORKMAN, Daniel. World's Top Exports. **Top fertilizer importers 2022, 2023**. Disponível em: <https://www.worldstopexports.com/top-fertilizers-imports-by-country/>. Acesso em: 09 ago. 2024.

ZHANG, Huiru *et al.* Sharpening nanofiltration: strategies for enhanced membrane selectivity. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 12, n. 36, p. 39948-39966, 2020.

ZHANG, Shaofei *et al.* Pre-fractionation of potassium ions from brine/bittern by selective electrodialysis: Effect of crucial factors and its preliminary application. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 6, p. 108906, 2022.

ZHANG, Xin *et al.* A review of resource recovery from seawater desalination brine. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 20, p. 333-361, 2021.