UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO FITOTECNIA
MESTRADO EM FITOTECNIA

MICHARLYSON CARLOS DE MORAIS

ATRIBUTOS FÍSICOS-QUIMICOS E SALINIDADE DO SOLO IRRIGADO COM EFLUENTE DE ESGOTO DOMÉSTICO: ESTUDO DE CASO DO PA MAURÍCIO DE OLIVEIRA, ASSÚ-RN.

MOSSORÓ
2025

MICHARLYSON CARLOS DE MORAIS

ATRIBUTOS FÍSICOS-QUIMICOS E SALINIDADE DO SOLO IRRIGADO COM EFLUENTE DE ESGOTO DOMÉSTICO: ESTUDO DE CASO DO PA MAURÍCIO DE OLIVEIRA, ASSÚ-RN

Dissertação apresentada ao Mestrado em FITOTECNIA do Programa de Pós-Graduação em FITOTECNIA da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em FITOTECNIA.

Linha de Pesquisa: CONSERVAÇÃO DO SOLO E ÁGUA

Orientador: NILDO DA SILA DIAS

Coordenadora: MARIA VALDIGLEZIA DE MESQUITA ARRUDA

MOSSORÓ

2025

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), 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 tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

M828a Morais, Micharlyson Carlos de.
Atributos físicos-químicos e salinidade do solo irrigado com efluente de esgoto doméstico: estudo de caso do PA Maurício de Oliveira, Assú-RN. / Micharlyson Carlos de Morais. - 2025.
56 f. : il.

Orientador: Nildo da Silva Dias .
Coorientadora: Maria de Valdiglezia Mesquita Arruda.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, 2025.

1. Convivência com semiárido. 2. Água residuária. 3. Decanto-digestor. 4. Sustentabilidade. I. Dias , Nildo da Silva, orient. II. Arruda, Maria de Valdiglezia Mesquita , co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automáto em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo) autor(a).
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.

MICHARLYSON CARLOS DE MORAIS

ATRIBUTOS FÍSICOS-QUIMICOS E SALINIDADE DO SOLO IRRIGADO COM EFLUENTE DE ESGOTO DOMÉSTICO: ESTUDO DE CASO DO PA MAURÍCIO DE OLIVEIRA, ASSÚ-RN

Dissertação apresentada ao Mestrado em FITOTECNIA do Programa de Pós-Graduação em FITOTECNIA da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em FITOTECNIA.

Linha de Pesquisa: CONSERVAÇÃO DO SOLO E ÁGUA

Defendida em: 21/ 03/ 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br NILDO DA SILVA DIAS
Data: 19/05/2025 10:46:17-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Nildo da Silva Dias, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente
gov.br MARIA VALDIGLEZIA DE MESQUITA ARRUDA
Data: 18/05/2025 00:24:44-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Maria Valdiglezia Mesquita Arruda, Pesquisadora Dra. (CNPq)
Coorientadora

Documento assinado digitalmente
gov.br RAFAEL OLIVEIRA BATISTA
Data: 14/05/2025 13:35:24-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Rafael Oliveira Batista, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
gov.br JOAQUIM EMANUEL FERNANDES GONDIM
Data: 14/05/2025 12:23:20-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Joaquim Emanuel Fernandes Gondim, Prof. Dr. (UVA)
Membro Examinador

Dedico este trabalho a meu pai, Paulo Gutemberg de Morais, e à minha avó materna Rita Carlos Cavalcanti (em memória). Obrigado pelo amor e ensinamentos repassados.

Dedico este trabalho à minha mãe, Dilvanir Carlos de Morais, aos meus irmãos Paulo Henrique de Morais e Michel Platini de Morais (presentes). Obrigado pelo carinho e apoio.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, primeiramente, a Deus, pelo dom da vida, por cuidar tão bem de mim, pela minha saúde, pelas oportunidades ofertadas e pelas que estão por vir.

À minha família, principalmente aos meus pais, Dilvanir Carlos de Morais e Paulo Gutemberg de Morais (em memória), e a Rita Carlos Cavalcante (em memória); aos meus irmãos, Paulo Henrique de Morais e Michel Platini de Morais, que diariamente estão comigo compartilhando das minhas alegrias e angústias e sempre me dando força e incentivando a não desistir dos meus objetivos.

Em especial, agradeço ao meu orientador, doutor Nildo da Silva Dias, e minha coorientadora, doutora Maria Valdiglezia Mesquita Arruda, por terem me dado a oportunidade de realizar este trabalho. E por sempre terem dado incentivo, ajudado a selecionar o melhor tema e materiais adequados, para que pudesse redirecionar a proposta para a realidade local.

Também quero agradecer aos amigos, em especial a Luirla Bento Ramalho, Ericlis Dantas de Oliveira, Francisco Izaac Augusto, Thiago Vinícius Silva e Alves, Marcondes Ferreira Costa Filho, Francisco Éder Rodrigues de Oliveira. Obrigado por todo o apoio. Sem vocês, não teria conseguido chegar até aqui, vocês foram meu combustível nesta jornada.

Agradeço imensamente a todos os meus amigos do Laboratório de Salinidade, a palavra que define esse momento é gratidão. Foi uma experiência compartilhar esses dois anos de curso com vocês. Aprendi muito com cada um; sem o apoio de todos, essa jornada teria sido mais árdua. Os momentos vividos foram únicos e ficarão para sempre em meu coração. Vocês são únicos, eu amo vocês.

Agradeço imensamente a todos os meus amigos do Laboratório de Salinidade da universidade. A palavra que define esse momento é gratidão. Foi uma experiência incrível compartilhar esses dois anos de curso com vocês. Aprendi muito com cada um, e sem o apoio de todos, essa jornada teria sido ainda mais desafiadora. Os momentos vividos foram únicos e ficarão para sempre em meu coração. Vocês são especiais, e eu amo cada um de vocês

Agradeço à minha banca examinadora. Obrigado por toda colocação e por me proporcionarem esse grande momento de conhecimento de vocês. Meu muito obrigado.

Agradecer a toda a comunidade do Assentamento Maurício de Oliveira, onde pude desenvolver a pesquisa. Vocês contribuíram muito para minha vida acadêmica e profissional, obrigado por acreditarem e apoiarem a ciência, meu muito obrigado a todos vocês que de alguma forma me ajudaram a chegar até aqui.

Também quero ressaltar a grande importância da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, por ter me oferecido um ensino diferenciado e com muita qualidade, proporcionando grandes e valorosas experiências. A todos os professores que ajudaram durante a minha vida acadêmica, repassando e articulando seus conhecimentos para que pudesse ter a minha autonomia intelectual. Agradecer ao Programa de Pós-graduação em Fitotecnia – PPGFITO pela oportunidade de cursar o mestrado, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão da bolsa.

O que prevemos raramente ocorre; o que menos esperamos geralmente acontece.

Benjamin Disraeli

RESUMO

A indisponibilidade hídrica é um desafio crescente, especialmente em regiões semiáridas como o sertão nordestino do Brasil, onde a sustentabilidade agrícola enfrenta grandes dificuldades. A reutilização de efluentes, especialmente a água cinza proveniente de pias, chuveiros e lavanderias, é uma alternativa eficaz para otimizar o uso de recursos hídricos, oferecendo uma solução viável em áreas com limitações hídricas. Neste contexto, objetivou-se com o presente estudo avaliar a eficiência dos sistemas de aproveitamento de água cinza em relação à qualidade da água, do solo e ao uso da terra na região do Vale do Assú. Para isso, foram realizadas três campanhas de coleta, ao longo de um ano, com intervalos de três meses, abrangendo amostras de solo, água da fonte, efluente bruto e efluente tratado. As propriedades do solo foram avaliadas em duas profundidades (0,0-0,20 cm e 0,20-0,40 m) em áreas de cultivo pertencentes a três grupos familiares, considerando seus atributos físico-químicos e hídricos. Os resultados médios foram analisados utilizando a técnica estatística multivariada, com matriz de correlação de Pearson ($p \leq 0,05$), e submetidos às análises de componentes principais (PCA) e análise fatorial (AF). Os resultados indicaram que 78% das amostras de água das fontes apresentavam baixo risco de salinização, sendo adequados para fins de irrigação. Após o tratamento, 67% das amostras ainda apresentavam risco médio de salinização, exigindo manejo adequado para evitar o acúmulo de sais no solo. O solo irrigado com água tratada teve aumento da condutividade elétrica, mas sem comprometimento significativo da estrutura, desde que houvesse manejo adequado, como a lixiviação de sais. Conclui-se que os sistemas de aproveitamento de água cinza são altamente viáveis no semiárido, reduzindo a pressão sobre fontes hídricas convencionais e promovendo a sustentabilidade da agricultura familiar. O uso das águas cinzas contribui para a segurança hídrica e a sustentabilidade agrícola, desde que seja acompanhado de manejo adequado. Recomenda-se a ampliação dos estudos para avaliar os efeitos em longo prazo e o impacto sobre diferentes culturas.

Palavras-chave: Convivência com semiárido. Água residuária. Decanto-digestor. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Water unavailability is a growing challenge, especially in semi-arid regions such as the northeastern hinterlands of Brazil, where agricultural sustainability faces significant difficulties. The reuse of effluents, particularly greywater from sinks, showers and laundries, is an effective alternative to optimizing water resource use, offering a viable solution in areas with water limitations. In this context, this study aimed to evaluate the efficiency of greywater reuse systems concerning water quality, soil conditions, and land use in the Assú Valley region. To achieve this, three sampling campaigns were conducted over a year at three-month intervals, covering soil samples, source water (F), raw effluent (EB), and treated effluent. Soil properties were assessed at two depths (0.0–0.20 m and 0.20–0.40 m) in cultivated areas belonging to three family groups, considering their physical, chemical, and hydric attributes. The average results were analyzed using multivariate statistical techniques, including Pearson correlation ($p \leq 0.05$), and subjected to principal component analysis (PCA) and factor analysis (FA). The results indicated that 78% of the source water samples presented a low risk of salinization, making them suitable for integrity. After treatment, 67% of the samples still exhibited a moderate risk of salinization, requiring proper management to prevent salt accumulation in the soil. Soil irrigated with treated water showed increasing electrical conductivity, but without significant structural compromise, provided that appropriate management practices, such as salt leaching, were implemented. It is concluded that greywater reuse systems are highly viable in semi-arid regions, reducing pressure on conventional water sources and promoting the sustainability of family farming. The use of greywater contributes to water security and agricultural sustainability, provided that proper management is applied. Further studies are recommended to assess long-term effects and the impact on different crops.

Keywords: Living with semi-arid conditions. Wastewater. Settling-digester. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização do Assentamento Mauricio de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte, Brasil.....23

Figura 2 – Sistema de reuso de efluente doméstico.....24

Figura 3 – Locais dos pontos de coleta. Água de abastecimento do assentamento (A), água residuária doméstica sem tratamento (B) e água residuária doméstica tratada (C)..... 25

Figura 4 – Coleta de amostras de solo deformadas das 3 campanhas, A1 – Área cultivada com mangueiras (A), A2 – Área cultivada com laranjeiras (B) e A3- Área cultivada com forrageira (C).....28

Figura 5 – Diagrama de classificação de águas para irrigação da USSL: Classificação das águas de abastecimento do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas.....31

Figura 6 – Diagrama de classificação de águas para irrigação da USSL: Classificação das águas residuárias domésticas sem tratamento do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas.....33

Figura 7 – Diagrama de classificação de águas para irrigação da USSL: Classificação das águas residuárias domésticas tratadas do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas.....34

Figura 8 – Componentes principais dos atributos químicos da água do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas.....39

Figura 9 – Distribuição das variáveis, no círculo de correlações (A) e distribuição da nuvem de pontos representando a relação entre os fatores 1 e 2 (B).....45

Figura 10 – Curvas de retenção de água de Latossolos irrigados com águas cinza (A) A1, (B) A2 e (C) A3.....46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Histórico da área do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte, Brasil…..…….....…..... 22

Tabela 2 – Riscos de problemas de infiltração no solo causados pela sodicidade da água.....26

Tabela 3 – Concentrações de íons em água e respectivos riscos de toxicidade às plantas.....27

Tabela 4 – Matriz de correlação dos atributos químicos da água do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas.....…….....34

Tabela 5 – Análise química das amostras da água de abastecimento do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas.....36

Tabela 6 – Análise química das amostras de águas residuárias domésticas sem tratamento do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas.....36

Tabela 7 – Análise química das amostras das águas residuárias domésticas tratadas do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas.....37

Tabela 8 – Análise fatorial dos atributos físico-químicos da água do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas.....38

Tabela 9 – Matriz de Correlação dos atributos físico-hídricos, estruturais, químicos.....40

Tabela 10 – Atributos físicos-estruturais no Assentamento Maurício de Oliveira Assú, Rio Grande do Norte, Brasil.....41

Tabela 11 – Atributos químicos no Assentamento Mauricio de Oliveira Assú, Rio Grande do Norte, Brasil.....42

Tabela 12 – Análise fatorial dos atributos físico-hídricos, estruturais e químicos.....43

Tabela 13 – Parâmetros da equação de Van Genuchten ajustados com análise da curva de retenção de água em Latossolo com águas cinzas.....47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
2 REFERENCIAL TEÓRICO 17
2.1 O SEMINÁRIO BRASILEIRO 17
2.2 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZAS: IMPACTOS E BENEFÍCIOS 18
2.3 CENÁRIO GLOBAL DA ÁGUA CINZA 20
3 MATERIAL E MÉTODOS 22
3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 22
3.2 CARACTERIZAÇÕES DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DAS ÁGUAS CINZAS NA UNIDADE FAMILIAR 23
3.3 COLETA DE SOLO E ÁGUA 25
3.4 ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA 25
3.5 ANÁLISES DE SOLOS 27
3.5.1 Análises físicas do solo 28
3.5.2 Análise química de solo 28
3.5.3 Curva de retenção de água no solo 29
3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA 30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 31
4.1 QUALIDADE DA ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO 31
4.2 MATRIZ DE CORRELAÇÃO, ANÁLISE FATORIAL E COMPONENTES PRINCIPAIS DA ÁGUA 34
4.3 MATRIZ DE CORRELAÇÃO, ANÁLISE FATORIAL E COMPONENTES PRINCIPAIS DO SOLO 39
4.4 RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO 45
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 48
REFERÊNCIAS 49

1 INTRODUÇÃO

A água é essencial à agricultura, especialmente em regiões semiáridas, onde a escassez compromete a produtividade e limita as atividades econômicas. A agricultura familiar enfrenta desafios como solos pobres e chuvas irregulares, exigindo soluções sustentáveis (Ramos *et al*., 2019). O reúso de água cinza surge como alternativa eficiente, garantindo a irrigação e promovendo a sustentabilidade. Além disso, a água é fundamental ao desenvolvimento socioeconômico, tornando seu uso racional essencial para o progresso dessas comunidades. A água cinza é a parte do esgoto doméstico que exclui resíduos de bacias sanitárias e mictórios, representando entre 60% e 80% do volume total. Ela pode ser classificada conforme sua origem. No Brasil, a "água cinza clara" é aquela sem resíduos da cozinha. Em alguns países, essa classificação se aplica apenas à água sem resíduos da cozinha e da lavanderia (Paulo *et al*., 2022).

De acordo com Dingemans *et al*. (2020), o aproveitamento de águas residuárias tem sido cada vez mais reconhecido como alternativa para suprir a demanda por água doce. Isso representa uma mudança de paradigma: ao invés de apenas tratar e descartar essas águas com segurança, busca-se transformá-las em uma fonte reaproveitável e adequada para novos usos e tecnologias. Em regiões semiáridas, onde a precipitação pluvial ocorre de forma concentrada e em um curto período, a água armazenada é utilizada na agricultura para irrigação. Globalmente, a agricultura responde por cerca de 69% da água captada, ao passo que a indústria consome 23% e o uso doméstico corresponde a 8%. Considerando a importância da água para a vida no planeta e para a produção de bens e serviços pela humanidade, é fundamental utilizá-la de maneira racional e eficiente, devido à sua essencialidade e caráter finito (FAOAGUASTAT, 2021).

Em nível internacional, podemos observar algumas dessas práticas e tecnologias: a título de exemplo, em alguns estados dos Estados Unidos da América a instalação de tubulações para águas cinzas, utilizadas na irrigação de áreas verdes, tornou-se obrigatória. No Arizona, por exemplo, novas construções residenciais devem contar com redes coletoras de águas cinzas. Na Califórnia, essa exigência aplica-se apenas a complexos multifamiliares e empresas, que precisam instalar sistemas para utilizar águas cinzas na irrigação (Muñoz, 2016). A meta 2.4, relacionada à agricultura sustentável, e o objetivo 6, sobre água potável e saneamento, são cruciais para alcançar a segurança alimentar e a preservação dos recursos naturais (ONU, 2021). O reúso na produção agrícola pode contribuir significativamente para esses objetivos,

reduzindo a pressão sobre os recursos hídricos e promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis. Essa reflexão destaca a importância de abordar essas questões de forma integrada, reconhecendo a interconexão entre diferentes áreas de desenvolvimento.

Em Machado *et al*. (2017), ao discutirem medidas para amenizar os efeitos da seca no semiárido brasileiro, o reaproveitamento de águas servidas é frequentemente mencionado como uma alternativa viável. O uso da água cinza, proveniente de pias, chuveiros e máquinas de lavar, mostra-se como uma solução eficaz para a irrigação de plantas adaptadas ao clima árido, contribuindo para a conservação dos recursos hídricos e promovendo maior sustentabilidade na região. O projeto Serviço de Apoio aos Projetos Alternativos Comunitários (SEAPAC) é uma organização da sociedade civil que atua na promoção de políticas sociais visando à melhoria da qualidade de vida de comunidades em situação de vulnerabilidade, especialmente em áreas rurais e semiáridas. Seu trabalho abrange o acesso à água, segurança alimentar e fortalecimento da agricultura familiar, contribuindo para o desenvolvimento sustentável dessas regiões.

Até o ano de 2025, a reciclagem e a reutilização de água são de fato estratégias importantes para mitigar os problemas causados pela escassez hídrica. Elas ajudam a maximizar o uso eficiente dos recursos hídricos, reduzindo a pressão sobre fontes de água doce (Juan *et al*., 2016). Além disso, é crucial investir em tecnologias de tratamento de água avançadas e promover práticas de conservação da água em todas as esferas da sociedade, desde o nível doméstico até o industrial. Portanto, a educação e conscientização sobre a importância da conservação da água desempenham papel fundamental.

A agricultura é uma das atividades mais impactadas pela escassez de água, uma vez que depende diretamente desse recurso para irrigação e demais práticas. Quando a água é escassa, os agricultores enfrentam dificuldades em manter a produção e podem sofrer perdas significativas de colheitas. Algumas alternativas para a manutenção da produção residem na semeadura de nuvens, dessalinização ou reutilização de águas (Ricart; Rico, 2019). O uso de efluentes tratado na irrigação pode apresentar-se como solução eficaz para enfrentar a escassez hídrica, especialmente em regiões semiáridas. Essas práticas têm o potencial não apenas de fornecer água para a agricultura, como também de ajudar a melhorar a fertilidade do solo (Choudri, 2020).

Estudos como os de Maimon *et al*. (2014) e Shaikh *et al*. (2019) destacam os benefícios e as práticas eficazes associadas à reutilização da água cinza para fins agrícolas. A água cinza, proveniente de banhos, pias e máquinas de lavar roupa, pode ser tratada e utilizada de forma segura para irrigação, reduzindo, assim, a demanda sobre as fontes de água potável.

No entanto, o uso contínuo dessas águas pode levar à salinização e à sodificação, impactando a estrutura do solo e sua fertilidade, o que pode comprometer a produtividade agrícola e a qualidade da água subterrânea (Abdel-Shafy *et al*., 2003; Akponikpe *et al*., 2011; Katz *et al*., 2009). Portanto, é essencial avaliar os impactos em longo prazo e desenvolver estratégias para minimizar efeitos negativos, garantindo a sustentabilidade do sistema agrícola na região.

Nesse sentido, estudos sobre a qualidade da água de irrigação, especialmente a água de reúso, e suas relações com os atributos do solo desempenham papel crucial na sustentabilidade dos sistemas agrícolas, influenciando diretamente os atributos físicos, químicos, estruturais e hídricos do solo. No Nordeste, onde a disponibilidade hídrica é limitada e a supervisão é essencial à produção agrícola, o uso de águas de reúso pode ser uma alternativa viável, mas requer um controle específico de sua composição. Portanto, o monitoramento da qualidade da água de segurança é fundamental para garantir a produtividade agrícola e a conservação dos recursos naturais na região.

Diante disso, objetivou-se com o presente trabalho analisar a qualidade da água de reúso e suas relações com os atributos físicos, químicos, estruturais e hídricos do solo, para fins de irrigação no semiárido potiguar.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O SEMINÁRIO BRASILEIRO

O semiárido brasileiro ocupa cerca de 12% do território nacional (1,03 milhão de km²) e abrange 1.262 municípios, compostos pelos Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, além do norte de Minas Gerais e oeste do Espírito Santo (SUDENE, 2019). O regime pluviométrico da região caracteriza-se como irregular, tanto no tempo quanto no espaço. Tal condição afeta a distribuição da vegetação da região, assim como contribui para solos rasos, com baixa capacidade de retenção hídrica e elevada taxa de evaporação, devido à intensa exposição solar e aos ventos (Silva *et al*., 2021; Moura *et al*., 2019).

A escassez de água é uma das principais preocupações enfrentadas pelo mundo (EMBRAPA, 2019). No período de 2001 a 2010, o Nordeste brasileiro foi assolado por cinco períodos de seca, os quais impactaram significativamente essa região (Carvalho, 2012). Os consecutivos períodos de estiagem nos anos seguintes, de 2012 a 2016, contabilizaram mais quatro anos de secas, configurando uma das maiores secas dos últimos trinta anos (Martins; Magalhães, 2015). Desse modo, o uso de tecnologias de convivência com o semiárido, que considerem o fenômeno da seca, os recursos naturais disponíveis e os povos que habitam nesse espaço geopolítico plural e diverso, torna-se de extrema importância.

As estratégias de convivência com o semiárido incluem tecnologias de captação e armazenamento de água, como cisternas e barragens subterrâneas, que permitem coletar e armazenar a água da chuva para diferentes usos, como consumo doméstico e agricultura (Kahinda *et al*., 2009; Terêncio *et al*., 2017). Além disso, é essencial estabelecer fontes alternativas de água para enfrentar os desafios da disponibilidade hídrica na agricultura, destacando-se a importância do reúso de águas no semiárido brasileiro como solução sustentável para garantir a segurança hídrica e produtiva na região (Chen *et al*., 2021).

O desenvolvimento dessas tecnologias e pesquisas adaptadas às condições geoambientais do semiárido é necessário para se atingir uma agricultura com base no uso racional da água e no aproveitamento de fontes alternativas dos recursos hídricos, comprovando que as condições físicas e climáticas da região podem dificultar a vida, mas não podem ser responsabilizadas pelo quadro de pobreza extrema. As tecnologias aplicadas ao reúso de águas residuárias domésticas são muito importantes para áreas que não têm disponibilidade hídrica, como é o caso de parte do nordeste brasileiro (Silva *et al*., 2020).

Mesmo com dados favoráveis quanto ao montante total das reservas brasileiras, que apresentam 12% do total mundial, a agricultura deve continuar a investir em tecnologias e formas de manejo deste recurso para evitar um colapso do setor (Silva *et al*., 2016). Nesse sentido, têm sido relevantes a construção, apropriação e disseminação de diferentes tecnologias sociais no campo, as quais resultam das vivências e experiências de agricultores e de suas organizações e movimentos, apoiados por ONGs e órgãos governamentais.

De forma geral, a importância das políticas públicas no semiárido vem mostrando relevância, porém estão muito longe do ponto desejável ou necessário para promover transformações significativas ao alcance social da população (Azevêdo, 2015), em decorrência de debates entre políticos e intelectuais e da reflexão sobre os resultados das próprias políticas praticadas obtendo resultados positivos em relação à seca do nordeste brasileiro visando a melhorar a perspectiva de convivência desenvolvidas e implementadas na região (Carvalho *et al*., 2012).

Levando-se em consideração esses aspectos, torna-se essencial desenvolver, avaliar os impactos e validar cientificamente as experiências exitosas de convivência com o semiárido para assim construir de forma participativa uma proposta de desenvolvimento sustentável capaz de potencializar e utilizar sustentavelmente os recursos água e solo como garantia da segurança alimentar e ambiental.

2.2 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS CINZAS: IMPACTOS E BENEFÍCIOS

Água cinza é caracterizada como qualquer efluente gerado por residências, exceto pelas águas provenientes de vasos sanitários. As águas cinzas são geradas principalmente de chuveiros, pias, máquina de lavar e demais atividades domésticas que trazem consigo menores níveis de poluentes ao efluente gerado (Khan *et al*., 2021). Águas residuárias provenientes do vaso sanitário possuem maiores riscos de contaminação por microrganismos. Assim, para a agricultura essas águas em hipótese alguma podem ser utilizadas para irrigação de qualquer cultura sem o devido tratamento.

O tratamento dos efluentes domésticos tem como finalidade assegurar o seu efeito de maneira adequada e segura, visto que seu maior potencial não está direcionado ao consumo humano, mas às atividades diversas, como: práticas agrícolas e pecuárias, além de outras atividades domésticas (Costa *et al*., 2022). Com o crescimento populacional, aumenta a preocupação no que diz respeito ao planejamento das cidades e utilização dos recursos hídricos com esses aspectos atrelados. Wang *et al*. (2019) apontam a escassez da água para consumo da

sociedade e problemas globais mais críticos. Por sua vez, Silva *et al*. (2019) buscam alternativas de abastecimento e gestão sustentável dos recursos hídricos no longo prazo.

Nesse sentido, as comunidades rurais do semiárido brasileiro, sobremaneira as mais isoladas, necessitam urgentemente de um tratamento de saneamento básico. É necessário implementar um desenvolvimento de tecnologias que proporcionem melhoria das condições de vida dessas populações. Para melhoria nas condições sanitárias, o uso do esgoto tratado para fins agrícolas, sobremaneira para os ambientes semiáridas, desponta como solução viável sob diversos aspectos no universo produtivo de ordem econômica, social e ambiental (Tonetti *et al*., 2018).

A reutilização de águas cinzas, conforme Costa *et al*. (2018), tem atraído bastante atenção do mercado imobiliário, porém ainda esbarra na desconfiança dos moradores que têm receio de usá-la. Por outro lado, para os pequenos agricultores, a tecnologia tem sido um recurso viável para suprir as demandas hídricas durante o período de estiagem.

Segundo Hespanhol (2008), sistemas de reúso adequadamente planejados e administrados trazem melhorias ambientais e de saúde pública, especialmente em áreas rurais de países em desenvolvimento. Alguns dos aspectos altamente positivos do reúso de águas cinzas na agricultura são: a redução de descarga de esgotos em corpos de água, redução de doenças de veiculação hídrica, menor difusão de odores e outros incômodos dessa natureza. Além disso, é possibilitada a disponibilidade de um volume de água que até então seria lançado no meio ambiente sem nenhum tratamento ou fim não programado.

Quanto aos riscos sanitários do uso de esgotos tratados na irrigação, pode-se afirmar que são geralmente muito menores do que se imagina e são perfeitamente controláveis (Andrade Neto, 2004). Principalmente quando se realiza o reúso em irrigação restrita às árvores frutíferas e forragem, isso possibilita a adoção de técnicas de irrigação mais simples. Porém, é preciso cautela do trabalhador em manusear esses efluentes. Para isso, é preciso que os agricultores se qualifiquem para fazerem o uso do efluente de maneira segura.

Segundo os dados do IBGE, o número médio de pessoas por família no Brasil é de 2,8 pessoas por família – excluídas as populações rurais dos estados de Rondônia, Acre, Amazonas, Roraima, Pará e Amapá. Para o Nordeste, este número passa a 3,07 pessoas por família, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). Considerando que a necessidade média de consumo por pessoa em escala mundial é de 110 litros de água por dia, no Brasil esse volume chega a mais de 200 litros por dia (SABESP, 2022). Dito isto, para efeito operacional, foi assumida uma razão de quatro pessoas por família, com uma demanda diária de 150 litros de

água por pessoa e uma produção de esgoto de 70% desse volume. Assim, a vazão Q (em m³/dia) seria de 0,420 m³/dia. Respeitado o Tempo de Detenção de 24h – que é a recomendação da NBR7229/97 para volumes de até 1,5 m³/dia – a disponibilidade seria de 0,420 m³/dia de efluente tratado (ABNT, 7229).

Sendo assim, as técnicas de reutilização de águas cinzas focam no uso de efluentes domésticos, que correspondem a 75 a 80% da produção total e pode ser utilizada para usos menos nobres, como a irrigação (Mendonça, 2022). Com o avanço das tecnologias para os tratamentos dessas águas, as diversas famílias de comunidades do Nordeste brasileiro serão beneficiadas, permitindo a irrigação de cultivos locais ao mesmo tempo em que promove o uso sustentável dos recursos hídricos.

2.3 CENÁRIO GLOBAL DA ÁGUA CINZA

A poluição das águas doces tornou-se uma preocupação mundial, seja pela perda em quantidade ou em qualidade e pelo impacto que gera nas vidas humanas (ANA, 2024). Essa poluição hídrica ocorre quando qualquer junção ou mistura é responsável pela alteração das propriedades da água, normalmente causada pelo lançamento de resíduos industriais, agrícolas e esgotos domésticos sem tratamento, chegando ao ponto de afetar a saúde de pessoas, animais e vegetais.

De acordo com Morais *et al*. (2020), a água é um elemento vital para a manutenção da vida na Terra. Desde os estágios iniciais da evolução, ela tem desempenhado papel fundamental no desenvolvimento e sobrevivência de todas as espécies, ao caracterizar-se como o recurso mais utilizado e consumido pela humanidade, ao desempenhar papel crucial na promoção da saúde, segurança alimentar, processos industriais e na infraestrutura de distribuição.

Conforme o Relatório Anual sobre a Situação dos Recursos Hídricos no Brasil, divulgado pela Agência Nacional de Águas (ANA) publicado em 2021, em 2020 cerca de 62% do consumo de água no país foram destinados às atividades agropecuárias. Além disso, informa ainda que 50% desse volume foi destinado à irrigação, 8% para consumo animal e cerca de 4% para a agroindústria, sendo a maior parte desse último destinada à criação de bovinos, responsável por 87% da demanda (ANA, 2021).

O Leste da China, Índia e partes da Ásia Central são os focos de escassez de água mais graves do mundo, estando entre as localidades que mais causam poluições em todo o mundo (Yang *et al*., 2024). De acordo com as Nações Unidas, a população urbana mundial deverá aumentar de 55% para 68% até 2050, e só na América do Norte 82% da população já vivem no

ambiente urbano (Nações Unidas, 2019). Diante do crescimento populacional, a demanda por água irá aumentar. Diante disso, faz-se importante o uso de tecnologias como o reúso de águas cinzas em todo mundo.

Prevê-se que até 2030 a demanda global por água e alimentos aumentará de 35% a 50%, o que sem dúvida tornará os recursos hídricos mais tensos (Cui *et al*., 2023). Devido aos extremos climáticos, diversos impactos prejudicam os ecossistemas e a sociedade humana, resultando em um aumento de mortes e perdas econômicas, especialmente em regiões do mundo afetadas pela escassez de água. Em meio a essa escassez, é fundamental adotar tecnologias adequadas para evitar que isso afete o ecossistema e a saúde humana, tornando o uso mais eficiente e prevenindo a contaminação e mortes em todo o mundo. Com o crescimento da população, os recursos naturais, especialmente a água, se tornam os mais consumidos, pois é por meio desse recurso que a vida na Terra é mantida. Assim, a água se torna um dos recursos mais importantes para todos os seres vivos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi desenvolvida na Mesorregião do oeste do Estado do Rio Grande do Norte, cuja área corresponde a 1.303,442 km², com uma população de 56.496 pessoas (IBGE, 2024).

De acordo a classificação de Köppen-Geiger, o clima de Assú é BSh, ou seja, caracterizado por pouca pluviosidade, com média anual de 646 mm, e temperatura média anual do ar de 27,7 °C. A pesquisa realizada caracteriza-se como exploratória e qualitativa. A metodologia adotada consistiu em campanhas de coleta de amostras de água: Fonte de alimentação (água captada da Barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves); efluente doméstico bruto (resíduos da caixa de gordura, provenientes de pias, banheiros e lavanderias) e efluente doméstico tratado (água da caixa de gordura após o tratamento) e solo, realizadas periodicamente a cada três meses, iniciando-se em fevereiro de 2024 e se estendendo até outubro do mesmo ano. Para a seleção das áreas de estudo, foram escolhidas unidades familiares cujo sistema de tratamento de águas cinzas estava em pleno funcionamento.

Para isso, foram realizadas visitas exploratórias para o reconhecimento do sistema de tratamento de águas cinzas e conhecimento histórico das áreas (Tabela 1). Com base nesses critérios foi determinado as seguintes áreas: A1 – Latossolo (5°35'57.2"S 37°00'34.1"W), A2 – Latossolo (5°36'02.5"S 37°00'58.1"W) e A3 – Latossolo (5°36'09.1"S 37°01'15.3"W) (Figura 1).

Tabela 1. Histórico da área do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte, Brasil.

ÁREA / COORDENADAS	HISTÓRICO DAS ÁREAS
A1 – LATOSSOLO **5°35'57.2"S 37°00'34.1"W**	Área com cultivo de manga, e solo sem aplicações de defensivos químicos e dos adubos minerais.
A2 – LATOSSOLO **5°36'02.5"S 37°00'58.1"W**	Uso da terra, com cerca de 15 anos de cultivo. O manejo do solo é realizado de maneira natural, sem o uso de intensivos agrícolas, priorizando práticas sustentáveis que mantêm a saúde e integridade do ambiente agrícola.

A3 – LATOSSOLO **5°36'09.1"S 37°01'15.3"W**	A área, com aproximadamente 20 anos de cultivo, é gerida por agricultores que utilizam adubação orgânica, com a inclusão de capim como parte do manejo. O solo recebe insumos naturais, como compostos orgânicos. A abordagem sustentável visa garantir a saúde do solo e o equilíbrio ambiental a longo prazo.

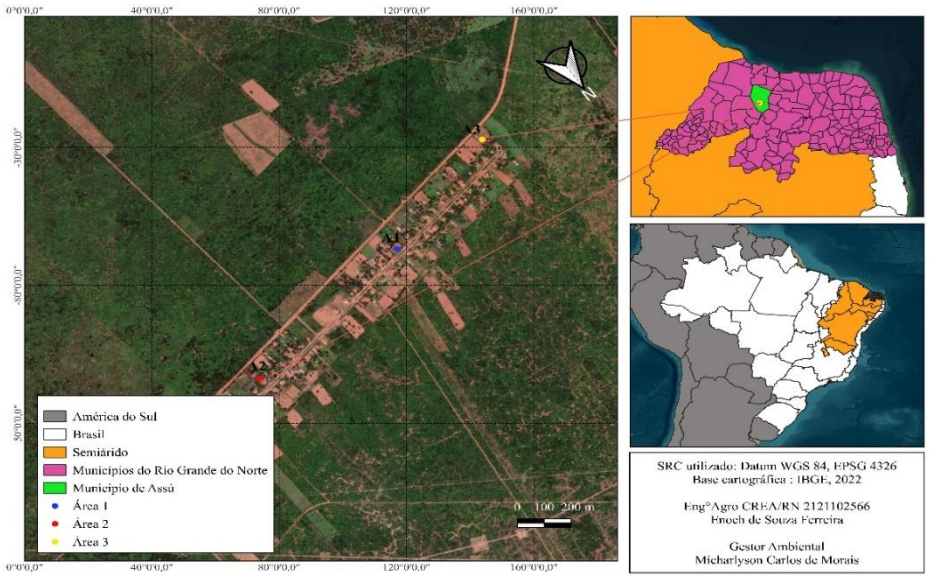


Figura 1. Localização do Assentamento Mauricio de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte, Brasil. **Fonte:** Acervo de pesquisa (2025).

3.2 CARACTERIZAÇÕES DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DAS ÁGUAS CINZAS NA UNIDADE FAMILIAR

O Serviço de Apoio aos Projetos Alternativos Comunitários (SEAPAC), vinculado à Igreja Católica, implantou sistemas para fortalecer a agricultura familiar e combater a vulnerabilidade social. Essas iniciativas incluem o reúso de água cinza no meio rural, utilizando uma tecnologia de baixo custo, baseada no tratamento físico e biológico por meio de um biofiltro.

A unidade de tratamento e reúso de água cinza é formada por tubulações que captam a água proveniente de áreas como banheiros, pias de cozinha, lavanderias e máquinas de lavar roupas. O sistema inclui componentes como caixa de gordura, decanto-digestor de câmara única, biofiltro, reservatório e sistema de irrigação. Ressalta-se que o biofiltro é composto por

camadas de seixo, brita, areia lavada, serragem de madeira e húmus com minhocas. As minhocas atuam da matéria orgânica e serragem, contribuindo para o equilíbrio do sistema.

O sistema de reúso de água cinza foi desenvolvido principalmente para localidades de extrema escassez de água, como na região Nordeste brasileiro, onde as chuvas são irregulares, afetando, assim, os agricultores dessa região.

A implementação do sistema de tratamento requer uma equipe especializada para montagem, podendo ser montado com caixas de alvenaria ou de Brasilit.

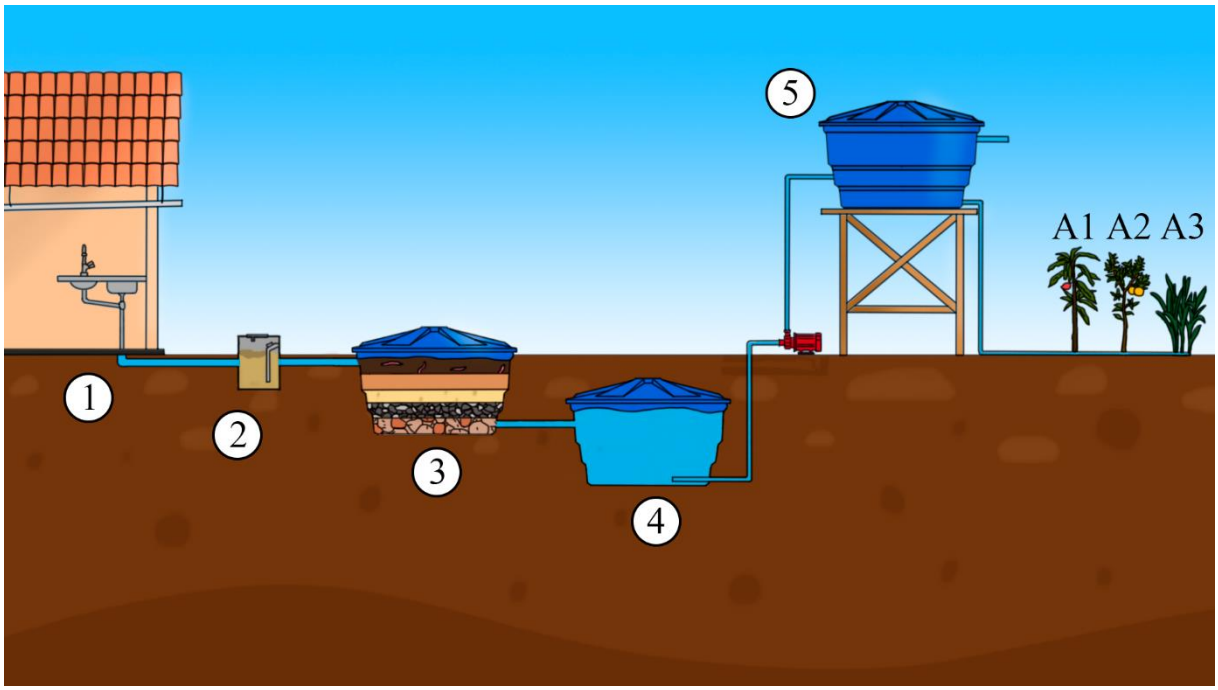


Figura 2. Sistema de reuso de efluente doméstico. **Fonte:** Acervo de pesquisa (2025).

Como podemos observar na figura 2, o sistema de reúso tem início no Ponto 1, onde a água utilizada no processo tem origem na Barragem Armando Ribeiro Gonçalves, sendo esta a principal fonte hídrica da instalação. No Ponto 2, essa água chega à caixa de gordura, responsável por reter resíduos oleosos e sólidos em suspensão. A partir daí, no Ponto 3, o efluente é direcionado para o biofiltro, que é alimentado diretamente pela caixa de gordura. Esse biofiltro realiza uma purificação biológica essencial para a qualidade do efluente tratado. Após esse tratamento, no Ponto 4, a água segue para uma caixa coletora, que armazena temporariamente o efluente já tratado. Finalmente, no Ponto 5, a água é transferida para uma caixa de armazenamento final, de onde é encaminhada para uso em sistemas de irrigação, promovendo o reúso sustentável da água.

3.3 COLETA DE SOLO E ÁGUA

As coletas de solo e água foram realizadas a cada três meses, iniciadas em fevereiro, junho e outubro de 2024. Foram coletadas durante cada campanha seis (6) amostras de solo nas profundidades de 0,0 - 0,20 m e 0,20 - 0,40 m, totalizando dezoito (18) amostras nas três (3) campanhas. As coletas seguiram o método de coleta composta em forma de cruzamento próximo à área irrigada com efluente doméstico tratado.

As amostras de solos indeformadas foram realizadas na campanha de outubro de 2024. Foram coletadas dez amostras indeformadas nas profundidades 0,0 – 0,20 m e 0,20 – 0,40 m, com auxílio do trado tipo Uhland, em anéis com dimensões de 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro, totalizando 60 amostras.

Quanto à água, foram coletadas (3) três amostras por área, compreendendo as seguintes categorias: água de abastecimento do assentamento (AF), água residuária doméstica sem tratamento (AB) e água residuária doméstica tratada (AT). Dessa forma, cada campanha totalizou (9) nove amostras de água, permitindo avaliar a qualidade da água em diferentes estágios do processo.

3.4 ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA

A cada campanha, as amostras de água e efluentes foram coletadas e armazenadas em garrafas plásticas opacas de 500 mL hermética fechadas (Figura 3). Em seguida, foram acondicionadas em caixa térmica com gelo, com o objetivo de minimizar a atividade microbiológica, sendo posteriormente encaminhadas ao Laboratório de Análise de Solo, Água e Plantas do Semi-Árido – LASAPSA da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA).



Figura 3. Locais dos pontos de coleta. Água de abastecimento do assentamento (A), água residuária doméstica sem tratamento (B) e água residuária doméstica tratada (C). Fonte: Autor (2025).

No laboratório, as amostras foram analisadas com a finalidade de avaliar sua viabilidade para irrigação, levando em consideração as seguintes variáveis: Condutividade elétrica (CEa em dS m^{-1}), potencial hidrogeniônico (pH), concentrações de sódio (Na^{+}), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^{+}), cloreto (Cl^{-}), carbonato (CO_3^{2-}) e bicarbonato (HCO_3^{-}), conforme metodologia de Parron *et al.* (2011). Com base na análise dos cátions, a Relação de Adsorção de Sódio (RAS) foi determinada conforme os métodos descritos por Richards (1954), utilizando o *software* Qualigraf (Möbus, 2001). O objetivo foi classificar as águas quanto ao risco de sodificação e problemas de infiltração no solo. Para o cálculo da relação de adsorção de sódio (RAS), utilizou-se a seguinte equação:

$$RAS = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}}}$$

Em que:

RAS - Relação de Adsorção de Sódio;

Na^{+} - Sódio na água, em mmolc L^{-1};

Ca^{2} - Cálcio na água, em mmolc L^{-1};

Mg^{2+}- Magnésio na água, em mmolc L^{-1}.

A classificação dos riscos com problemas de infiltração se deu conforme as diretrizes de Ayers e Westcot (1999), em três classes de sodicidade, obtidas relacionando-se a RAS e CE. Com base nesses valores, as amostras de água foram classificadas de acordo com as classes de restrição de uso para irrigação (Tabela 2).

Tabela 2. Riscos de problemas de infiltração no solo causados pela sodicidade da água.

RAS	Classes de Sodicidade		
	Problemas		
	S1 Sem	S2 Crescentes	S3 Severos
	CEa (dS m^{-1})		

0-3	>0,70	0,70 – 0,20	<0,20
3-6	>1,20	1,20 – 0,30	<0,30
6-12	>1,90	1,90 – 0,50	<0,50
12-20	>2,90	2,90 – 1,30	<1,30
20-40	>5,00	5,00 – 2,90	<2,90

Fonte: Ayers e Westcot (1999).

Para a classificação da água quanto ao risco de toxicidade, foram analisados os íons Sódio (Na^+) como proposto por Ayers e Westcot (1999), considerando dois modos de aplicação e três classes (Tabela 3).

Tabela 3. Concentrações de íons em água e respectivos riscos de toxicidade às plantas.

Íon		Classes de Toxicidade da Água		
		Problema		
		T1 Nenhum	T2 Moderado	T3 Severo
Sódio (mmolc L^{-1})				
Modo de Aplicação	Irrigação por superfície	< 3	3 – 9	>9
	Irrigação por aspersão	< 3	> 3	-

Fonte: Ayers e e Westcot (1999).

3.5 ANÁLISES DE SOLOS

A cada campanha, as amostras de solo foram coletadas e armazenadas em sacos plásticos e levadas para análise no Laboratório de Análise de Solo, Água e Plantas do Semiárido – LASAPSA da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) (Figura 4).



Figura 4. Coleta de amostras de solo deformadas das 3 campanhas, A1 – Área cultivada com mangueiras (A), A2 – Área cultivada com laranjeiras (B) e A3- Área cultivada com forrageira (C). Fonte: Autor (2025).

3.5.1 Análises físicas do solo

Para as análises de solo, foi determinada a granulometria, pelo método da pipeta, conforme descrito por Gee e Or (2002). Para a dispersão das partículas, foi utilizado hexametafosfato de sódio ($NaPO_3$) como dispersante químico. As amostras foram submetidas à agitação mecânica lenta (50 rpm) em agitador Wagner por 16 horas. A separação das frações granulométricas ocorreu da seguinte forma: Fração de areia (2-0,05 mm) obtida por peneiramento em malha de 0,053 mm; fração de argila (<0,002 mm) determinada por sedimentação; cada fração de silte (0,05-0,002 mm) foi calculada pela diferença entre a fração de areia e a fração de argila.

A densidade do solo (Ds) foi determinada pelo método do anel volumétrico, conforme Blake e Hartage (1986), calculada pela relação entre a massa de solo seco em estufa (Ms) e o volume total do anel (Vt), expresso em kg dm^{-3}.

A porosidade total (PT) foi obtida a partir de amostras de solo saturadas. A microporosidade foi determinada aplicando-se uma tensão de 6 kPa na mesa de tensão, ao passo que a macroporosidade foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade (Teixeira *et al.*, 2017).

3.5.2 Análise química de solo

As análises químicas do solo foram realizadas conforme Teixeira *et al*. (2017). O potencial hidrogeniônico (pH) foi determinado em água destilada na proporção 1:2,5, com leitura em peagâmetro. A condutividade elétrica (CE) foi medida, utilizando o método do

extrato saturado, com a leitura em condutivímetro. Os macronutrientes cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) foram extraídos com cloreto de potássio, e a determinação foi feita por titulação com EDTA 0,0125M após adição de coquetel, ácido ascórbico e indicador negro de eriocromo. A análise de sódio (Na^{+}) e potássio (K^{+}) foi realizada utilizando o extrator Mehlich-1 e leitura em fotômetro de chama. O fósforo (P) foi determinado por fotocolorimetria após reação com solução ácida de molibdato de amônio e ácido ascórbico, com leitura a 660 nm. O nitrogênio foi realizado por meio de destilação e titulação do destilado com ácido sulfúrico. O carbono orgânico total (COT) foi determinado por titulação com dicromato de potássio, ácido ortofosfórico e indicador difenilamina, utilizando sulfato ferroso amoniacal (0,05 M).

Após as análises químicas do solo, foram calculados parâmetros importantes para a avaliação da fertilidade e composição do solo. A capacidade de troca de cátions (CTC) foi determinada pela fórmula CTC = SB. ($H^{+} + Al^{3+}$), que reflete a capacidade do solo de reter cátions trocáveis. A soma de bases (SB) foi calculada pela soma dos cátions Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} e Na^{+}, resultando na fórmula SB = $Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Na^{+}$. A saturação por bases (V) foi calculada pela fórmula V = 100. SB / T, indicando a porcentagem de cátions trocáveis ocupados por bases no solo. Por fim, a porcentagem de sódio trocável (PST) foi calculada como PST = 100. Na^{+} / T, fornecendo uma medida da proporção de sódio presente na troca catiônica, o que ajuda a avaliar o risco de salinidade do solo.

3.5.3 Curva de retenção de água no solo

Para a obtenção da curva de retenção de água no solo, foram aplicadas as tensões de 0, 2, 6, 10, 33, 100, 200, 300, 400, 500 e 1000 kPa. As tensões de 2, 6, 10 e 33 kPa foram determinadas na mesa de tensão, ao passo que as de 100, 200, 300, 400, 500 e 1000 kPa foram aplicados na câmara de alta tensão. A capacidade de campo (CC) foi determinada na tensão de 10 kPa, e o ponto de murcha permanente (PMP) na tensão de 1000 kPa. A água disponível (AD) para as plantas foi calculada pela diferença entre CC e PMP (CC – PMP).

Os ajustes das curvas de retenção foram realizados por meio da pesquisa de van Genuchten (1980), utilizando o *software Soil Water Retention Curve* (SWRC) versão 3.0 (Dourado Neto *et al.*, 2001). Na seguinte equação, o potencial mátrico (φm) foi considerado como variável independente, ao passo que a umidade volumétrica (θ) foi uma variável dependente.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\alpha . \left|\phi_m\right|\right)^n\right]^m}$$

Em que:

θr - Umidade volumétrica residual ($m^3\ m^{-3}$);

θs - umidade volumétrica saturada ($m^3\ m^{-3}$);

ϕm - potencial mátrico (kPa);

α, m, n - parâmetros empíricos da equação.

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados médios das variáveis água e solo irrigado com efluente doméstico tratado foram analisados por meio da análise multivariada. Inicialmente, foi obtida a matriz de correlação de Pearson ($p \leq 0,05$) para identificar correlações significativas. Em seguida, os dados foram submetidos às técnicas de Análise de Componentes Principais (ACP) e Análise Fatorial (AF), utilizando o *software* Statistica 7.0 (Statsoft, 2004).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 QUALIDADE DA ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO

Os resultados mostram, quanto ao risco potencial de salinização do solo irrigado, que 78% das águas de abastecimento das residências foram classificados como C2S1, e 22% como C1S1 (Figura 4). Nota-se que as águas A1F2 e A2F2 apresentam baixo risco de salinização, sendo consideradas de ótima qualidade para uso agrícola. Por outro lado, as águas A1F1, A1F3, A2F1, A2F3, A3F1, A3F2 e A3F3 foram classificadas com risco médio de salinização (C2), indicando que são adequadas para irrigação, especialmente para culturas que toleram níveis moderados de sais. A salinidade média dessas águas as torna aptas para irrigação, desde que ocorra manejo adequado para evitar o acúmulo de sais no solo e garantir que o nível de salinidade não prejudique as culturas. Em relação ao risco de sodicidade, todas as águas foram classificadas como de baixo risco de sodicidade (S1), significando que a quantidade de sódio presente na água não prejudica a estrutura do solo e mantém a sua permeabilidade, favorecendo o desenvolvimento das plantas.

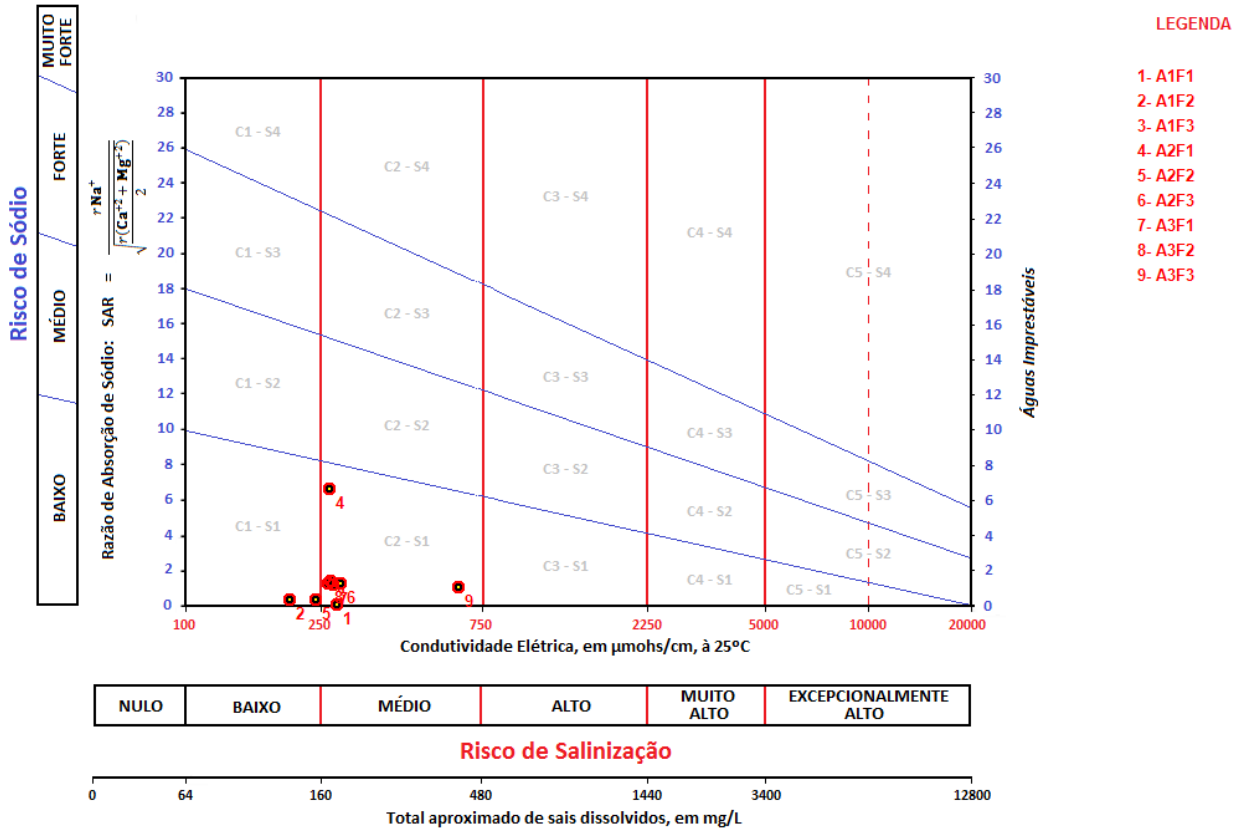


Figura 5 - Diagrama de classificação de águas para irrigação da USSL: Classificação das águas de abastecimento do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas. **Fonte:** Autor (2025).

De acordo com o diagrama de classificação de águas para irrigação da USSL (Figura 5), os resultados sugerem que 67% das águas residuárias domésticas sem tratamento estão classificados como de médio risco de salinização (C2), ao passo que 33% apresentam alto risco de salinização (C3). Quanto à sodicidade das águas residuárias domésticas sem tratamento, 67% estão classificadas com baixo risco de sodicidade (S1) e 33% com alto risco de sodicidade (S4). Em relação às classificações detalhadas, 55,6% das amostras foram classificadas como C2S1, o que as torna adequadas para irrigação, especialmente em solos bem drenados. Por outro lado, 11,1% das amostras foram classificadas como C2S4, com salinidade moderada e alto risco de sodificação, o que exige manejo adequado do solo para evitar problemas de compactação e redução da permeabilidade. Além disso, 11,1% das amostras foram classificadas como C3S1, apresentando salinidade alta e baixo risco de sodificação, sendo necessárias boas condições de drenagem no solo para evitar o acúmulo de sais, ao passo que 22,2% das águas analisadas foram classificadas como C3S4, incluindo as amostras A2B1 e A3B1. No entanto, a amostra A3B1 não foi representada no gráfico, pois sua RAS foi de 47,85 (Tabela 6), ao passo que a escala do gráfico se limita a 30, o que as desqualifica para irrigação devido à alta salinidade e risco significativo de sodificação. Portanto, o uso do efluente bruto sem tratamento adequado pode afetar a qualidade do solo, sendo necessário tratamento prévio para uso na irrigação.

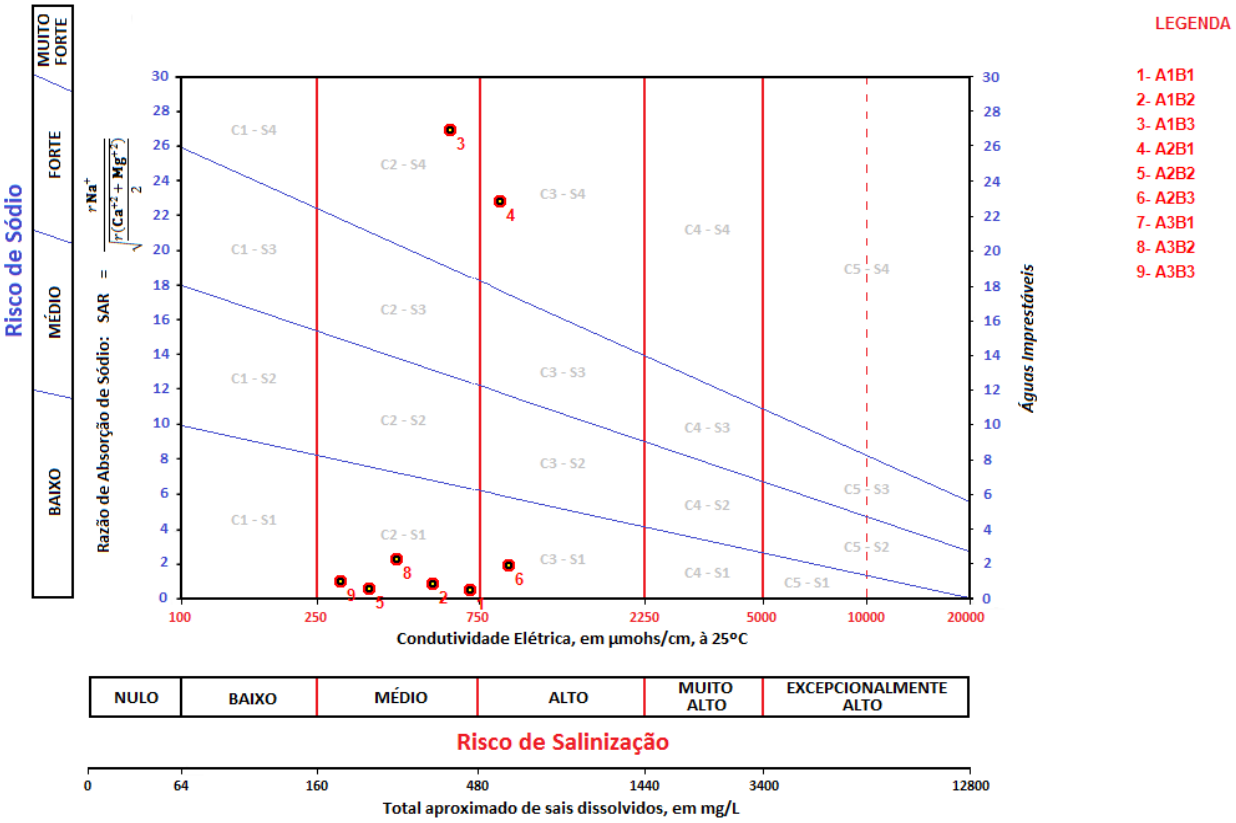


Figura 6 - Diagrama de classificação de águas para irrigação da USSL: Classificação das águas residuárias domésticas sem tratamento do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas. **Fonte:** Autor (2025).

Conforme a Figura 6, os achados mostram que 67% das amostras águas residuárias domésticas tratadas estão classificadas como de médio risco de salinização (C2), e 33% estão classificadas como de alto risco de salinização (C3). Em relação à sodicidade da água, 89% das amostras apresentam baixo risco de sodicidade (S1), ao passo que 11% apresentam médio risco de sodicidade (S2). 66,7% das amostras de águas residuárias tratadas foram classificadas como C2S1, 22,2% como C3S1 e 11,1% como C3S2, o que demonstra que o sistema de tratamento das águas cinzas é eficaz para manter a qualidade dos efluente dentro dos limites permitidos para o uso na irrigação em culturas agrícolas. Observa-se que a amostra A1B3, inicialmente classificada como C2S4, após o tratamento, obteve a classificação C3S2. Apesar do aumento de sais presentes na água, ela continua sendo adequada para o uso de irrigação. Por outro lado, as amostras A2B1 e A3B1, classificadas inicialmente como C3S4, obtiveram a classificação C2S1 após o tratamento, o que as torna sem restrições para fins de irrigação.

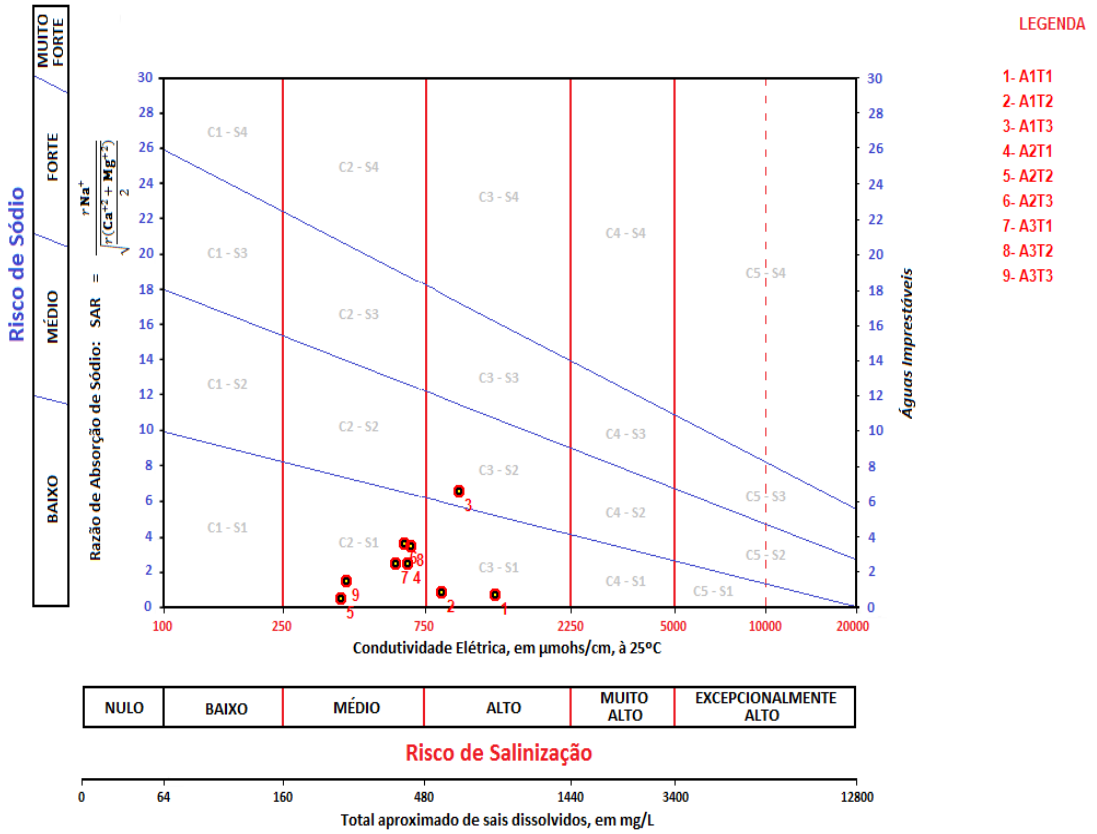


Figura 7 - Diagrama de classificação de águas para irrigação da USSL: Classificação das águas residuárias domésticas tratadas do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas. **Fonte:** Autor (2025).

4.2 MATRIZ DE CORRELAÇÃO, ANÁLISE FATORIAL E COMPONENTES PRINCIPAIS DA ÁGUA

De acordo com a matriz de correlação de Pearson ($p \leq 0,05$), nota-se correlações significativas positivas entre os atributos químicos da água. O potássio (K^+) teve correlação positiva com o sódio (Na^+) e cátions na água. Por outro lado, o sódio (Na^+) apresentou correlação positiva significativa com a Taxa de Adsorção de Sódio (RAS) e com outros cátions presentes na água, assim como a RAS teve correlação positiva significativa com os cátions, mostrando influência direta do sódio na qualidade da água de irrigação (Tabela 4).

Tabela 4. Matriz de correlação dos atributos químicos da água do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas.

	pH	CE	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	CO_3^{2-}	HCO_3^-	RAS	Dureza	Cátions	Ânions
pH	1,00												
CE	-0,01	1,00											
K^+	-0,47	0,09	1,00										

Na^{+}	-0,34	0,26	0,66	1,00									
Ca^{2+}	0,14	-0,18	0,07	-0,40	1,00								
Mg^{2+}	-0,41	-0,21	0,22	0,03	0,20	1,00							
Cl^{l-}	-0,08	0,53	0,22	0,08	0,09	-0,12	1,00						
$CO^{3}{}_{2-}$	0,18	-0,20	0,03	0,06	0,35	-0,32	-0,21	1,00					
$HCO^{3}{}_{-}$	0,01	-0,20	0,06	0,12	0,22	-0,11	-0,36	0,89	1,00				
RAS	-0,20	0,33	0,35	0,88	-0,55	-0,17	0,14	0,03	0,01	1,00			
Dureza	-0,25	-0,24	0,20	-0,17	0,63	0,89	-0,04	-0,11	-0,01	-0,40	1,00		
Cátions	-0,40	0,22	0,78	0,98	-0,28	0,15	0,11	0,05	0,12	0,80	-0,02	1,00	
Ânions	-0,06	0,45	0,26	0,14	0,22	-0,20	0,87	0,26	0,14	0,15	-0,06	0,17	1,00

Fonte: Autor (2025). Nota: pH – Potencial hidrogeniônico; CE – Condutividade elétrica; K^{+} - Potássio; Na^{+} - Sódio; Ca^{2+} - Cálcio; Ma^{2+} - Magnésio; Cl^{-} - Cloreto; $CO^{3}{}_{2-}$ - Carbonato; $HCO^{3}{}_{-}$ - Bicarbonato; RAS - Relação de adsorção de sódio.

A qualidade da água de irrigação é avaliada por meio da RAS, conforme proposto por Richards (1954), que considera o sódio como o principal cátion responsável pela sodicidade do solo. De acordo com Toze (2006), nas águas de reúso o Na^{+}, K^{+} e outros íons catiônicos que estão associados diretamente à salinidade da água são persistentes e difíceis de remover durante o processo de tratamento da água de reúso.

O cálcio (Ca^{2+}) e o magnésio (Mg^{2+}) apresentam correlação positiva com a dureza da água. Os resultados obtidos da dureza variaram de 21 a 230,05 mg L^{-1}, permanecendo dentro dos limites permitidos pela OMS (2011), para a qual o limite máximo permitido da dureza da água para fins de consumo é de 300 mg L^{-1}. Sendo assim, as amostras de águas mostram um resultado positivo para o uso na irrigação em culturas agrícolas (Tabelas 5, 6 e 7). De acordo com Elsayed *et al*. (2020), a dureza da água está mais relacionada ao excesso de alcalinidade do que à soma das concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} na água.

O cloro (Cl^{-}) apresentou forte correlação positiva com os ânions. Os teores de Cl^{-} variaram de 1 a 6,5 mmolc L^{-1}, com valor médio de 3,4 mmolc L^{-1} das águas de abastecimento do assentamento (Tabela 5); por sua vez, as águas residuárias domésticas sem tratamento obtiveram valores entre 1,4 a 6,8 mmolc L^{-1}, com valor médio 4,5 mmolc L^{-1} (Tabela 6) e nas águas residuárias domésticas tratadas (Tabela 7) variando de 1,2 a 10 mmolc L^{-1}, com média 5,1 mmolc L^{-1}, mostrando que os resultados obtidos do Cl^{-} estão dentro dos limites aceitáveis para irrigação (0,0 – 30 mmolc L^{-1}), segundo a FAO (1985). Esse resultado é compatível com o de Javaheri *et al*. (2020), onde o efluente tratado apresenta qualidade para ser utilizada nos usos não potáveis, como irrigação e lavagem de superfícies.

Tabela 5. Análise química das amostras da água de abastecimento do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas.

Área	pH	CE	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	CO_3^{2-}	HCO_3^-	RAS	Dureza	Cátions	Ânions	Classificação de Richards	Sodicidade	Toxicidade
	(água)	dS m^{-1}	$mmol_c\ L^{-1}$								$mg\ L^{-1}$	$mmol_c\ L^{-1}$				
A1F1	8,04	0,28	0,02	0,13	1,08	0,72	3	-	-	0,13	90	1,95	3	C2S1	S2	T1
A2F1	7,25	0,26	1,13	6,04	1,56	0,08	2	1,2	4,5	7,02	74	8,65	7,7	C2S1	S3	T2
A3F1	7,25	0,27	0,20	1,04	0,82	0,69	2,6	-	-	1,20	75,5	2,75	2,6	C2S1	S2	T1
A1F2	6,61	0,20	0,79	0,32	0,68	0,69	2,6	-	-	0,39	68,5	2,48	2,6	C1S1	S2	T1
A2F2	7,6	0,24	0,64	0,33	0,84	0,64	2,4	-	-	0,38	74	2,45	2,4	C1S1	S2	T1
A3F2	6,15	0,26	0,28	1,43	0,75	1,65	5,5	-	0,69	1,30	120	4,11	6,19	C2S1	S2	T1
A1F3	5,7	0,27	0,28	1,50	0,82	1,36	6,5	-	0,68	1,44	109	3,96	7,18	C2S1	S2	T1
A2F3	6,01	0,29	0,28	1,46	0,98	1,49	5	-	0,70	1,32	123,5	4,21	5,7	C2S1	S2	T1
A3F3	6,68	0,63	0,26	0,82	0,84	1,09	1	-	0,83	0,84	96,5	3,01	1,83	C2S1	S2	T1

Fonte: Autor (2025). A1 – Área 1, A2 – Área 2, A3 – Área 3, F1 – Água de abastecimento campanha 1, F2 – Água de abastecimento campanha 2, F3 – Água de abastecimento campanha 3, pH - Potencial hidrogeniônico, CE - Condutividade elétrica, K^+ - Potássio, Na^+ Sódio, Ca^{2+} Cálcio, Mg^{2+} - Magnésio, Cl^- - Cloro, CO_3^{2-} - Carbonato, HCO_3^- - Bicarbonato, RAS - Razão de Adsorção de Sódio.

Tabela 6. Análise química das amostras de águas residuárias domésticas sem tratamento do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas.

Área	pH	CE	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	CO_3^{2-}	HCO_3^-	RAS	Dureza	Cátions	Ânions	Classificação de Richards	Sodicidade	Toxicidade
	(água)	dS m^{-1}	$mmol_c\ L^{-1}$								$mg\ L^{-1}$	$mmol_c\ L^{-1}$				
A1B1	7,31	0,70	0,04	0,36	0,58	0,38	6,8	-	-	0,52	48	1,36	6,8	C2S1	S1	T1
A2B1	6,4	0,85	0,09	10,44	0,07	0,35	3,8	-	-	22,79	21	10,95	3,8	C3S4	S3	T3
A3B1	6,4	0,85	0,93	21,93	0,07	0,35	6,8	-	-	47,85	21	23,27	6,8	C3S4	S3	T3
A1B2	4,76	0,54	2,72	0,92	1,23	0,88	6,4	-	-	0,89	105,5	5,75	6,4	C2S1	S1	T1
A2B2	4,99	0,35	1,22	0,68	1,25	1,07	3,6	-	-	0,63	116	4,21	3,6	C2S1	S1	T1
A3B2	5,62	0,43	0,49	2,47	0,70	1,69	3,0	-	-	2,26	119,5	5,35	3,74	C2S1	S1	T1
A1B3	4,82	0,61	6,94	31,82	0,77	1,92	4,5	-	0,89	27,43	134,5	41,45	5,39	C2S4	S3	T3
A2B3	5,14	0,90	0,51	1,99	0,81	1,31	5	-	0,70	1,93	106	4,62	5,7	C3S1	S2	T1
A3B3	6,49	0,29	0,34	1,08	0,95	1,25	1,4	-	0,80	1,03	110	3,61	2,2	C2S1	S2	T1

Fonte: Autor (2025). A1 – Área 1, A2 – Área 2, A3 – Área 3, B1 – Sem tratamento campanha 1, B2 – Sem tratamento campanha 2, B3 – Sem tratamento campanha 3, pH - Potencial hidrogeniônico, CE - Condutividade elétrica, K^+ - Potássio, Na^+ Sódio, Ca^{2+} Cálcio, Mg^{2+} - Magnésio, Cl^- - Cloro, CO_3^{2-} - Carbonato, HCO_3^- - Bicarbonato, RAS - Razão de Adsorção de Sódio.

Tabela 7. Análise química das amostras das águas residuárias domésticas tratadas do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas.

Área	pH	CE	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	CO_3^{2-}	HCO_3^-	RAS	Dureza	Cátions	Ânions	Classificação de Richards	Sodicidade	Toxicidade
	(água)	dS m^{-1}	mmol$_c$ L^{-1}								mg L^{-1}	mmol$_c$ L^{-1}				
A1T1	7,55	1,26	0,05	0,77	1,66	0,58	8,6	-	-	0,73	112	3,06	8,6	C3S1	S1	T1
A2T1	6,83	0,65	0,55	2,54	0,89	1,21	5	-	-	2,48	105	5,19	5	C2S1	S2	T1
A3T1	7,1	0,59	0,48	2,49	1,29	0,71	6,2	-	-	2,49	100	4,97	6,2	C2S1	S2	T1
A1T2	7	0,83	3,38	0,86	1,03	0,77	10	-	-	0,91	90	6,04	10	C3S1	S1	T1
A2T2	6,6	0,39	0,96	0,77	1,53	3,08	4,2	-	-	0,50	230,5	6,34	4,2	C2S1	S2	T1
A3T2	6,63	0,66	0,51	3,11	0,78	0,83	4	-	-	3,46	80,5	5,23	4,96	C2S1	S2	T2
A1T3	6,3	0,96	0,67	6,06	0,42	1,28	3,5	-	0,93	6,57	85	8,42	4,43	C3S2	S2	T2
A2T3	6,6	0,63	0,67	3,00	0,55	0,82	3,5	-	0,87	3,62	68,5	5,03	4,37	C2S1	S2	T2
A3T3	7,01	0,41	0,44	1,70	0,96	1,56	1,2	-	1,00	1,52	126	4,66	2,2	C2S1	S2	T1

Fonte: Autor (2025). A1 – Área 1, A2 – Área 2, A3 – Área 3, T1 – Tratada campanha 1, T2 – Tratada campanha 2, T3 – Tratada campanha 3, pH - Potencial hidrogeniônico, CE - Condutividade elétrica, K^+ - Potássio, Na^+ Sódio, Ca^{2+} Cálcio, Mg^{2+} - Magnésio, Cl^- - Cloro, CO_3^{2-} - Carbonato, HCO_3^- - Bicarbonato, RAS - Razão de Adsorção de Sódio.

O carbonato (CO_3^{2-}) apresentou correlação positiva significativa com o bicarbonato (HCO_3^-), evidenciando relação direta entre essas variáveis na composição química das amostras de água. A concentração de carbonato nas amostras de águas de abastecimento (A2F1) alcançou 1,2 mmol$_c$ L^{-1}, ao passo que para os bicarbonatos nas amostras de águas A1F3, A3F2, A2F3, A3F3 e A2F1 as médias foram 0,68, 0,69, 0,70, 0,83 e 4,5 mmol$_c$ L^{-1}, respectivamente (Tabela 5). Nas águas residuárias dométicas sem tratamento, as amostras A1B3, A2B3 e A3B3 apresentaram valores de 0,89, 0,70 e 0,80 mmol$_c$ L^{-1}, respectivamente (Tabela 6). Para as amostras de águas residuárias tratadas A1T3, A2T3 e A3T3, os valores registrados de carbonato e bicarbonato foram de 0,93, 0,87 e 1,00 mmolc L^{-1} (Tabela 7), respectivamente. De acordo com Almeida (2010), esses valores são considerados adequados para o uso na irrigação, pois estão dentro dos limites estabelecidos para o equilíbrio de carbonato e bicarbonato nas águas. No entanto, a água A2F1 apresenta valor superior ao recomendado, uma vez que os valores de referência para carbonato na irrigação variam de 0 a 0,1 mmolc L^{-1}. O elevado valor de carbonato presente na água A2F1 pode prejudicar a qualidade do solo, afetando o pH e diminuindo sua permeabilidade, conforme Chaudhary (2019). Portanto, a utilização desse efluente deve ser revista, considerando-se os impactos potenciais no solo e na eficiência da irrigação.

A Tabela 8 apresenta a análise fatorial de 13 variáveis de qualidade da água para fins de irrigação, agrupando-as altamente correlacionadas em quatro (4) fatores.

Tabela 8. Análise fatorial dos atributos físico-químicos da água do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas.

Variáveis	F1	F2	F3	F4
pH	-0,53	0,42	0,16	0,01
CE	0,19	0,28	-0,25	0,64
K^+	0,74	-0,35	0,11	0,23
Na^+	0,97	0,14	0,05	0,06
Ca^{2+}	-0,41	-0,61	0,46	0,25
Mg^{2+}	0,17	-0,85	-0,24	-0,22
Cl^-	0,05	-0,03	-0,22	0,95
$CO^3{}_{2-}$	0,00	0,13	0,97	0,00
$HCO^3{}_-$	0,11	0,02	0,92	-0,16
RAS	0,82	0,42	-0,05	0,09
Dureza	-0,07	-0,97	0,00	-0,05
Cátions	0,97	-0,03	0,06	0,09
Ânions	0,10	-0,01	0,26	0,92
Autovalores	3,86	2,60	2,29	1,15
Variância Total (%)	29,74	20,05	17,64	16,54
Variância Total Acumulada (%)	29,74	49,79	67,43	83,97

Fonte: Autor (2025). Nota: pH – Potencial hidrogeniônico; CE – Condutividade elétrica; K^+ - Potássio; Na^+ - Sódio; Ca^{2+} - Cálcio; Ma^{2+} - Magnésio; Cl^- - Cloreto; $CO^3{}_{2-}$ - Carbonato; $HCO^3{}_-$ - Bicarbonato; RAS - Relação de adsorção de sódio

O fator 1 (F1) contribuiu com maior representatividade na diferenciação das águas, com variância total de 29,74%, reunindo os atributos químicos K^+, Na^+, RAS e cátions. O fator 2 (F2) com 20,05% composto por atributos químicos Mg^{2+} e dureza. O fator 3 (F3) composto por carbonato CO_3^{2-}, com 17,64% de variância total. Os ânions contribuíram com 16,54% de variância no fator 4 (F4).

Oliveira Júnior *et al*. (2021) mostram que as variáveis RAS e Na^+ são atributos essenciais nas perspectivas da qualidade de água para irrigação, sendo utilizadas para classificação da qualidade da água. Alguns cátions não são nutrientes benéficos em água de reúso como o Ca^{2+}, porém são essenciais para reduzir a mobilidade de Na^+ em diversas culturas agrícolas (Läuchli; Grattan, 2012; Ben-Gal, 2011; Zipori *et al*., 2015). Estudos conduzidos por Pedrero *et al*. (2020) e Murillo *et al*. (2000) mostraram que a aplicação de gesso pode ser uma solução eficaz para mitigar os efeitos adversos do sódio no solo. Além disso, essa prática tem mostrado resultados positivos no manejo de águas residuárias com altos níveis de sódio, caracterizadas por elevados e variáveis índices da RAS.

As componentes principais representadas pelo círculo de correlação e nuvens de variáveis com formação de dois eixos explicam 49,79% dos resultados obtidos (Figura 7).

A variável potássio (K^+) discriminou a amostra (A1B3), destacando-se o resultado de 6,94 $mmol_c\ L^{-1}$ (Tabela 6). De acordo com Almeida (2010), o intervalo de K^+ ideal para a água de irrigação é de 0-2 mg L^{-1}, no qual a água A1B3 expressa o valor 27,13 mg L^{-1} classificando como não ideal para irrigação. A RAS, Na^+ e cátions discriminaram a amostra (A2B1 e A3B1) com valores de RAS 22,79 e 47,85 $mmol_c\ L^{-1}$, Na^+ com valores de 10,44 e 21,93 $mmol_c\ L^{-1}$ (Tabela 6). Estudo conduzido por Cardoso e Bodnar (2022) mostrou que os cátions Ca^{2+}, K^+ e Mg^{2+} tiveram pequeno aumento na água de lavanderia quando comparado à água do abastecimento; por sua vez, Na^+ aumentou consideravelmente de 29,0 - 1,4 para 91 - 2 mg L^{-1}.

O Mg^{2+}, Ca^{2+} e a dureza discriminaram a água (A2T2), com valor de dureza 230,05 mg L^{-1} (Tabela 7). A dureza da água é medida pelos íons Ca^{2+} e Mg^{2+}. O aumento da dureza da água de irrigação pode ocasionar o entupimento do sistema de irrigação, impactando a eficiência do trabalho e reduzindo a vida útil (Tamiru *et al*., 2020; Jia *et al*., 2020). Além disso, pode gerar impactos ambientais, como o aumento da dureza da água subterrânea. No entanto, existem poucos estudos dedicados à avaliação dos riscos associados à dureza na irrigação com água recuperada (Zhao *et al*., 2022).

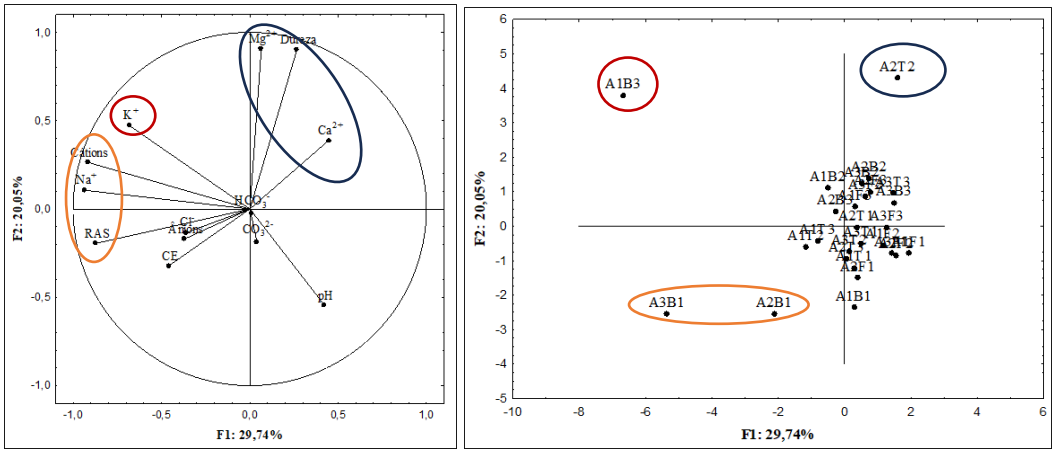


Figura 8. Componentes principais dos atributos químicos da água do Assentamento Maurício de Oliveira, Assú, Rio Grande do Norte em três campanhas. Fonte: Autor (2025).

4.3 MATRIZ DE CORRELAÇÃO, ANÁLISE FATORIAL E COMPONENTES PRINCIPAIS DO SOLO

De acordo com a matriz de correlação de Pearson ($p \leq 0,05$) (Tabela 9), observou-se correlação negativa entre as frações inorgânicas de areia e argila, o que pode ser explicado pelas

naturezas específicas das partículas. Essas partículas apresentam características físicas, químicas e mineralógicas distintas, que influenciam suas interações no solo e, consequentemente, a distribuição e correlação entre suas frações (Dias *et al*., 2023). A fração silte apresentou correlações positivas com macro, PT, Ca^{2+}, CC e umidade volumétrica. Além disso, na Tabela 10 é possível verificar que os valores de silte variam de 0,03 a 0,06 g kg^{-1}, sendo a classe textural caracterizada como textura grossa (Areia franca, Franco arenoso e Franco argiloso arenosa). Por outro lado, a fração argila demonstrou correlação negativa com a microporosidade.

Os resultados indicam relações importantes entre as variáveis químicas, estruturais e hídricas do solo. A correlação positiva da macroporosidade (macro) com a porosidade total (PT), umidade volumétrica, Na^{+} e Ca^{2+}sugere que a presença de poros maiores contribui para a movimentação de água e nutrientes no solo. Da mesma forma, a microporosidade (micro) também apresentou correlação positiva com PT e Ca^{2+}, indicando que tanto o macro quanto o micro desempenham importância na disponibilidade desse cátion. A porosidade total (PT), ao apresentar correlação positiva com a umidade volumétrica, Ca^{2+}, capacidade de campo (CC) e água disponível (AD), reforçando a importância da estrutura do solo na retenção de água e nutrientes.

A umidade volumétrica, por sua vez, apresentou correlação positiva com pH, Ca^{2+}, CC, ponto de murcha permanente (PMP) e AD, o que sugere que a disponibilidade hídrica está diretamente ligada aos atributos químicos e físicos do solo. A relação com o pH pode indicar que a umidade afeta a solubilidade e a disponibilidade de cátions trocáveis, como Ca^{2+}. Sua correlação com CC e PMP destaca a influência da umidade na retenção e uso eficiente da água pelas plantas, ao passo que a relação com AD reforça a importância da estrutura do solo na manutenção da umidade disponível para o desenvolvimento vegetal.

Esses resultados evidenciam a interdependência entre os atributos físicos e químicos do solo, ressaltando a importância da porosidade e da umidade nos atributos químicos e na disponibilidade hídrica para as plantas. Segundo Faisal *et al*. (2024), a irrigação com água cinza não causou efeitos negativos na estrutura do solo. Dessa forma, os autores concluem que a água cinza pode ser uma alternativa eficaz para práticas de irrigação sustentáveis, contribuindo para a preservação da fertilidade e saúde do solo.

Tabela 9. Matriz de Correlação dos atributos físico-hídricos, estruturais, químicos.

	Areia	Silte	Argila	Ds	Macro	Micro	PT	Θ	N	pH	CE	COT	P	K+	Na+	Ca2+	Mg2+	(H+Al)	CTC	V	PST	CC	PMP	AD
Areia	1,00																							
Silte	-0,44	1,00																						
Argila	-0,99	0,30	1,00																					
Ds	-0,31	-0,03	0,34	1,00																				
Macro	-0,31	0,73	0,20	-0,31	1,00																			
Micro	0,57	0,38	-0,67	-0,57	0,47	1,00																		
PT	-0,01	0,70	-0,11	-0,45	0,94	0,74	1,00																	
Θ	-0,01	0,60	-0,09	-0,56	0,65	0,56	0,71	1,00																
N	-0,12	0,47	0,05	0,04	0,27	0,16	0,27	0,35	1,00															
pH	-0,41	0,57	0,34	-0,23	0,55	0,07	0,44	0,60	0,73	1,00														
CE	0,27	-0,02	-0,28	0,18	-0,01	0,22	0,07	-0,19	-0,60	-0,61	1,00													
COT	0,40	-0,22	-0,39	-0,04	-0,16	0,27	-0,02	-0,25	-0,41	-0,48	0,39	1,00												
P	0,32	0,11	-0,36	0,04	0,11	0,41	0,25	-0,07	-0,05	-0,25	0,39	0,17	1,00											
K_{+}	0,38	0,04	-0,41	0,23	-0,23	0,31	-0,06	-0,24	-0,21	-0,49	0,75	0,40	0,48	1,00										
Na_{+}	-0,42	0,57	0,35	0,02	0,69	0,17	0,59	0,24	0,02	0,23	0,29	-0,11	0,18	0,16	1,00									
Ca_{2+}	-0,10	0,86	-0,05	-0,12	0,74	0,62	0,80	0,65	0,53	0,53	0,05	-0,08	0,27	0,04	0,37	1,00								
Mg_{2+}	0,34	-0,26	-0,32	0,13	-0,30	-0,02	-0,23	-0,13	-0,04	-0,11	0,05	0,65	-0,08	0,00	-0,46	0,01	1,00							
(H+Al)	0,20	-0,38	-0,15	0,15	-0,36	-0,05	-0,29	-0,41	-0,47	-0,60	0,52	0,44	0,02	0,46	-0,33	-0,26	0,22	1,00						
CTC	0,19	0,19	-0,24	0,09	0,11	0,37	0,22	0,04	-0,08	-0,21	0,52	0,50	0,19	0,46	-0,11	0,43	0,44	0,72	1,00					
V	-0,16	0,38	0,11	-0,16	0,39	0,10	0,33	0,40	0,47	0,58	-0,51	-0,39	0,01	-0,47	0,32	0,30	-0,18	-0,99	-0,69	1,00				
PST	-0,47	0,40	0,43	-0,03	0,59	0,01	0,45	0,15	0,08	0,27	0,00	-0,21	-0,01	-0,08	0,91	0,13	-0,55	-0,47	-0,42	0,46	1,00			
CC	0,04	0,63	-0,15	-0,37	0,63	0,56	0,69	0,97	0,40	0,55	-0,12	-0,24	0,01	-0,13	0,23	0,71	-0,07	-0,38	0,12	0,37	0,11	1,00		
PMP	-0,52	0,38	0,49	0,07	0,31	-0,29	0,12	0,61	0,30	0,59	-0,36	-0,53	-0,40	-0,47	0,13	0,24	-0,09	-0,41	-0,23	0,35	0,14	0,62	1,00	
AD	0,28	0,59	-0,41	-0,49	0,62	0,82	0,79	0,90	0,35	0,40	0,02	-0,04	0,19	0,06	0,23	0,76	-0,05	-0,27	0,25	0,29	0,06	0,93	0,30	1,00

Fonte: Autor (2025). Nota: Ds – Densidade do solo; Macro – Macroporosidade; Micro – Microporosidade; PT – Porosidade total; θ - Umidade volumétrica; N – nitrogênio; pH – Potencial Hidrogeniônico; CE – Condutividade elétrica; COT – Carbono orgânico total; P – Fósforo; K+ - Potássio; Na+ - Sódio; Ca2+ - Cálcio; Mg2+- Magnésio; (H+Al) – Acidez potencial; CTC – Capacidade de troca catiônica; V – Saturação por base; PST – Porcentagem de sódio trocável; CC -Capacidade de campo; PMP – Ponto de murcha permanente; AD – Água disponível.

Tabela 10. Atributos físicos-estruturais no Assentamento Maurício de Oliveira Assú, Rio Grande do Norte, Brasil.

Áreas	Ds	Macro	Micro	PT	Θ	Areia	Silte	Argila	Classe textural
	g.cm^3	%	cm3/cm3	g/kg-1					
A1a	1,69	23,3	17,2	40,5	0,11	0,86	0,04	0,1	Areia franca
A1b	2,54	20,6	13,8	34,4	0,1	0,76	0,04	0,2	Franco argiloso arenosa
A2a	1,62	20,6	15,4	36	0,12	0,89	0,02	0,09	Areia franca
A2b	1,74	18	13,9	31,9	0,11	0,77	0,03	0,2	Franco argiloso arenosa
A3a	1,56	25,5	17,4	42,9	0,15	0,8	0,06	0,14	Franco arenoso
A3b	1,75	26,4	14,2	40,6	0,12	0,69	0,04	0,27	Franco argiloso arenosa

Fonte: Autor (2025). Nota: Ds – Densidade do solo; Macro – Macroporosidade; Micro- Microporosidade; PT – Porosidade total; θ – umidade volumétrica.

As correlações entre variáveis químicas e hídricas do solo influenciam sua fertilidade e retenção de água. O nitrogênio (N) foi mais disponível em solos com pH elevado e menos em solos com alta condutividade elétrica (CE). O pH teve relação inversa com a CE e a acidez titulável (H+Al), indicando que solos ácidos retêm mais sais e íons livres. A CE se correlacionou com o potássio (K), ao passo que o carbono orgânico total (COT) esteve ligado ao magnésio (Mg^{2+}). O sódio (Na^{+}) influenciou o PST, e o cálcio (Ca^{2+}) melhorou a retenção de água. A acidez (H+Al) aumentou a capacidade de troca catiônica (CTC) e reduziu a saturação por bases (V). Por sua vez, a capacidade de campo (CC) teve correlação positiva com a água disponível (AD) e o ponto de murcha permanente (PMP), mostrando que solos que retêm mais água garantem maior disponibilidade para as plantas.

O conteúdo de carbono orgânico total (COT) aumentou na área C2 e foi reduzido na C3 em ambas as áreas (Tabela 11). O aumento na C2, mesmo sem manejo orgânico em algumas áreas, foi atribuído à deposição de serapilheira, ao passo que a redução na C3 provavelmente se deveu ao escoamento superficial causado pelas chuvas nesse período. Estudo conduzido por Aishah e Elssaidi (2021) destaca pH alcalino (7,6), baixo teor de matéria orgânica (2,0%) e valores reduzidos de CE (0,933 $dS.m^{-1}$) em solo irrigado com águas cinzas. Estudo realizado por Bedbabis *et al.* (2014) evidenciou aumento do conteúdo de matéria orgânica no solo em ambos os tratamentos (água de poço e água residuária tratada). Diferentemente dos estudos de Jueschke *et al*. (2008) e Tarchouna *et al*. (2010), que apontaram diminuição da matéria orgânica em solos de textura arenosa irrigado com água residuária tratada, o que reforça a importância de se analisar diferentes fontes de água e suas implicações para a qualidade do solo.

Tabela 11. Atributos químicos no Assentamento Mauricio de Oliveira Assú, Rio Grande do Norte, Brasil.

Áreas	pH	COT	P	K^+	Na^+	Ca^+	Mg^+	SB	CTC	PST	V
		g kg^{-1}		cmolc dm^{-3}						%	
A1aC1	4,69	15,68	32,5	74,1	26,3	1,7	0,57	2,56	4	2,9	64
A1bC1	5,35	13,38	2,6	67,3	24	1,3	0,8	2,39	3,56	2,9	67
A2aC1	5,54	13,38	0	47	4	0,8	0,8	1,71	3,7	0,5	46
A2bC1	5,37	13,81	0	56	5,1	0,4	0,47	1,02	3,46	0,6	29
A3aC1	6,25	14,44	7	53,8	21,8	2,2	0,57	2,95	2,95	3,2	100
A3bC1	6,67	14,87	0	27,8	42,9	1	0,63	1,93	1,93	9,7	100
A1aC2	5,31	21,24	8	35,7	5,1	1,7	1,05	2,89	4,56	0,5	63
A1bC2	5,63	13,81	0	40,2	7,3	1,4	0,99	2,55	3,73	0,9	69
A2aC2	5,46	16,99	11,3	34,6	4	0,7	0,93	1,73	1,73	1	100
A2bC2	5,28	12,96	0	25,5	5,1	0,6	0,94	1,64	1,64	1,4	100
A3aC2	8,52	13,54	7,4	46	16,5	3	1,09	4,23	4,23	1,7	100
A3bC2	8,22	10,46	1,7	15	19,5	1,7	0,65	2,45	2,45	3,5	100
A1aC3	6,13	14,18	5,3	63	28,5	1,2	0,32	1,85	1,85	6,7	100
A1bC3	6,33	9,23	20,3	48	15,5	1,2	0,5	1,93	1,93	3,5	100
A2aC3	7,01	7,02	2,8	29,4	5	1	0,7	1,76	1,76	1,2	100
A2bC3	6,53	11,08	1,6	38	7,4	0,8	0,6	1,54	1,54	2,1	100
A3aC3	6,77	5,91	7,1	31	22,5	2,1	0,19	2,44	2,44	4	100
A3bC3	6,83	3,08	2	20	22,5	1,7	0,09	1,93	1,93	5,1	100

Fonte: Autor (2025). Nota: A1 – Área 1; A2 – Área 2; A3 – Área 3; a – 0,0 – 0,20 m; b – 0,20 – 0,40 m; C1 – Campanha 1; C2 – Campanha 2; C3 - Campanha 3; pH – Potencial hidrogeniônico; COT – Carbono orgânico total; P – Fósforo; K^+ - Potássio; Na^+ - Sódio; Ca^+ - Cálcio; Mg^+ - Magnésio; SB – Soma de base; CTC – Capacidade de troca de cátions; PST – Porcentagem de sódio trocável e V – Saturação por base.

A análise fatorial permitiu agrupar 24 variáveis em cinco fatores principais. O Fator 1 (F1) contribuiu com 33,99% da variação total, englobando os atributos químicos Silte, Macro, Micro, PT, θ, Ca^{2+}, CC e AD. O Fator 2 (F2) foi responsável por 22,10% da variação, reunindo as variáveis inorgânicas areia e argila, além do atributo físico PMP e do atributo químico P. O Fator 3 (F3), composto por Na^+, Mg^{2+} e PST, explicou 12,63% da variância total. O Fator 4 (F4) incluiu os atributos químicos H+Al, CTC, V e Ce, contribuindo com 9,22% da variância. Por sua vez, o Fator 5 (F5) apresentou a menor variância, 6,08%, sendo representado pelo atributo físico Ds. No total, os cinco fatores (F1, F2, F3, F4 e F5) explicaram 84,04% da variação acumulada, o que ressalta a consistência dos resultados obtidos (Tabela 12).

Os fatores F1 e F2 evidenciam a relação entre atributos estruturais e hídricos do solo, mostrando que a estrutura do solo impacta diretamente a capacidade hídrica, influenciando

tanto a retenção de água quanto a disponibilidade de nutrientes, aspectos cruciais para a fertilidade e saúde das plantas (Lopes *et al*., 2019; Zhang *et al*., 2021).

Estudos conduzidos por Alvarenga *et al*. (2010) e Mao *et al*. (2022), identificaram relação entre a textura do solo e os atributos hídricos. Além disso, o fósforo orgânico exerce papel significativo na ciclagem de nutrientes, na nutrição das plantas e na redução do uso de fertilizantes, de acordo com Musafiri *et al*. (2022). Embora não tenha se correlacionado com a matéria orgânica neste estudo, sua disponibilidade está associada a processos de mineralização e interação com outros componentes do solo.

Esses resultados reforçam a necessidade de práticas de manejo, como o preparo mínimo do solo e a diversificação dos cultivos agrícolas, segundo Yang *et al*. (2024). Dessa forma, compreender as interações entre os atributos do solo é essencial para otimizar a gestão agrícola, garantindo maior eficiência no uso dos recursos e contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas produtivos.

Tabela 12. Análise fatorial dos atributos físico-hídricos, estruturais e químicos.

Variáveis	F1	F2	F3	F4	F5
Areia	-0,01	0,69	-0,48	-0,06	-0,47
Silte	0,79	-0,08	0,34	0,11	0,36
Argila	-0,13	-0,73	0,46	0,05	0,44
Ds	-0,33	-0,01	-0,02	-0,09	0,83
Macro	0,77	-0,10	0,51	0,06	-0,04
Micro	0,69	0,57	-0,03	-0,07	-0,38
PT	0,85	0,15	0,38	0,02	-0,17
Θ	0,85	-0,22	0,03	0,19	-0,35
N	0,46	-0,04	-0,21	0,63	0,38
pH	0,56	-0,41	0,04	0,56	0.13
CE	0,01	0,44	0,23	-0,74	0,06
COT	-0,05	0,39	-0,25	-0,52	-0,08
P	0,14	0,75	0,14	-0,04	0,17
K^+	0,00	0,65	0,05	-0,51	0,23
Na^+	0,33	0,07	0,88	-0,02	0,15
Ca^{2+}	0,92	0,12	0,04	0,06	0,27
Mg_{2+}	0,01	0,07	-0,71	-0,18	0,12
(H+Al)	-0,22	0,03	-0,28	-0,88	0,03
CTC	0,41	0,15	-0,36	-0,76	0,25
V	0,24	0,02	0,27	0,87	-0,04
PST	0,12	-0,04	0,90	0,21	0,04
CC	0,89	-0,14	-0,03	0,17	-0,21
PMP	0,38	-0,72	0,02	0,27	0,09

AD	0,91	0,16	-0,05	0,08	-0,30
Autovalores	8,15	5,30	3,03	2,21	1,46
Variância Total (%)	33,99	22,10	12,63	9,22	6,08
Variância Total Acumulada (%)	33,99	56,09	68,72	77,95	84,04

Fonte: Autor (2025). Nota: Ds – Densidade do solo; Macro – Macroporosidade; Micro – Microporosidade; PT – Porosidade total; θ - Umidade volumétrica; pH – Potencial Hidrogeniônico; COT – Carbono orgânico total; P – Fósforo; K+ - Potássio; Na+ - Sódio; Ca2+ - Cálcio; Mg2+- Magnésio; V – Saturação por base; CTC – Capacidade de troca catiônica; (H+Al) – Acidez potencial; PST – Porcentagem de sódio trocável; CC - Capacidade de campo; PMP – Ponto de murcha permanente; AD – Água disponível.

As componentes principais representadas pelo círculo de correlação e nuvens de variáveis com formação de dois eixos explicam 56,09% dos resultados obtidos (Figuras 8 A, B).

Os atributos químicos pH, V, PST, PMP, N, Na^+ e a fração inorgânica argila discriminaram as áreas A3bC1, A3bC2 e A3bC3. Predominantes nas áreas de capim na camada de 0,20 - 0,40 m, sendo observados nas três campanhas (residência de área agroecológico/Latossolo Vermelho), evidenciando a melhoria da qualidade do solo em relação ao histórico de uso da área de cultivo, essas mesmas variáveis ocorreram na A2aC3, discriminando a área de cultivo (LARANJA) na profundidade de 0,0 - 0,20 m na campanha 3, (residência agroecológico/Latossolo Vermelho). Diante disso, os atributos pH, V, PST, PMP, N, Na^+ e argila foram identificados tanto na área de capim quanto na área de laranja, trazendo a influência desses fatores na qualidade químico e hídrico do solo.

O pH do solo teve alteração na área A3b nas três campanhas 6,67, 8,22 e 6,83, respectivamente (Tabela 11). De acordo com Siggins *et al*. (2016), os solos irrigados com águas cinzas interferem no aumento do pH do solo: pH superior a 7,5 não é adequado para a irrigação, podendo limitar a disponibilidade de nutrientes nas plantas (Pinto *et al*., 2010). Estudo conduzido por Reichman e Wightwick (2013) confirma que a irrigação com águas cinzas pode aumentar o pH do solo ao longo do tempo, sugerindo que tanto águas cinzas convencionais quanto ecológicas elevam o pH do solo de forma significativa.

A variável densidade do solo (Ds) discriminou as áreas A1bC1, A1bC2 e A1bC3, de Manga, (residência de área cultivos agroecológico/Latossolo Vermelho) na profundidade 0,20 - 40 m. Além disso, discriminou as áreas A2bC1, A2bC2 e A2bC3, onde se cultiva Laranja. Em relação às áreas de estudo, a densidade do solo (Ds) variou entre 1,74 e 2,54 g cm^{-3} (Tabela 10), o que sugere Ds elevada. Nesse contexto, o solo irrigado com águas cinzas pode sofrer compactação devido aos compostos químicos presentes, sendo necessário manejo adequado, o

que inclui adição de matéria orgânica e adoção de práticas de cultivo que minimizem a compactação do solo.

Observou-se que as variáveis capacidade de campo (CC), cálcio trocável (Ca^{2+}), Água disponível (AD), macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro) e a fração inorgânica silte discriminaram as áreas A3aC1, A3aC2, A3aC3 e A1aC3. Ca^{2+} variou de 1,2 a 3,0 cmolc dm^{-3} (Tabela 11). Segundo Nyagatare *et al*. (2021), a concentração do solo de Ca^{2+} diminuiu significativamente com o aumento da aplicação de água cinza.

Os componentes como Mg^{2+}, P, CTC, CE, COT, ($H^{+}Al$) e Areia discriminaram as áreas A2aC1, A2aC2, A1aC1, A1aC2 e A1bC1. As áreas de cultivo de Laranja e Manga discriminaram as variáveis nas campanhas C1 e C2, na profundidade de 0,0 - 0,20 m e uma única profundidade de 0,20 - 0,40 m na área (A1bC1). Estudo conduzido por Maimon *et al*. (2023) obteve resultados onde a MO e P foram afetados significativamente pelos tratamentos de irrigação após 14 meses. Gross *et al*. (2005) mostraram que o uso prolongado de água cinza para irrigação pode alterar as propriedades químicas e hidráulicas do solo, com impactos negativos no crescimento das plantas e na qualidade do solo.

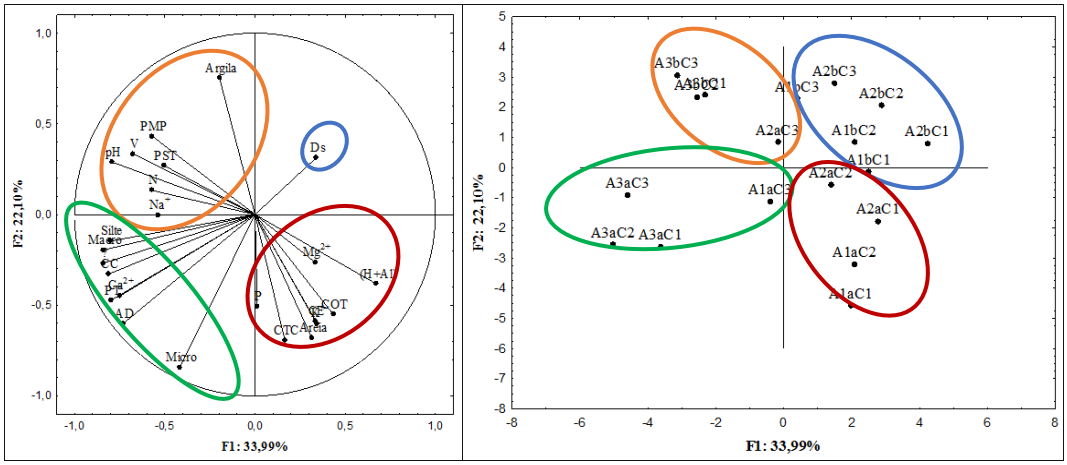


Figura 9. Distribuição das variáveis, no círculo de correlações (A) e distribuição da nuvem de pontos representando a relação entre os fatores 1 e 2 (B). Fonte: Autor (2025).

4.4 RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

O teor de água nos solos foi apresentado pela curva de retenção de água (Figura 9), e os parâmetros foram ajustados de acordo com o modelo matemático proposto por van Genuchten (Tabela 13). A Figura 9 apresenta a curva de retenção de água no solo representada pela relação do conteúdo volumétrico de água θ e o potencial matricial (Ψm) do solo. Na área de cultivo de manga (A1), a camada 0,0 - 0,20 m (curva preta) apresentou distinção da curva

de retenção determinada na camada subsequente (curva cinza), com maior retenção de água até a tensão de 33 kPa (Figura 9A) . Na área de cultivo de laranja (A2), a camada 0,0 - 0,20 m (curva preta) apresentou distinção da curva de retenção determinada na camada subsequente (curva cinza), com maior retenção de água até a tensão de 100 kPa (Figura 9B). Na área de cultivo de capim (A3), a camada 0,0 - 0,20 m (curva preta) apresentou distinção da curva de retenção determinada na camada subsequente (curva cinza), até a tensão de 1000 kPa (Figura 9C).

Podemos observar, na Tabela 10, que os solos analisados possuem textura arenosa. Nessas condições, o aumento do carbono orgânico total (COT) favoreceu maior retenção de água, especialmente nas camadas de 0,0 - 0,20 m. A maior retenção de água observada nas áreas A1a, A2a e A3a **(**Figura 9) está relacionada ao aumento do COT, que contribui para a redução da densidade do solo e o aumento da porosidade total. Esse aumento da porosidade melhora o espaço poroso do solo, refletindo-se positivamente na curva de retenção de água (Minasny; Mcbratney, 2017; Oliveira *et al*., 2021).

.

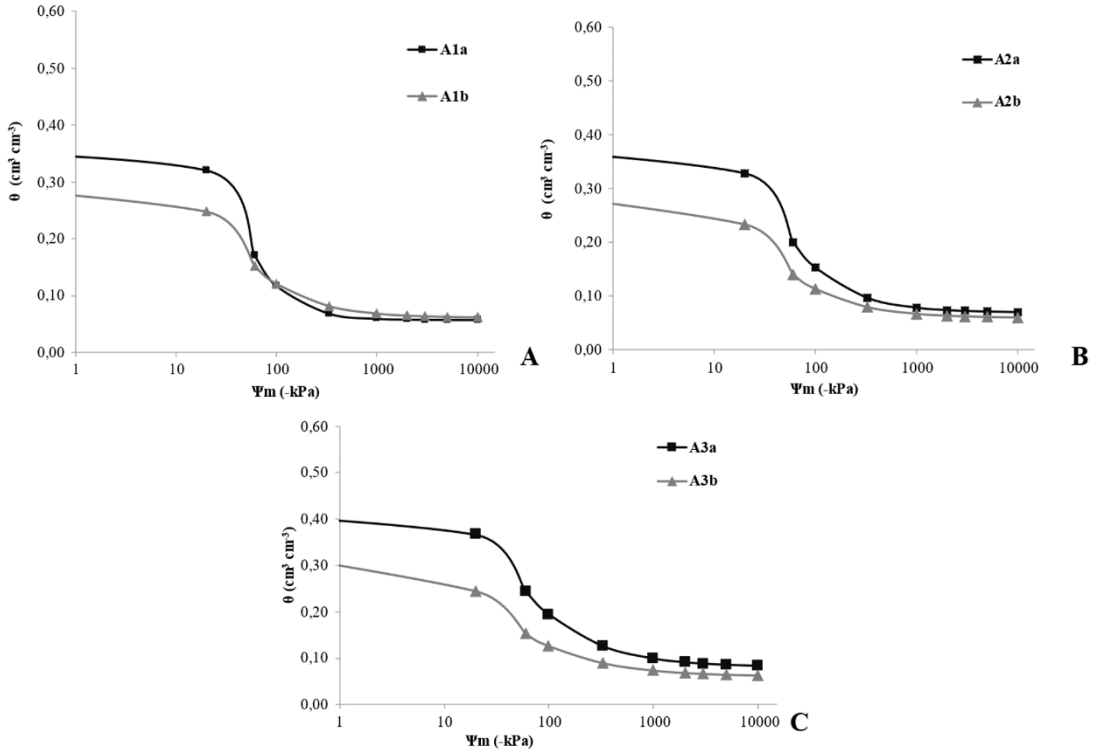


Figura 10. Curvas de retenção de água de Latossolos irrigados com águas cinza (A) A1, (B) A2 e (C) A3. Fonte: Autor (2025).

Tabela 13. Parâmetros da equação de Van Genuchten ajustados com análise da curva de retenção de água em Latossolo com águas cinzas.

TRAT	Θr	Θs	A	n	m	CC	PMP	AD
	cm^3/cm^3		Adimensional			cm^3/cm^3		
A1a	0,06	0,37	0,03	2,42	0,59	0,12	0,06	0,06
A1b	0,06	0,32	0,05	1,90	0,47	0,12	0,06	0,06
A2a	0,07	0,40	0,04	1,97	0,49	0,15	0,07	0,08
A2b	0,06	0,34	0,07	1,84	0,46	0,12	0,06	0,06
A3a	0,08	0,44	0,04	1,80	0,44	0,19	0,08	0,11
A3b	0,08	0,41	0,11	1,69	0,41	0,12	0,06	0,06

Fonte: Autor (2025). Θr - Umidade residual; θs - Umidade de saturação; α, n, m - Parâmetros adimensionais; CC - Capacidade de campo; PMP - Ponto de murcha permanente; AD - Água disponível

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O tratamento dos efluentes domésticos se mostrou eficaz na qualidade da água, tornando-a adequada para a agricultura. Dessa forma, a implantação de estratégias de manejo e tratamento das águas residuárias se apresenta como alternativa viável para ampliar a disponibilidade de recursos hídricos e garantir a sustentabilidade da irrigação agrícola. Além disso, a irrigação com águas cinzas influencia significativamente os atributos físicos, químicos e hídricos do solo, destacando-se a elevação do pH e possíveis efeitos nos atributos estruturais e retenção de água. A análise fatorial revelou a relação entre as variáveis estruturais e químicas, reforçando a importância do manejo adequado para preservar a qualidade do solo. A retenção de água foi favorecida pelo aumento do COT, evidenciando a relevância da matéria orgânica na melhoria da estrutura do solo. Assim, práticas sustentáveis, como a diversificação de cultivos e a adição de matéria orgânica, são essenciais para mitigar impactos negativos e garantir a fertilidade do solo irrigado com águas cinzas, promovendo um sistema agrícola mais resiliente e equilibrado.

REFERÊNCIAS

ABDEL-SHAFY, H.I; ANWER, S.; HASSAN, S.; YAHIA T. Risk assessment of sewage reuse on the sandy soil of Abu-Rawash Desert, Egypt. **Environment Protection Engineering**, v. 26, p. 31-42, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7229. Projeto, construção e operação de tanques sépticos**. 1997.

AISHAH, R. M.; ELSSAIDI, M. A. Effect of greywater irrigation on soil available-phosphorus. **Sirte University Scientific Journal**, Libya, v. 11, n. 2, p. 28-41, dez. 2021.

AKPONIKPE, P. B. I.; WIMA, K.; YACOUBA, H.; MERMOUD A. Reuse of domestic wastewater treated in macrophyte ponds to irrigate tomato and eggplant in semi-arid West-Africa: benefits and risks. **Agricultural water management**, v. 98, n. 5, p. 834-840, 2011.

ALMEIDA, O. A. **Qualidade da água para irrigação**. Cruz das Almas: EMBRAPA Mandioca e Fruticultura, 2010.

ALVARENGA C. C.; DE MELLO, C. R.; ÁVILA, L. F. S.; CÔRREA, M. P.; BORGES, L. A. Determinação da umidade do solo na capacidade de campo e ponto de murcha permanente com base em atributos físicos do solo. In: Congresso de Pós-Graduação da UFLA, 19. Lavras. **Anais eletrônicos** […]. Lavras: UFLA, 2010.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Água Subterrânea 2010.** Disponível em: http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/aguas-no-brasil/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua/agua-subterranea. Acesso em: 14 abr. 2024.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório da Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil** – Informe 2021. Brasília, DF: ANA, 2021. Disponível em: https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/creditos. Acesso em: 14 jan. 2024.

ANDRADE NETO, C. O. Proteção Sanitária das Cisternas Rurais. In: XI SIMPÓSIO LUSO-BARSILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 2004, Natal, Brasil. **Anais...** Natal: ABES/APESB/APRH. 2004.

APHA. **Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater**. 20. Ed. Washington, D.C, America Public Health Association. 2003.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade de água na agricultura**. 2. ed. Campina Grande: UFPB, 1999. (FAO Irrigação e Drenagem, 29).

AZEVÊDO, A. C. Verso e reverso das políticas públicas de água para o semiárido brasileiro. **Revista Política e Planejamento Regional**, v. 2, n. 2, p. 373-392, 2015.

BEDBABIS, S.; ROUINA, B. B.; BOUKHRIS, M.; FERRARA, G. Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate. **Journal of Environmental Management**, v. 133, p. 45-50, jan. 2014.

BEN-GAL A. Salinity and olive: from physiological responses to orchard management Isr. **Israel Journal of Plant Sciences**, v. 59, n.1, p. 15-28, 2011.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: KLUTE, A. (org.). **Methods of soil analysis:** Physical and mineralogical methods. Part 1. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.

CARDOSO, C. C. A.; BODNAR, I. Modelling Treated Laundry Greywater Reuse for Irrigation Using an Affordable Treatment Method and Seed Germination Test. **Sustainability**, v. 14, n. 3, p. 1314, 24 jan. 2022.

CARVALHO, O. **As secas e seus impactos**. Em Brasil, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, A questão da água no Nordeste / Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Agência Nacional de Águas. Brasília: CGEE, 2012.

CHAUDHARY, J. Application of reclaimed water for irrigation: A Review. **Soil and Water Science Department**, p. 1-23, nov. 2019.

CHEN, C. Y.; WANG, S. W.; KIM, H.; PAN, S. Y.; FAN, C.; LIN, Y. J. Non-conventional water reuse in agriculture: A circular water economy. **Water Research**, [s. l], v. 199, p. 117193-117193, 01 jul. 2021.

CHOUDRI, B. S.; CHOUDRI; AL-AWADHI, T.; CHARABI, Y.; AL-NASIRI, N. Wastewater treatment, reuse, and disposal-associated effects on environment and health. **Water Environment Research,** v. 92, n. 10, p. 1595-1602, 2020**.**

CLIMATE-DATA. **Clima:** Assu: Climograma, Temperatura e Tabela climática Assu. Disponível em: https://pt.climate-data.org/location/42628. Acesso em: 23 maio. 2024.

COSTA, L. S.; DE OLIVEIRA, L. R.; CASTRO, R. M.; CASTRO, M. N.; ALMEIDA, L. F. O.; CARVALHO, E. W. V. Avaliação de um equipamento protótipo para tratamento de águas cinzas com fins não potáveis. **Revista Internacional de Ciências**, v. 8, n. 2, 2018.

COSTA, R. L. D.; TORRES, D. M.; GOMES, J. T.; SILVA, J. E. M. Tratamento de água cinza para reúso agrícola no semiárido do Rio Grande do Norte, Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, n. 5, p. 1031-1040, 2022.

COSTA, R. O. **Tratamento de água cinza visando o desenvolvimento sustentável da agricultura familiar**. 2021. 85 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021. Disponível em: http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/18786. Acesso em: 30 abr. 2023.

CUI, S.; ZHANG, J.; WANG, X.; WU, M.; CAO, X. Fuzzy composite risk assessment of water-energy-food-carbon nexus in the dispark pumped irrigation system. **Journal of Hydrology**, v. 624, 129879, set. 2023.

DIAS, P. M. S.; PORTELA, J. C.; GONDIM, J. E. F.; BATISTA, R. O.; ROSSI, L. S.; MEDEIROS, J. L. F.; FARIAS, P. K. P.; MOTA, P. J.; BANDEIRA, D. J. C.; LEMOS FILHO, L. C. A. Soil Attributes and Their Interrelationships with Resistance to Root Penetration and

Water Infiltration in Areas with Different Land Uses in the Apodi Plateau, Semiarid Region of Brazil. **Agriculture**, v. 13, n. 10, p. 1921, 30 set. 2023.

DINGEMANS, M. M. L.; SMEETS, P. W. M. H.; MEDEMA, G. F. J.; RAAT, K. J.; VANWENZEL, A.; BARTHOLOMEUS, R. P. Responsible water reuse needs an interdisciplinary approach to balance risks and benefits. **Water**, v. 12, n. 5, p. 1264, 2020.

DNOCS. Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Reservatório de água a Barragem é Engenheiro Armando**. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/dnocs/pt-br. Acesso em: 06 ago. 2024.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P. **Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo van Genuchten**. Soil Water Retention Curve, SWRC (version 3,00beta). Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2001.

ELSAYED, S.; HUSSEIN, H.; MOGHANM, F. S.; KHEDHER, K. M.; EID, E. M.; GAD, M. Application of Irrigation Water Quality Indices and Multivariate Statistical Techniques for Surface Water Quality Assessments in the Northern Nile Delta, Egypt. **Water**, v. 12, n. 12, 3300, 24 nov. 2020.

EMBRAPA MEIO AMBIENTE. **Agricultura biossalina:** desafios e alternativas para o uso de águas salobras e salinas no semiárido brasileiro Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2019.

FAISAL, H. M.; ZUBAIR, M.; AZIZ, W.; WASEEM, M.; HAYAT, F. S. Evaluation of Greywater Irrigation Impact on Soil and Edible Crops. **Southern Journal of Engineering & Technology –Special Issue**, [*s. l*], v. 01, p. 300-313, 2024.

FAO. **Water quality for agriculture**. Rome: Food and agriculture organization of the United Nations, 1985.

FAOSTAT 3 Food and Agriculture Organization of the United. **Food Security in the 2030 Agenda for Sustanaible Devolepment**. Relatory to Rome Italy, 2021.

GEE, W. G.; OR, D. Particle-Size Analysis. In: DANE, J.; TOPP, G. C. (org.). **Methods of Soil Analysis**. Book Series: 5. Part 4. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 255-293.

GROSS, A.; AZULAI, N.; ORON, G.; RONEN, Z.; ARNOLD, M.; NEJIDAT, A. Environmental impact and health risks associated with greywater irrigation: a case study. **Water Science and Technology**, v. 52, n. 8, p. 161-169, 1º out. 2005.

HESPANHOL, I. Um novo paradigma para a gestão de recursos hídricos. **Estudos avançados**, n. 22, v. 63, p. 131-158, 2008.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios**. Volume 21. 1999. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/59/pnad _1999_v21_br.pdf. Acesso em: 25 out. 2023.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. P**opulação no último censo**. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/acu/panorama. Acesso em: 06 ago. 2024.

JAVAHERI, M. N.; TISHEHZAN, P.; MOAZED, H. Development of a complete and straightforward hybrid model for gray water treatment. **Clean Technologies And Environmental Policy**, v. 22, n. 8, p. 1745-1753, 14 ago. 2020.

JIA, S.C.; GAO, J.Q.; GUO, H.; WANG, C.; CHEN, Y.Y.; LI, Q.; TIAN Y.M. Influence of Water Quality on Corrosion of Cast Iron Pipe in Reclaimed Water. **Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection**, v. 40, n. 6, p. 569-576, 2020.

JUAN, Y.; CHEN, Y.; LIN, J. Greywater Reuse System Design and Economic Analysis for Residential Buildings in Taiwan. **Water**, v. 8, n. 11, 19 nov. 2016. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4441/8/11/546. Acesso em: 16 jun. 2021.

JUESCHKE, E.; MARSCHNER, B.; TARCHITZKY, J.; CHEN, Y. Effects of treated wastewater irrigation on the dissolved and soil organic carbon in Israeli soils. **Water Science and Technology**, v. 57, n. 5, p. 727-733, 1º abr. 2008.

KAHINDA, J. M.; TAIGBENU, A. E.; SEJAMOHOLO, B. B. P.; LILLIE, E. S. B.; BOROTO, R. J. A GIS-based decision support system for rainwater harvesting (RHADESS). **Physics And Chemistry of The Earth, Parts A/B/C**, [s.l.], v. 34, n. 13-16, p. 767-775, jan. 2009.

KATZ, B. G.; SEPULVEDA, A. A.; VERDI, R. J. Estimating nitrogen loading to ground water and assessing vulnerability to nitrate contamination in a large Karstic Springs Basin, Florida. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 45, n. 3, p. 607-627, 2009.

KHAN, A. S.; DA SILVA, M. J. N.; DE SOUSA, E. P.; LIMA, P. V. P. S. Tecnologias de reaproveitamento de água. **Revibec: Revista Iberoamericana de Economia Ecológica**, v. 34, p. 25-42, 2021.

LÄUCHLI, A.; GRATTAN S. R. Plant responses to saline sodic conditions. **Agricultural Salinity Assessment and Management**, p. 165-205, 2012.

LOPES, T. C. S.; PORTELA, J. C.; MELO, S. B.; OLIVEIRA, V. N. S.; BATISTA, R. O.; GONDIM, J. E. F.; CUNHA, M. E. Characterization of Physical-Chemical and Structural Soil Attributes in the Semiarid Region of the Rio Grande do Norte State, Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 3, p. 359, 15 fev. 2019.

MAIMON, A.; ARYE, G.; GROSS, A. Greywater irrigation and soil quality: an assessment framework adjustment and application. **Soil & Environmental Health**, v. 1, n. 3, p. 100034, set. 2023.

MAIMON, A.; FRIEDLER, E.; GROSS, A. Parameters affecting greywater quality and its safety for reuse, **Science of the Total Environment**, v. 487, p. 20-25, 2014. 10.1016/j.scitotenv.2014.03.133.

MAO, J.; LI, Y.; ZHANG, J.; ZHANG, K.; MA, X.; WANG, G.; FAN, L. Organic carbon and silt determining subcritical water repellency and field capacity of soils in arid and semi-arid region. **Frontiers In Environmental Science**, v. 10, p. 1-13, 24 nov. 2022.

MARTINS, E. S. R.; MAGALHÃES, A. R. A seca de 2012 –2015 no Nordeste e seus impactos. **Parc. Estrat.**, Ed. Especial, Brasília, v. 20, n. 41, p. 107-128, 2015.

MENDONÇA, R. **Conservar e criar**: natureza, cultura e complexidade. São Paulo: Editora Senac, 2022.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.. Limited effect of organic matter on soil available water capacity. **European Journal Of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 39-47, 6 out. 2017.

MÖBUS, G. **QualiGraf**. 2001. Disponível em: https://qualigraf.funceme.br/. Acesso em: 20 jan. 2025.

MORAIS, R. T. L.; OLIVEIRA, P. P. Sistemas de tratamento de águas cinza: diferentes métodos de tratamento. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 5, n. 1, 2024.

MOURA, M. S. B.; SOBRINHO, J. E.; DA SILVA, T. G. F. **Aspectos metereológicos do semiárido brasileiro**. tecnologias de convivência com o semiárido brasileiro. Embrapa: Brasilia, Brazil, v. 1, p. 85-104, 2019.

MUNOZ, N. J. **What is the economic feasibility of implementing grey water infrastructure at the citywide level?** 2016 (Master' Dissertation). University of San Francisco, São Francisco (CA).

MURILLO, J.M.; LOPEZ, R.; FERNANDEZ, J.E.; CABRERA F. Olive tree response to irrigation with wastewater from the table olive industry. **Irrigation Science**, v. 19, p. 175-180, 2000.

MUSAFIRI, C. M.; KIBOI, M.; MACHARIA, J.; NG'ETICH, O. K.; KOSGEI, D. K.; MULIANGA, B.; OKOTI, M.; NGETICH, F. K. Adoption of climate-smart agricultural practices among smallholder farmers in Western Kenya: do socioeconomic, institutional, and biophysical factors matter? **Heliyon**, v. 8, n. 1, p. 08677, jan. 2022.

NAÇÕES UNIDAS, 2019. **Perspectivas de urbanização mundial 2018**: Destaques. Disponível em: https:// development/desa/publications/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html. Acesso em: 10 abr. 2024.

NYAGATARE, G.; SHINGIRO, C.; NYIRANZIRINGIRIMANA, C. Effect of domestic greywater reuse for irrigation on soil physical and chemical characteristics and tomatoes growth. **Journal of Agriculture and Environment for International Development (Jaeid)**, v. 115, n. 2, p. 51-63, 30 dez. 2021.

OLIVEIRA JÚNIOR, R. F.; LEMOS FILHO, L. C. A.; BATISTA, R. O.; FERREIRA, L. L. N.; COSTA, L. R.; CAMINHA, M. P. Multivariate statistics applied to irrigation water quality data of a watershed in the semiarid region of brazil. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 3, p. 650-658, set. 2021.

OLIVEIRA, L. L. P.; PORTELA, J. C.; SILVA, E. F.; DIAS, N. S.; GONDIM, J. E. F.; FERNANDES, C. N.; MEDEIROS, J. F. Water retention in Cambisols under land uses in semiarid region of the Brazil. **Journal Of Arid Environments**, v. 189, 104483, jun. 2021. Elsevier BV.

OMS - Organização Mundial da Saúde. **Diretrizes para a qualidade da água potável**, 216 (2011), 303 – 304p.

ONU - ORGANIAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.** 2021. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6. Acesso em: 26 fev. 2021.

PARRON, L. M. *et al*. **Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água.** In: Embrapa. Colombo: Embrapa Florestas, 2011 24-25p.

PAULO, P. L.; VIEIRA, J.; TAKAHASHI, K. M.; MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; SILVA, J. B.; BONCZ, M. A. Reúso não potável de água: Aspectos legais, aproveitamento urbano e agrícola, e tecnologias emergentes para produção de água para reúso. Nota Técnica 4 - Água para reúso: água cinza tratada em wetlands construídos. **Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 43-58, 2022.

PEDRERO, F.; GRATTAN, S.R.; BEN-GAL, A.; VIVALDI, G. A. Opportunities for expanding the use of wastewaters for irrigation of olives. **Agricultural Water Management**, v. 241, 106333, nov. 2020.

PINTO, U.; MAHESHWARI, B.L.; GREWAL, H.S. Effects of greywater irrigation on plant growth, water use and soil properties. **Resources, Conservation And Recycling**, v. 54, n. 7, p. 429-435, maio 2010.

RAMOS, A.V.; GONZALEZ, E. N. A.; ECHEVERRI, G. T.; MORENO, L. S.; JIMÉNEZ, L. D.; HERNANDEZ, S. C. Potential uses of treated municipal wastewater in a semiarid region of Mexico. **Sustainability**, v. 11, n. 8, p. 2217, 2019.

REICHMAN, S. M.; WIGHTWICK, A. M. Impacts of standard and 'low environmental impact' greywater irrigation on soil and plant nutrients and ecology. **Applied Soil Ecology**, v. 72, p. 195-202, out. 2013.

RICART, S.; RICO, A. M. Assessing technical and social driving factors of water reuse in agriculture: A review on risks, regulation and the yuck fator. **Agricultural Water Management**, v. 217, 15, mar. 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377418311405. Acesso em: 10 jun. 2021.

RICHARDS, L. A. (org.). **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. US Government Printing Office, 1954.

RIO GRANDE DO NORTE (Estado). **Meteorologia**: dados pluviométricos 1995 a 2017. Natal: EMPARN, 2017. Disponível em: http://www.emparn.rn.gov.br/. Acesso em: 03 maio 2024.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. – Sabesp. **Meio Ambiente/Uso Racional da Água/Dicas de economia/Em casa.** SABESP. 2022. Disponível

em: https://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=595#:~:text=De%20acordo%20com%20a%20Organiza%C3%A7%C3%A3o,mais%20de%20200%20litros%2Fdia. Acesso em: 25 out. 2023.

Serviço de Apoio aos Projetos Alternativos Comunitários. **SEAPAC**, 2011. Disponível em: https://www.seapac.org.br/institucional. Acesso em: 27 fev. 2022.

SHAIKH, Irshad N.; AHAMMED, M. Mansoor; KRISHNAN, MP Sukanya. Graywater treatment and reuse. **Sustainable water and wastewater processing**. Elsevier, 2019. p. 19-54.

SIGGINS, A.; BURTON, V.; ROSS, C.; LOWE, H.; HORSWELL, J. Effects of long-term greywater disposal on soil: a case study. **Science of the total environment**, v. 557-558, p. 627-635, jul. 2016.

SILVA SANTOS, A.; RODRIGUES, M. H. B. S.; DA SILVA, G. V.; GOMES, F. A. L.; DA SILVA, J. N.; DE ALMEIDA CARTAXO, P. H. Importância do reuso de água para irrigação no Semiárido. **Meio Ambiente**, (Brasil), v. 2, n. 3, 2020.

SILVA, C. L.; BASSI, N. S. S.; ROCHA JÚNIOR, W. F. Technologies for rational water use in Brazilian agriculture. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 11, n. 2, 1º mar. 2016. Disponível em: http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/1808. Acesso em: 1º jul. 2024.

SILVA, G.A; FARIAS, A. LINS, C. W. Análise espaço-temporal da vegetação no semiárido do Nordeste brasileiro utilizando parâmetros biofísicos. **Revista Semiárido De Visu**, v. 9, n. 3, p. 195-203, 2021.

SILVA, S. N. LOPES, F. G.; ANDRADE, F. E.; FERREIRA, C. B.; DANTAS, M. C. A. M.; SIQUEIRA, E. C. Efeitos da escassez hídrica na economia do perímetro irrigado de São Gonçalo, Paraíba. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 12, n. 1, p. 13, jul. 2017. Disponível em: https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/5075/4339. Acesso em: 8 jun. 2023.

STATISTICA (data analysis software system), versão 7.0, StatSoft (www.statsoft.com), 2004.
SUDENE. **Delimitação do Semiárido**. 2019. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwih373lzpbvAhWFmuAKHdqHBDcQFjAEegQICxAD&url=http%3A%2F%2Flegis.senado.leg.br%2Fsdleggetter%2Fdocumento%2Fdownload%2F62db2e10-9021-40b0-ac24c731ceb4df63&usg=AOvVaw3CgbhJBf6bZzOrdbgLyZYB. Acesso em: 27 fev. 2021.

TAMIRU, M.; BEKELE, G. Various absorbents and parameters affecting removal of water hardness from wastewater: review. **Int. J. Water Wastewater Treat.**, v. 6, p. 569-576, 2020.

TARCHOUNA, L. G.; MERDY, P.; RAYNAUD, M.; PFEIFER, H-R.; LUCAS, Y. Effects of long-term irrigation with treated wastewater. Part I: evolution of soil physico-chemical properties. **Applied Geochemistry**, v. 25, n. 11, p. 1703-1710, nov. 2010.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; WENCESLAU, A.F.; TEIXEIRA, G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017.

TERÊNCIO, D. P. S.; SANCHES FERNANDES, L. F.; CORTES, R. M. V.; PACHECO, F. A. L. Improved framework model to allocate optimal rainwater harvesting sites in small watersheds for agro-forestry uses. **Journal of Hydrology**, v. 550, p. 318-330, jul. 2017.

TONETTI, A. L.; FIGUEIREDO, I. C. S.; SCHNEIDER, J.; DE OLIVEIRA CRUZ, L. M.; COASACA, R. L **Tratamento de esgotos domésticos em comunidades isoladas**: referencial para a escolha de soluções. Campinas, SP.: Biblioteca/Unicamp, 2018.

TOZE, Simon. Reuse of effluent water—benefits and risks. **Agricultural Water Management**, v. 80, n. 1-3, p. 147-159, fev. 2006.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-from equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal,** v. 44, p. 892-898, 1980.

WANG, H.; ASEFA, T.; BRACCIANO, D.; ADAMS, A.; WANAKULE, N. Proactive water shortage mitigation integrating system optimization and input uncertainty. **Journal of Hydrology**, v. 571, p. 711-722, 2019.

YANG, J.; LI, J.; VAN VLIET, M.T; JONES, E.R; HUANG, Z.; LIU, M.; BI, J. Economic risks hidden in local water pollution and global markets: A retrospective analysis (1995–2010) and future perspectives on sustainable development goal 6. **Water Research**, v. 252, 121216, 2024.

ZHANG, D.; ZHANG, C.; REN, H.; XU, Q.; YAO, Z.; YUAN, Y.; YAO, P.; ZHAO, N.; LI, Y.; ZHANG, S. Trade-offs between winter wheat production and soil water consumption via leguminous green manures in the Loess Plateau of China. **Field Crops Research**, v. 272, 108278, out. 2021.

ZHAO, P.; MA, M.; HU, Y.; WU, W.; XIAO, J. Comparison of international standards for irrigation with reclaimed water. **Agricultural Water Management**, v. 274, 107974, dez. 2022.

ZIPORI, I.; YERMIYAHU, U.; EREL, R.; PRESNOV, E.; FEINGOLD, I.; DAG, A.; BEN-GAL A. The influence of irrigation level on olive tree nutritional status. **Irrigation Science**, v. 33, p. 277-287, 2015.