



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

LIHERBERTON FERREIRA DOS SANTOS

**FERTIRRIGAÇÃO DA CULTIVAR DE GIRASSOL H-251 COM DILUIÇÕES DE
ÁGUA PRODUZIDA DO PETRÓLEO TRATADA**

Mossoró

2022

LIHERBERTON FERRERIA DOS SANTOS

**FERTIRRIGAÇÃO DA CULTIVAR DE GIRASSOL H-251 COM DILUIÇÕES DE
ÁGUA PRODUZIDA DO PETRÓLEO TRATADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de “Mestre em Manejo de Solo e água”.

Linha de Pesquisa: Tratamento e Uso Agrícola de Resíduos e Seus Impactos no Solo e na Água

Orientador: Prof. Dr. Rafael Oliveira Batista

Coorientadora: Dra. Fabrícia Gratyelli Bezerra Costa

Mossoró

2022

© Todos os direitos estão reservados a 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 n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S237f Santos, Liherberton Ferreira dos .
Fertirrigação da cultivar de girassol H-251 com diluições de água produzida do petróleo tratada / Liherberton Ferreira dos Santos. - 2022.
84 f. : il.

Orientador: Rafael Oliveira Batista.
Coorientadora: Fabrícia Gratyelli Bezerra Costa.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água, 2022.

1. Reúso agrícola. 2. Resíduo industrial. 3. Helianthus annuus. 4. Qualidade do solo. 5. Desempenho agrônômico. I. Batista, Rafael Oliveira, orient. II. Costa, Fabrícia Gratyelli Bezerra, co-orient. III. Título.

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.

LIHERBERTON FERRERIA DOS SANTOS

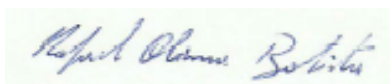
**FERTIRRIGAÇÃO DA CULTIVAR DE GIRASSOL H-251 COM DILUIÇÕES DE
ÁGUA PRODUZIDA DO PETRÓLEO TRATADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de “Mestre em Manejo de Solo e água”.

Linha de Pesquisa: Tratamento e uso agrícola de resíduos e seus impactos no solo e na água

Defendida em: 25/02/2022

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Rafael Oliveira Batista – Presidente



Dra. Fabúcia Gratyelli Bezerra Costa - Membro



Prof. Dr. Sc. Fábio Pereira Fagundes – Membro



Prof. Dr. Francisco de Oliveira Mesquita - Membro

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela sua graça de nos salvar do pecado e nos mostrar o caminho da santidade, que é o melhor caminho que podemos seguir. Também agradeço por suprir a mim e a minha família em tudo, e por essa oportunidade de cursar este curso de pós-graduação almejado por muitos.

A minha esposa Lidiane Pinto de Mendonça Ferreira, pelo amor, paciência, companheirismo, conselhos e incentivo durante toda essa jornada.

A minha mãe Lidamar Gomes Ferreira, ao meu padrasto Josias Cabral as Silva e ao meu pai José Abelardo dos Santos, pelos conselhos e orações. Ao meu irmão Lidemberg Ferreira dos Santos, pelo incentivo e conselhos.

Ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015, por todo o apoio financeiro ao projeto.

Ao PRH 55.1-ANP, por todo apoio e oportunidades de mostrar meu trabalho como pesquisador, em especial aos professores Fábio Pereira Fagundes (professor visitante) e Frederico Ribeiro do Carmo (coordenador), pelas orientações e ensinamentos da área do petróleo e da vida acadêmica e profissional.

A Universidade Federal Rural do Semi-Árido, que proporcionou toda minha formação acadêmica, desde as graduações até o mestrado. A todos que integram o Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rafael Oliveira Batista, por todos os preciosos ensinamentos técnicos e da vida acadêmico-profissional, e por seu procedimento íntegro e dedicado. Certamente um dos melhores professores que já tive.

A minha coorientadora Dr. Fabrícia Gratyelli Bezerra Costa, por fornecer os dados para esta pesquisa, sem os quais seria muito difícil o término em tempo hábil diante deste momento de pandemia, e por todo apoio e auxílio diante das dificuldades que ocorreram ao decorrer da pesquisa.

Muito Obrigado!

“Feliz é o homem que encontra sabedoria, e o homem que adquire entendimento. Porque sua mercadoria é melhor do que mercadoria de prata, e o seu lucro que o fino ouro.”

(Pv 3:13–14 Bíblia King James)

RESUMO

SANTOS, L.F. **Fertirrigação da cultivar de girassol H-251 com diluições de água produzida do petróleo tratada**. 2022. 84p. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2022.

Um dos grandes problemas ambientais da indústria do petróleo e gás natural é a destinação dos grandes volumes gerados de água produzida. Nesse sentido, este trabalho teve por objetivo estudar os efeitos da aplicação de diluições de água produzida tratada nas características produtivas, morfométricas, nutricionais e fitoextratoras do girassol e nas características químicas do solo. A água produzida foi submetida previamente à tratamento por floculação e decantação. O experimento foi realizado em casa de vegetação, montada no campus oeste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O modelo experimental utilizado foi o de blocos casualizados com cinco tratamentos e cinco repetições. Foram utilizados os seguintes tratamentos: D0 – 100 % de água subterrânea (AS) e 0 % de água produzida tratada (APT); D25 – 75 % de AS e 25 % de APT; D50 – 50 % de AS e 50 % de APT; D75 – 25 % de AS e 75 % de APT; e D100 – 0 % de AS e 100 % de APT. A cultura do girassol (*Heliantus annuus*, cultivar H-251) foi cultivada em vasos de 32 L, preenchidos com brita (n° 0) em sua base e com solo (Argissolo Vermelho Distrófico Típico) proveniente da Fazenda Experimental Rafael Fernandes em Mossoró. Aos 90 dias após o transplântio foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0,0 a 0,10 m e de 0,10 a 0,20 m. Para as características químicas do solo o foi montado um delineamento em blocos casualizados, porém no esquema fatorial 5×2, sendo cinco diluições de APT e duas profundidades do solo (0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m), totalizando 50 unidades experimentais. Os efeitos dos tratamentos, no delineamento em blocos casualizados, foram analisados para a produtividade, características agronômicas, composição química da parte aérea (capítulo, caule e folhas) e das raízes, fatores de translocação e bioacumulação. Esses dados foram submetidos a análise de variância, teste de média e contrastes ortogonais. Já os dados de solo foram submetidos a análise de variância, análise de desdobramentos e contrastes ortogonais para as duas profundidades. Os atributos do solo não foram afetados pelas diluições de APT em comparação ao tratamento controle. Foi observada diferença estatística entre as profundidades para CE_{es} , K, Na, Mg, Fe, Mn, Zn e Cu, em pelo menos um dos tratamentos, nos quais ocorreu redução dos teores da profundidade mais superficial para a mais profunda, exceto para o Cu. Foi constatado aumento do diâmetro do caule e do capítulo em 77 % e 65 %, respectivamente, em seus valores máximos devido a aplicação de APT diluída. Na análise nutricional da planta, houve efeito das diluições apenas para o Zn nas folhas, e para o Na nas raízes. A cultivar de girassol H-251 não translocou nenhum dos elementos estudados, e bioacumulou Mn, Fe e Zn em seus tecidos. Considerando os efeitos no solo e na planta, a diluição que melhor se adequa ao semiárido nordestino é a que recebeu 100% de água produzida, visto que promoveu o menor aporte de Na no solo e não interferiu negativamente nas características agronômicas e morfométricas do girassol.

Palavras-chave: Reúso agrícola, Resíduo industrial, *Heliantus annuus*, Qualidade do solo, Desempenho agronômico.

ABSTRACT

SANTOS, L.F. **Fertigation of sunflower cultivar H-251 with dilutions of treated produced water from petroleum.** 2022. 84p. Dissertation (Master in Soil and Water Management), Federal Rural University of the Semi-Arid, Mossoró, 2022.

One of the major environmental problems of the oil and gas industry is the destination of the large volumes of produced water generated. In this sense, this work aimed to study the effects of treated produced water on the objective characteristics, the nutritional and phytoextractor characteristics of the sunflower and the characteristics designed for the application of the individual application. The produced water was started and started in decanting treatment. The experiment was carried out in a greenhouse, mounted in the west campus of the Universidade Federal Rural do Semi-Árido. The experimental model used was that of five treatments and randomized blocks. The following treatments were used: D0 –100% groundwater (GW) and 0% treated produced water (TPW); D25 – 75% GW and 25% TPW; D50 – 50% GW and 50% TPW; D75 – 25% GW and 75% TPW; and D100 – 0% GW and 100% TPW. Sunflower (*Heliantus annuus*, cultivar H-251) was grown in 32 L pots, filled with gravel (n° 0) at its base and with soil (Typic Dystrophic Red Argisol) from the Rafael Fernandes Experimental Farm in Mossoró. At 90 days after transplanting, days were collected from soil at depths of 0.0 to 0.10 m and 0.10 to 0.20 m. For the characteristic characteristics of the soil, a randomized block design was set up, however in a 5×2 scheme, with five dilutions of TPW and two soil depths (0.0 to 0.10 m and 0.10 to 0.20 m), totaling 50 experimental units. The effects of treatments, without a randomized block design, were analyzed for yield, part of agronomic characteristics (head, stem and leaves) and roots, translocation factors and bioaccumulation. These data were selected for an analysis of variance, mean test and orthogonal contrasts. The selected soil data were selected for an analysis of variance, unfolding analysis and orthogonal contrasts for two depths. Soil attributes were not verified by TPW amplifications compared to the treatment control. A statistical difference was observed between the depths for ECes, K, Na, Mg, Fe, Mn, Zn and Cu, in at least one of the treatments, in which the contents of the most superficial to the deepest depths occurred, except for Cu. An increase in stem and capitulum diameter by 77% and 65%, respectively, was observed in their maximum values due to the application of diluted TPW. In the nutritional analysis of the plant (chapter, stem, leaves and roots), there was an effect of dilutions only for Zn in the leaves, and for Na in the roots. The sunflower cultivar H-251 translocated none of the elements not studied, and bioaccumulated Mn, Fe and Zn in its tissues. Considering the effects on soil and plant, the dilution that best suits the semi-destination is that which received 100% of produced water, saw the lowest soil input and did not interfere in the comparison of agronomic and morphological characteristics of sunflower.

Key words: Agricultural reuse, Industrial waste, *Heliantus annuus*, Soil quality, Agronomic performance.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização de águas produzidas de poços localizados no Brasil, Estados Unidos (EUA), China, Nigéria, Iraque e Qatar.	16
Tabela 2 – Valores orientadores para solo e águas subterrâneas.	26
Tabela 3 – Parâmetros específicos para lançamento de efluentes do Anexo I da resolução COEMA n°2/2017.	29
Tabela 4 – Parâmetros e seus valores máximos para água de reúso utilizada para fins agrícolas e florestais da resolução CONSEMA 419/2020.	30
Tabela 5 – Plantas com potencial de fitoextração e as vantagens e desvantagens de sua utilização.	36
Tabela 6 – Fatores de translocação (FT) e Bioacumulação (FB), e suas possíveis interpretações.	36
Tabela 7 – Características químicas iniciais do Argiloso Vermelho distrófico Típico empregando-se a metodologia de Teixeira et al. (2017).	40
Tabela 8 – Características físicas iniciais do Argiloso Vermelho distrófico Típico empregando-se a metodologia de Teixeira et al. (2017).	40
Tabela 9 – Proporções de diluição de água produzida tratada (APT) em água subterrânea (AS).	41
Tabela 10 – Lâminas brutas acumuladas no período de 90 (DAT) dias de aplicação de água produzida tratada (APT) e água de subterrânea (AS).	44
Tabela 11 – Valores médios da características físico-químicas das diluições da água produzida tratada.	46
Tabela 12 – Características físico-químicas do solo irrigado com diluições de água produzida.	51
Tabela 13 – Características químicas do solo após irrigação com diluições de água produzida.	54
Tabela 14 – Características produtivas do girassol, irrigado com diluições de água produzida em água de abastecimento.	56
Tabela 15 – Características químicas do capítulo do girassol irrigado com diluições de água produzida em água de abastecimento.	59
Tabela 16 – Características químicas do caule do girassol irrigado com diluições de água produzida em água de abastecimento.	60
Tabela 17 – Características químicas das folhas do girassol irrigado com diluições de água produzida em água de abastecimento.	62

Tabela 18 – Características químicas das raízes do girassol irrigado com diluições de água produzida em água de abastecimento.....	63
Tabela 19 – Fator de translocação (FT) do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada.....	65
Tabela 20 – Fator de bioacumulação (FB) do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema dos processos de fitorremediação.	35
Figura 2 – Localização da área experimental.	39
Figura 3 – Layout do experimento.....	42
Figura 4 – E_t e lâmina de irrigação durante os 90 DAT.	44
Figura 5 – Comportamento temperatura média do ar e da radiação solar durante os 90 DAT.	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	Conceito, caracterização e potencialidades da água produzida do petróleo	15
2.2	Principais técnicas de tratamento da água produzida	19
2.3	Legislações voltadas para a disposição final e aproveitamento de água produzida	23
2.4	Experiências no Brasil e no mundo com cultivos agrícolas fertirrigados com água produzida	30
2.5	A cultura do girassol	33
2.6	Conceito e principais processos de fitorremediação	34
2.7	Mecanismos de adsorção e absorção de elementos químicos no sistema radicular de plantas	37
3	MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1	Localização, caracterização da área experimental e classificação climática.....	39
3.2	Origem e tratamento da água produzida e origem da água de diluição	40
3.3	Instalação e condução do experimento	41
3.3.1	Delineamento, tratamentos e parcelas experimentais	41
3.3.2	Implantação do experimento	42
3.3.3	Manejo da fertirrigação	43
3.4	Caracterização das diluições de água produzida em água de poço	45
3.5	Características analisadas.....	46
3.5.1	Análise do solo após irrigação com água produzida tratada	46
3.5.2	Características produtivas e agronômicas do girassol após irrigação com as diluições de água produzida e água de abastecimento	46
3.5.3	Análise nutricional do girassol após irrigação com as diluições de água produzida tratada	47
3.5.4	Determinação da capacidade de fitoextração do girassol	48
3.5.5	Análise estatística	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	Características físico-químicas do solo após irrigação com as diluições de água produzida tratada	50
4.2	Micronutrientes no solo após irrigação com diluições de água produzida tratada ..	53
4.3	Características agronômicas do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada	56

4.4 Composição mineral da parte aérea e das raízes do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada.....	58
4.4.1 Concentração de manganês, ferro, zinco e sódio no capítulo do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada.....	58
4.4.2 Concentração de manganês, ferro, zinco e sódio no caule do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada.....	59
4.4.3 Concentração de manganês, ferro, zinco nas folhas do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada	61
4.4.4 Concentração de manganês, ferro, zinco e sódio nas raízes do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada.....	63
4.5 Capacidade de fitoextração do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada	64
4.5.1 Fator de Translocação	64
4.5.2 Fator de Bioacumulação.....	66
5 CONCLUSÕES	69
6 REFERÊNCIAS.....	70
7 APÊNDICE A – METODOLOGIA UTILIZADA NA ANÁLISE DE DILUIÇÕES DE ÁGUA PRODUZIDA	81
8 APÊNDICE B – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICO UTILIZADOS NA ANÁLISE NUTIRCIONAL DA PLANTA	83
9 APÊNDICE C – MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON CONSIDERANDO DADOS DO SOLO E DADOS AGRONÔMICOS DO GIRASSOL.....	84

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é uma das principais fontes atuais de energia de origem fóssil em todo o mundo, o qual teve sua produção aumentada com o passar do tempo, devido ao aumento da demanda energética exigida pela sociedade (Hisham et al., 2019). Esse aumento de produção proporcionou o aumento de extração de água produzida proveniente dos poços de petróleo, caracterizada por sua complexa composição e variedade de contaminantes altamente agressivos ao meio ambiente (Leil et al., 2021).

A água produzida contém compostos orgânicos e inorgânicos naturais na forma de sólidos dissolvidos e suspensos, alta concentração de sais, bactérias, materiais radioativos de ocorrência natural, além de aditivos químicos sintéticos de complexa composição utilizados em operações de poço (Sappington & Rifai, 2018). O descarte deste efluente sem um tratamento adequado pode interferir na sustentabilidade ambiental; desta forma, o tratamento aplicado a esse efluente deve adequar as substâncias perigosas presentes no efluente a limites aceitáveis para seu descarte ou reutilização (Olajire, 2020).

Uma alternativa atraente de destinação final para a água produzida é a sua aplicação em culturas agrícolas em regiões atingidas pela escassez hídrica. Todavia, o cloreto de sódio presente nesse efluente pode causar a dispersão de argilas no solo e o acúmulo de metais pesados pode ser nocivo ao desenvolvimento da cultura e tornar os frutos inapropriados para consumo humano (Miller et al., 2020). Por isso, também se faz necessário um tratamento prévio para a prática de seu reúso (Sedlacko et al., 2020). Ainda assim, recomenda-se que essa aplicação de água produzida seja realizada em culturas cujos produtos forneçam matéria prima para finalidades que não sejam o consumo humano direto (Costa, 2018).

O girassol (*Helianthus annuus* L.) é uma espécie domesticada pertencente à família *Asteraceae*, de alta adaptabilidade e cultivada em vários países por causa da sua variedade de usos e aplicações e de sua importância socioeconômica. O óleo produzido das sementes dessa planta pode, inclusive, servir de matéria prima à indústria energética através de sua conversão em biodiesel (Simões et al., 2020).

Essa cultura possui, ainda, características agronômicas importantes como tolerância às temperaturas baixas e elevadas, e adaptação às condições edafoclimáticas. Outras propriedades como crescimento rápido, alta produção de biomassa e bioacumulação de metais pesados, fazem dessa planta uma das mais utilizadas na descontaminação ambiental (Al-Jobori & Kadhim, 2019).

A fitoextração consiste na absorção de metais pesados, juntamente com água e nutrientes através das raízes das plantas. Após absorvidos, os metais pesados são precipitados

e acumulados nas partes aéreas do vegetal (brotos, folhas, dentre outros) (Shah & Daverey, 2020). Esse processo é utilizado como técnica de fitorremediação de solos e de águas contaminados (Suman et al., 2018). As plantas utilizadas nessa técnica precisam ter crescimento rápido, alta produção de biomassa, vasto sistema radículas e armazenar altos níveis de metais pesados (Ashraf et al., 2019).

Nesse contexto, este trabalho tem por objetivo geral estudar os efeitos da aplicação de diluições de água produzida tratada nas características produtivas, morfométricas, nutricionais e fitoextratoras do girassol bem como nas características químicas do solo. Para tanto, determinou-se os seguintes objetivos específicos: verificar a influência de diluições de água produzida do petróleo tratada nos atributos produtivos do girassol H-251; estudar os impactos do uso de diluições de água produzida do petróleo tratada na alteração de atributos químicos do solo; calcular a fitoextração de elementos químicos pelo girassol H-251; e, obter a diluição da água produzida do petróleo tratada mais adequada ao cultivo do girassol H-251 nas condições do semiárido potiguar.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Conceito, caracterização e potencialidades da água produzida do petróleo

A água produzida (AP) é o efluente elevado à superfície juntamente com o petróleo e/ou gás natural em operações de extração, o qual é constituído pela água presente na formação (água conata) e pela água que é injetada no reservatório para fins de recuperação de hidrocarbonetos (Jiménez et al., 2019). O fluido extraído inicialmente do poço é submetido a um pré-tratamento de separação óleo-gás-água em vasos de pressão. Esse tratamento é baseado na diferença de densidade dos fluidos em seu interior, na aglutinação de partículas de óleo, na força centrífuga e na mudança brusca de velocidade e direção do fluxo. A água que saí desse processo passa, ainda, pela degaseificação e por um separador água/óleo, e posteriormente segue para destinação final (Thomas, 2004).

A presença e a concentração dos componentes químicos na água produzida varia com a localização do ponto de extração, visto que diferentes locais do planeta diferem na formação geológica, composição do petróleo e do gás, condições operacionais, idade de poço e aditivos químicos utilizados (Echchelh et al., 2018). A composição deste efluente apresenta alta complexidade incluindo óleos, hidrocarbonetos e gases dissolvidos (principalmente sulfeto de hidrogênio e dióxido de carbono), ácidos orgânicos, fenóis e metais pesados, além de traços de compostos químicos (Olajire, 2020). A Tabela 1 apresenta os valores de atributos medidos em águas produzidas de vários países.

Os cátions sódio (Na^+), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), bário (Ba^{2+}), estrôncio (Sr^{2+}), ferro (Fe^{2+}), estão presentes na AP geralmente na forma de cloretos, carbonatos, hidrocarbonatos; e, também os ânions cloro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-). Todas essas substâncias influenciam nas propriedades químicas da AP tais como capacidade tampão e salinidade. Essa última propriedade é principalmente influenciada pelo sódio e cloretos dissolvidos, e em menor proporção pelo cálcio, magnésio e potássio, que normalmente surgem em menor concentração no efluente (Al-Ghouti et al., 2019; Isek et al., 2018; Jiménez et al., 2018). Em geral a AP apresenta teor de sais e íons inorgânicos igual ou maior ao da água do mar, sendo abundante de íons cloreto e sódio, por consequência sua densidade, também, é superior (Kabyl et al., 2020).

Na AP pode conter diversos metais tais como ferro (Fe), cromo (Cr), bário (Ba), níquel (Ni), zinco (Zn), dentre outros; sendo os metais mercúrio (Hg), zinco, bário, manganês (Mn) e ferro encontrados em maior concentração do que na água do mar. Entretanto, a presença e as concentrações desses elementos são influenciadas pelas características e idade geológicas, volume de água injetada no poço e composição química (Al-Ghouti et al., 2019). Metais pesados como mercúrio, chumbo, níquel, prata, cromo, e metaloides na forma de arsênio (As) em diferentes concentrações, também, podem estar presentes na AP (Isek et al., 2018).

Os metais são conhecidos por causar danos à saúde humana e ao meio ambiente, sendo alguns deles tóxicos às plantas a partir de certas concentrações. Esses elementos não são biodegradáveis, podendo interagir química e fisicamente com outros elementos de ocorrência natural, e assim, têm sua mobilidade alterada (Echchelh et al., 2018).

A composição do petróleo, também, contribui para a complexidade da AP, visto que apresenta uma ampla gama de compostos orgânicos recalcitrantes, tais como bezeno, tolueno, etileno e xileno (BTEX), hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), fenóis, ácidos orgânicos, ceras, surfactantes e biocidas; apontados como os principais contaminantes da AP (Olajire, 2020). Os BTEXs são encontrados na AP em concentrações consideradas elevadas, sendo compostos facilmente perdidos para a atmosfera (Al-Ghouti et al., 2019).

Os HPAs são compostos orgânicos aromáticos constituídos somente por átomos de carbono e hidrogênio, que têm por característica a presença de dois ou mais anéis aromáticos em sua estrutura molecular (Meire et al., 2007). Também são considerados compostos orgânicos persistentes (POPs) por causa do seu tempo de meia-vida e consequente distribuição global. Dentre os mais de quinhentos tipos de HPAs, dezesseis são considerados prioritários pela US-EPA (United States Environmental Protection Agency) por causa dos seus efeitos carcinogênicos e genotóxicos, a seguir a lista desses poluentes: acenafteno, acenaftileno, antraceno, benzo(a)antraceno, benzo(a)pireno, benzo(b)fluoranteno, benzo(ghi)perileno, benzo(k)fluoranteno, criseno, dibenzo(a,h)antraceno, fenantreno, fluoranteno, fluoreno, indeno(1,2,3-cd)pireno, naftaleno e pireno (Nunes, 2018; US-EPA, 2007).

Em geral, os HPAs são pouco solúveis, característica essa que diminui com o número de anéis, e sua volatilidade diminui com o aumento peso molecular. HPAs de maior peso molecular apresentam baixa pressão de vapor, encontrando-se na forma sólida ou adsorvidos em partículas presentes na água (suspensas ou sedimentos) ou no ar. Os de estrutura mais simples, como o naftaleno, têm maior volatilidade (Alves, 2018).

Os óleos dispersos são gotículas de óleo em suspensão na AP, essas incluem HPAs e alguns alquifenóis, como fenóis aquilados (C₆-C₉), menos solúveis em água (Jiménez et al.,

2018). Vários ácidos orgânicos, também, estão presentes no efluente dos quais os principais são os ácidos monocarboxílicos e os dicarboxílicos de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos com baixo peso molecular (Al-Ghouti et al., 2019).

Além de sua complexidade, o volume de AP produzido anualmente é alarmante e representa um dos grandes problemas causados pela indústria do petróleo. Este quadro se configura em um grande desafio de gerenciamento para as empresas do setor, visto que, este efluente necessita de tratamento e descarte adequados devido à toxicidade dos compostos presentes no mesmo, pois tem grande potencial de causar danos ambientais (Assunção et al., 2018).

No ano de 2020, o volume de AP no Brasil foi de 194 milhões de m³, correspondendo a uma razão água/óleo de 1,13/1. No Rio Grande do Norte, no mesmo ano, o volume de AP foi de 57 milhões de m³, resultando em uma razão água/óleo igual a 28/1, segundo a base de dados da ANP (2021). Essa diferença entre a razão água/óleo nacional e a estadual se deve aos campos mais maduros estarem presentes no estado.

Para Scalon et al. (2020), a abordagem mais óbvia para a reutilização ou reciclagem da AP é utilizá-la em operações de fraturamento hidráulico. Esta prática é facilitada devido ao avanço da química de fluídos de fraturamento. Echchelh et al. (2021), argumenta que essa técnica é utilizada em todo mundo, porém, a mesma é considerada economicamente cara. Além disso, quando aplicada em poços profundos a AP pode causar danos ambientais como contaminação de águas subterrâneas e sismicidade induzida.

Em geral, a maior parte do volume de AP gerado no mundo em instalações onshore é reinjetado no solo como descarte ou para recuperação de óleo. Já em instalações offshore, a prática é descarregar o efluente no mar (Jiménez, 2018). Para fins de reinjeção em reservatório os teores de óleos e graxas e sólidos suspensos limitam o uso da AP devido a estes contaminantes promoverem obstruções no sistema de produção e reduzir sua eficiência de injeção de água (Weschenfelder et al., 2015).

As práticas adotados no Brasil para disposição final da AP são: a reinjeção em poços para aprimoramento de produção de hidrocarbonetos ou em poços de descarte (produção onshore), e lançamento no mar (produção offshore). Já nos Estados Unidos, o efluente da indústria petrolífera tem como destinação final a recarga de águas subterrâneas, descarte em águas superficiais, reúso na irrigação, uso em cidades, na indústria e no faturamento hidráulico (Scanlon et al, 2020).

A AP tratada pode ser reutilizada para irrigação de culturas agrícolas desde que não sejam para o consumo humano direto (Weber et al., 2017). Nos últimos anos, devido à sua grande magnitude de produção anual, a AP foi estudada como alternativa na irrigação de

culturas agrícolas em regiões de clima árido e semiárido (Dolan, 2018; Crisóstomo et al., 2016; Crisóstomo et al., 2018; Costa et al., 2019; Costa et al., 2020; Miller et al., 2020; Pica et al., 2017; Weber et al., 2017).

As grandes limitações do uso da AP na irrigação agrícola é o seu teor muito elevado de sais, sódio, íons alcalinos e metais pesados, que muitas vezes ultrapassam os limites recomendados pela FAO (Ayers & Westcot, 1985) para água de irrigação. A salinidade da AP prejudica a fertilidade do solo quando sua sodicidade é elevada, o que causa o efeito de diminuição de permeabilidade e da infiltração de água no solo (Echchelh et al., 2021).

2.2 Principais técnicas de tratamento da água produzida

Antes de seu descarte, a AP precisa ser tratada visto que sua alta concentração de óleos e graxas e sais alteram a qualidade das águas subterrâneas, podendo expor ao risco a saúde dos seres vivos, além de poder causar incrustações, obstruções e corrosão em sistemas de produção (Souza et al., 2020). A escolha do tipo de tratamento depende de fatores como constituintes da AP, localização do campo de produção petróleo e/ou gás, e das normas ambientais vigentes no país onde a produção está ocorrendo (Echchelh et al., 2018).

A disposição final da AP determina o tipo e a extensão do tratamento. Nas atividades de produção de petróleo e gás em terra as instalações de tratamento são projetadas para remover principalmente óleos e graxas dispersos e sólidos suspensos a fim de evitar a obstruções em tubos e danos às bombas. Em plataformas marítimas, o tratamento da AP visa principalmente à redução de óleos e graxas a níveis adequados para mitigação de impactos ambientais na fauna e flora aquática (Jiménez et al., 2018).

Em geral, os sistemas de tratamento demandam várias unidades individuais, nas quais ocorrem processos unitários distintos para remoção de elementos indesejáveis que não podem ser removidos apenas com um único tratamento. O tratamento pode ampliar as opções de gerenciamento da AP, incluindo o reúso na agricultura e indústria. A escolha de um sistema de tratamento para a AP é desafiadora, porquanto, este deve remover a maioria dos contaminantes presentes. Normalmente, escolhe-se a técnica mais econômica, a qual depende de fatores como qualidade do afluente, preço da energia elétrica, capacidade da planta, qualidade pretendida do efluente tratado (Al-Ghouti et al., 2019). A seguir são listados as principais técnicas de tratamento da AP, divididas em dois grupos: os tratamentos convencionais (separação gravitacional, flotação, hidrociclones e filtração); e os tratamentos não convencionais (tratamentos químicos, tratamento biológico, por membrana e adsorção).

A separação gravitacional tem por características ser mais adaptável, de baixo custo, e mais simples dentre as técnicas de tratamento. Além disso, permite a utilização de compostos

químicos e outras tecnologias para otimização da remoção de poluentes (Liu et al., 2021). Seu princípio de funcionamento é a diferença de densidade entre a fase contínua de água e as gotículas de óleo, que ascendem à superfície do efluente devido à força de empuxo exercida sobre as mesmas (Stewart & Arnold, 2011). Nos campos de petróleo, separadores do tipo API (American Petroleum Institute) são utilizados para remoção de óleo e frações mais leves da AP (Olajire, 2020).

A flotação consiste na formação de microbolhas dentro da câmara flotadora, que dão origem a agregados, que, por sua vez, são carregados à superfície do fluido. Esse tratamento pode ser feito de duas formas principais, a saber: flotação natural ou gravitacional, que é um procedimento clássico; e flotação por ar ou gás induzido (Brasil, 2014). A técnica de flotação é empregada na remoção de sólidos suspensos, fibras, sólidos de baixa densidade e óleo. Três processos ocorrem dentro da flotação: a geração de bolhas; a formação de aglomerados pelo contato e fixação das bolhas, gotículas de óleo e sólidos suspensos; e, a ascensão dos flocos por diferença de densidade. Essa técnica é vastamente utilizada no tratamento de AP em unidades de tratamento onshore (Liu et al., 2021).

Os ciclones são equipamentos que reduzem ou aumentam a concentração dispersa de uma fase em um efluente, sejam agregados, partículas, gotículas, entre outros. Para tanto, esses equipamentos utilizam a aceleração centrífuga (Jiménez et al., 2018). No tratamento da AP, os hidrociclones agem como separadores de sólidos e óleos em uma corrente de efluente, e são baseados na diferença de densidades desses materiais. Em geral, possuem uma seção cilíndrica em sua extremidade superior, em que o fluido entra tangenciando suas paredes; e uma seção cônica, cujo ângulo é determinante para o desempenho e capacidade de separação desse equipamento (Nasiri & Jafari, 2016). A forma cônica do hidrociclone e o diferencial de pressão gerado entre as paredes e o centro provocam fluxos em direções opostas para a fase oleosa (rejeito) e a salmoura (fase mais densa), sendo esta última removida no topo do equipamento (Brasil et al., 2014).

A filtração ocorre pela infiltração de água ou efluente por um meio filtrante, geralmente areia, podendo ser classificada em: filtração lenta e filtração rápida. Na filtração rápida, o filtro de areia fica localizado após as unidades de coagulação e flotação, sendo assim classificado como tratamento terciário (Yogafanny et al., 2019). Em unidades de produção de petróleo offshore, a filtração é principalmente utilizada para remoção de sólidos solúveis e óleo da AP, utilizando-se uma variedade de materiais como meio filtrante incluindo casca de noz, bolas de fibra, partículas de cerâmicas e areia de quartzo (Liu et al., 2021).

Os tratamentos químicos por oxidação consistem no uso de agentes químicos para oxidação de poluentes orgânicos (óleo e gás) presentes na AP em compostos menos danosos;

por exemplo, CO₂ e H₂O. Normalmente é utilizado o oxigênio puro, ozônio, peróxido de hidrogênio, entre outros, ou uma combinação desses (Olajire, 2020). Tratamentos como floculação e coagulação são utilizados para remover gotículas e colóides de óleo dispersos no efluente, porém, essas técnicas não removem materiais dissolvidos (Nasiri & Jafari, 2016). Dentre as demais técnicas químicas pode se citar: troca iônica, tecnologia de extração de polímero macroporoso, líquidos iônicos à temperatura ambiente, demulsificante (Jiménez et al., 2018).

Existe também o tratamento eletroquímico, que, embora raramente seja utilizado no tratamento de AP, é apontado como um tratamento promissor para tratá-la, tendo em vista vantagens como: baixo custo, tecnologia verde, não faz uso de químicos adicionais e não produz resíduos secundários (Al-Ghouti et al., 2019).

O tratamento biológico tem capacidade remoção de matéria orgânica, nutrientes, metais e traços de contaminantes orgânicos, podendo operar inclusive em condições extremas de temperatura, pH ou salinidade. As técnicas de tratamento biológico incluem: filme fixo, biorreatores de membrana, pântanos e lagoas, tratamento de lodo ativado, tratamento anaeróbio e tratamento bioeletroquímico (Camarillo & Stringfellow, 2018). Nesse método de tratamento os micro-organismos transformam a matéria orgânica presente no efluente em compostos mais simples, gerando uma biomassa para remoção por decantação (Olajire, 2020). Na indústria, o tratamento biológico mais utilizado é lodo ativado, sendo considerado mais confiável e mais eficaz dentre as demais técnicas de tratamento biológico (Kabyl et al., 2020).

A filtração por membranas é um método de tratamento que fraciona e separa seletivamente os componentes de um fluido que passa por uma estrutura porosa (membrana). Este processo se caracteriza pela força aplicada sobre o fluido e pelo tamanho dos poros da membrana (Zolghadr et al., 2021). Os processos de filtração por membrana podem ser classificados de acordo com o diâmetro dos poros: microfiltração (50-500 nm), ultrafiltração (2-50 nm), nanofiltração (0,6-2 nm) e osmose reversa (0,3-0,6 nm). Essa técnica apresenta mecanismo de funcionamento semelhante ao tratamento por filtração simples. Além da filtração, as membranas promovem os processos de adesão e coalescência (Liu et al., 2021). Suas aplicações vão desde dessalinização da água do mar ao tratamento de efluentes de indústrias alimentícia, de couro e petróleo (Dickhout et al., 2017).

A adsorção consiste em um processo em que um meio poroso sólido (adsorvente), de grande área superficial, é submetido à passagem de um soluto (adsorbato) em seu interior, no qual forças de atração atuam na associação dessas duas fases (Yousef et al., 2020). A remoção dos contaminantes ocorre pela transferência de massa do adsorbato para o adsorvente (Carvalho, 2016b). O tratamento de efluentes por adsorção é considerado um dos melhores

métodos devido à sua capacidade de reduzir os teores de contaminantes a valores muito baixos (Al-Ghouti et al., 2019).

Para Yousef et al. (2020) a adsorção é a melhor abordagem para lidar com os grandes volumes gerados de AP, podendo remover de forma mais econômica uma variedade de contaminantes, que opera em baixas concentrações, em menor tempo e menor custo comparando-se com outras metodologias de tratamento. Produtos químicos são dispensáveis neste método de tratamento; no entanto, podem ser necessários na recuperação do adsorvente. Uma variedade de materiais se apresentam como material adsorvente, dentre eles estão as argilas orgânicas, a quitosana e o carvão ativado (Nasiri & Jafari, 2016). O carvão ativado se destaca neste tipo de tratamento, sendo o material mais utilizado por causa de suas características: alta reatividade superficial, alto poder de adsorção, extensa área superficial e estrutura microporosa. Quando utilizado, tem potencial de remover cádmio, mercúrio, matéria orgânica, BTEXs e orgânicos sintéticos (Al-Ghouti et al., 2019).

Devido ao custo elevado do carvão ativado, vários materiais bioadsorventes provenientes de rejeitos agrícolas são estudados com o objetivo de baratear essa técnica. Dentre os materiais estão o bagaço de cana-de-açúcar (Tejada-Tovar et al., 2020), a fibra de coco (Asim et al., 2020), a casca de banana (Santana et al., 2020), casca de palmiste (Baby et al., 2019), casca de amendoim (Abdelfattah et al., 2016) e cinzas de casca de arroz (Farias et al., 2019). Yousef et al. (2020) relataram em recente pesquisa os seguintes materiais bioadsorventes utilizados no tratamento de AP: cova de data ativada, sementes de tâmara, casca de coco, biochar de casca de abacaxi, casca de romã, casca de arroz e biochar da mesma e biochar de palha de trigo.

As cinzas de casca de arroz (CCA) são compostas principalmente por Si e C, apresentando grande área superficial específica, alto grau de porosidade e boas propriedades adsorptivas, se mostrando uma alternativa eficaz na substituição do carvão ativado em processos de adsorção (Liu et al., 2016). A média dos valores de proporções da composição química da CCA citados por Liu et al. (2016) são: SiO₂ (89,7%), Al₂O₃ (0,4%), Fe₂O₃ (0,5%), CaO (0,8%), MgO (0,4%), Na₂O (0,7) e K₂O (2,5%).

Assim como o tratamento, a diluição de água produzida também pode minimizar os efeitos de seus contaminantes no solo e na planta. No trabalho de Costa et al. (2020), não foi observado efeito de contaminação de oito metais pesados no solo irrigado com AP tratada e diluída, cultivado com palma forrageira. Sedlacko et al. (2020), observou que as plantas de trigo e girassol conseguiram completar seus ciclos de vida sendo irrigadas com diluições menores de AP, e não foram identificadas concentrações de metais no solo acima dos limites

estabelecidos. Costa et al. (2019) não observaram efeito de salinização do solo por diluições de AP.

2.3 Legislações voltadas para a disposição final e aproveitamento de água produzida

A AP representa um dos maiores fluxos de água residuária gerados na indústria do petróleo e gás (Dickhout et al., 2017). Além disso, o gerenciamento desses resíduos líquidos é um grande desafio por causa dos potenciais impactos ambientais e dos custos elevados envolvidos (Jiménez et al., 2018). Como alternativa à destinação deste efluente tem-se: i) reinjeção no poço em que o petróleo foi extraído ou mesmo em outros reservatórios; ii) lançamento no ambiente, após tratamento para se enquadrar no padrões estabelecidos pela legislação; iii) reutilização no processo de recuperação de petróleo e gás; iv) ser utilizada na irrigação, na restauração de áreas vegetadas, na produção animal e para abastecimento, recebendo anteriormente o devido tratamento (Crisóstomo et al., 2016).

Em termos de legislação, apenas uma resolução nacional trata diretamente do descarte da AP especificamente, a saber, a resolução CONAMA nº393/2007, que dispõem sobre o descarte contínuo de água de produção em plataformas marítimas. As resoluções CONAMA nº 357/2005 (Brasil, 2005), 430/2011 (Brasil, 2011b), 420/2009 (Brasil, 2009) e a portaria 422/2011 (Brasil, 2011a), tratam da destinação final de efluentes em corpos receptores de maneira geral.

A resolução CONAMA nº393/2007 veta o lançamento de água produzida em um raio inferior a 10 km de unidades de conservação e 5 km de áreas ecologicamente sensíveis. Determina, também, que as empresas responsáveis façam análises semestrais da AP a ser lançada quanto aos seguintes parâmetros: arsênio, bário, cádmio, cromo, cobre, ferro, mercúrio, manganês, níquel, chumbo, vanádio, zinco, rádio-226 e rádio-228, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos - HPA, benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos - BTEX, fenóis, hidrocarbonetos totais de petróleo – HTP (através de perfil cromatográfico), carbono orgânico total - COT, pH, salinidade, temperatura, nitrogênio amoniacal total e teor de óleos graxas (BRASIL, 2007). Destaca-se, ainda, os seguintes artigos desta resolução:

- Art. 4º A água produzida somente poderá ser lançada, direta ou indiretamente, no mar desde que obedeça às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e não acarrete ao mar, no entorno do ponto de lançamento, características diversas da classe de enquadramento para a área definida, com exceção da zona de mistura. Para efeito desta Resolução, a zona de mistura está limitada a um raio de 500 m do ponto de descarte.

- Art. 5º O descarte de água produzida deverá obedecer à concentração média aritmética simples mensal de óleos e graxas de até 29 mgL⁻¹, com valor máximo diário de 42 mg L⁻¹.

§ 1º A indústria petrolífera deverá apresentar ao Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA, no prazo de um ano, proposta de metas de redução do teor de óleos e graxas no descarte de água produzida.

A resolução CONAMA nº 357/2005 (Brasil, 2005), aborda a classificação dos corpos de água, diretrizes ambientais para o enquadramento dos mesmos e estabelece padrões para o lançamento de efluentes. Essa norma teve o capítulo IV, que trata das condições padrões para lançamento em corpos hídricos, revogado pela resolução CONAMA nº 430/2011, que estabelece limites para os atributos dos efluentes a serem lançados em corpos receptores. Os parâmetros e seus respectivos limites são: óleos minerais (até 20 mg L⁻¹), bário (até 5,0 mg L⁻¹), benzeno (até 1,2 mg L⁻¹), estilbenzeno (0,84 mg L⁻¹), fenóis totais (< 0,5 mg L⁻¹), tolueno (< 1,2 mg L⁻¹) e xileno (< 1,6 mg L⁻¹) (Brasil, 2011b). Esses valores podem ser utilizados como parâmetros para a água produzida a respeito de seu lançamento em corpos hídricos.

A resolução CONAMA nº 420/2009, trata sobre valores orientadores da qualidade do solo e águas subterrâneas quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas (Brasil, 2009). A resolução determina que o solo deve ser protegido de maneira preventiva, para garantir sua funcionalidade, ou de maneira corretiva, de forma a restaurar ou recuperar sua qualidade de acordo com seus usos previstos. A Tabela 2 mostra os valores orientadores para lançamento de resíduos no solo ou em água subterrânea. Destaca-se também nesta resolução:

- O Art. 22º, onde o gerenciamento de áreas contaminadas deverá conter procedimentos e ações voltadas ao atendimento dos seguintes objetivos: a) Eliminar o perigo ou reduzir o risco à saúde humana; b) Eliminar ou minimizar os riscos ao meio ambiente; c) Evitar danos aos demais bens a proteger; d) evitar danos ao bem estar público durante a execução de ações para reabilitação; e e) Possibilitar o uso declarado ou futuro da área, observando o planejamento de uso e ocupação do solo.

A Portaria nº 422/2011 aborda os procedimentos para o licenciamento ambiental federal de atividades e empreendimentos de exploração e produção de petróleo e gás natural em ambiente marinho e em zona de transição terra-mar. Foi criada com o objetivo de unificar as regulamentações existentes referentes ao mesmo tema. Essa portaria, também, abrange atividades e empreendimentos realizados com tecnologias similares àquelas utilizadas na exploração petrolífera para fins científicos e de planejamento (Brasil, 2011a).

Pode-se citar, ainda, a chamada Lei do Petróleo, Lei 9478/1997, que dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo (ANP) e dá outras providências. Essa lei estabelece os objetivos da Política Energética Nacional, implanta a ANP (atual Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) como órgão regulador da indústria do petróleo e estabelece as atribuições do Conselho Nacional de Políticas Energéticas (Brasil, 1997).

Tabela 2 – Valores orientadores para solo e águas subterrâneas.

Substâncias	Solo (mg kg ⁻¹ de peso seco)		Água Subterrânea (µg L ⁻¹)	
	Prevenção	Investigação agrícolas	em áreas	Investigação
Inorgânicos				
Alumínio	-	-		3.500
Arsênio	15	35		10
Bário	150	300		700
Boro	-	-		500
Cádmio	1,3	3		5
Chumbo	72	180		10
Cobalto	25	35		70
Cobre	60	200		2.000
Cromo	75	150		50
Ferro	-	-		2.450
Manganês	-	-		400
Merúrio	0,5	12		1
Molibdênio	30	50		70
Níquel	30	70		20
Nitrato (como N)	-	-		10.000
Prata	2	25		50
Selênio	5	-		10
Vanádio	-	-		-
Zinco	300	450		1.050
Hidrocarbonetos aromáticos voláteis				
Benzeno	0,03	0,06		5
Estireno	0,2	15		20
Etilbenzeno	6,2	35		300
Tolueno	0,14	30		700
Xilenos	0,13	25		500
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos				
Antraceno	0,039	-		-
Benzo (a)antraceno	0,025	9		1,75
Benzo (k)fluoranteno	0,38	-		-
Benzo (g,h,i) perileno	0,57	-		-
Benzo (a) pireno	0,052	0,4		0,7
Criseno	8,1	-		-
Dibenzo (a,h) antraceno	0,08	0,15		0,18
Fenantreno	3,3	15		140
Indeno (1,2,3-c,d)	0,031	2		0,17
Naftaleno	0,12	30		140

Fonte: Adaptado de Brasil (2009).

Embora a Lei do Petróleo tenha sofrido diversas alterações em seus dispositivos pela Lei 12.351/2010, sancionada após a descoberta do pré-sal, os deveres do setor de petróleo e gás quanto à proteção do meio ambiente não sofreram alterações (Brasil, 2010).

Nos Estados Unidos (EUA) a Lei Clean Water, estabelece a ilegalidade do descarte de poluentes em águas no país. Para que essa ação seja aceita pela lei as entidades que precisam

realizar o descarte precisam ter uma licença do National Pollutant Discharge Elimination System (Sistema Nacional de Eliminação de Descargas de Poluentes). Essa licença especifica limites aos seguintes parâmetros: condutividade elétrica ($7500 \mu\text{S cm}^{-1}$), sólidos dissolvidos totais, cloro (2000 mg L^{-1}), sulfato (1800 mg L^{-1}), rádio 226 total ($2,22 \text{ Bq L}^{-1}$), óleos e graxas (10 mg L^{-1}) e pH (6,5-9,0) (McLaughlin et al., 2020).

Quanto ao limite de óleos e graxas em áreas para atividade *onshore*, *offshore* e costeira, os limites máximo diário e médio mensal da AP nos Estados Unidos, são respectivamente 42 mg L^{-1} , 29 mg L^{-1} . Esses valores no Canadá são de 80 mg L^{-1} (média de dois dias) e 40 mg L^{-1} (média mensal); e no Reino Unido, 40 mg L^{-1} (média mensal) e 30 mg L^{-1} (média anual) (Kabyl et al., 2020). Outros países estabeleceram limites máximos para o teor de óleos e graxas para descarte no mar: Venezuela e Argentina (15 mg L^{-1}); Nigéria, Angola, Camarões e Costa do Marfim (50 mg L^{-1}); Malásia, países do Oriente Médio, Austrália e países no Mar do Norte (30 mg L^{-1}) (Stewart & Arnold, 2011).

A respeito do reúso de águas residuárias, a resolução CNRH n° 54/2005 estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. Em seu Art. 3° § 2° determina que as diretrizes, critérios e parâmetros específicos para as modalidades de reúso definidos neste artigo serão estabelecidos pelos órgãos competentes (Brasil, 2005).

A resolução CNRH n° 121/2010 estabelece diretrizes e critérios para a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal, definida na Resolução CNRH n° 54, de 28 de novembro de 2005. Em seu Art. 3°, a resolução estabelece que a caracterização e o monitoramento periódico da água de reúso serão realizados de acordo com critérios definidos pelo órgão ou entidade competente, recomendando-se observar: i) a natureza da água de reúso; ii) a tipologia do processo de tratamento; iii) o porte das instalações e vazão tratada; iv) a variabilidade dos insumos; v) as variações nos fluxos envolvidos; e vi) o tipo de cultura.

Em âmbito nacional, a resolução CONAMA n° 503/2021 defini critérios e procedimentos para o reúso em sistemas de fertirrigação de efluentes provenientes da indústria de alimentos, bebidas, laticínios, frigoríficos e graxarias. Essa resolução, em seu Art. 4°, considera o efluente estabilizado de acordo com os seguintes parâmetros e valores limites: pH entre 5 e 9; óleos minerais até 20 mg L^{-1} , óleos vegetais e gorduras animais até 50 mg L^{-1} ; parâmetros e valores máximos estabelecidos pela resolução CONAMA n° 430/2011 Art. 16, II, exceto aqueles de interesse agrônômico, a saber, boro total, cobre dissolvido, ferro dissolvido, manganês dissolvido, nitrogênio amoniacal total e zinco total (Brasil, 2021).

Em âmbito estadual, a resolução COEMA n° 2/2017, dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras e estabelece diretrizes, critérios e parâmetros para o reúso não potável de água de acordo com as modalidades regulamentadas no estado do Ceará (Ceará, 2017). Em seu Art. 39, a resolução estabelece os seguintes parâmetros químicos para o reúso externo de efluentes sanitários e não sanitários para fins agrícolas e florestais: pH entre 6,0 e 8,5, razão de adsorção de sódio até $(15 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1})^{0.5}$ e condutividade elétrica até 3 dS m^{-1} . Também são contemplados para fins de reúso os parâmetros físicos e químicos descritos no Art. 11, a saber: óleos minerais (até 20 mg L^{-1}), ausência de materiais flutuantes, sólidos solúveis totais (até 100 mg L^{-1}), sulfeto (até 1 mg L^{-1}), nitrogênio amoniacal (20 mg L^{-1} , $\text{pH} \leq 8,0$; 5 mg L^{-1} , $\text{pH} > 8,0$), DQO (até 200 mg L^{-1}). Essa norma pode ser adotada para águas residuárias de locais de condições climáticas semelhantes às do estado do Ceará (semiárido).

O Art. 42 da mesma resolução estabelece que o reúso externo de efluentes não sanitários deve obedecer, de acordo com a modalidade de reúso, aos parâmetros estabelecidos nos Arts. 38 a 41, além de: i) parâmetros estabelecidos no Art. 11, não contemplados nos Arts. 38 a 41; ii) valores máximos admissíveis das substâncias constantes no Anexo I, de acordo com a tipologia do empreendimento, constante no Anexo III. Os limites admissíveis constantes no Anexos I da resolução estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros específicos para lançamento de efluentes do Anexo I da resolução COEMA nº2/2017.

Parâmetros inorgânicos	Valores máximos
Alumínio	10 mg Al L ⁻¹
Arsênio Total	0,5 mg As L ⁻¹
Bário	5,0 mg Ba L ⁻¹
Boro	5,0 mg B L ⁻¹
Cádmio	0,2 mg Cd L ⁻¹
Chumbo	0,5 mg Pb L ⁻¹
Cianeto Total	1 mg CN L ⁻¹
Cobre dissolvido	1 mg Cu L ⁻¹
Cromo hexavalente	0,1 mg Cr L ⁻¹
Estanho	4,0 mg Sn L ⁻¹
Ferro solúvel	15,0 mg Fe L ⁻¹
Fenóis	0,5 mg C ₆ H ₅ OH L ⁻¹
Fluoretos	10,0 mg F L ⁻¹
Manganês solúvel	1,0 mg Mn L ⁻¹
Mercúrio	0,01 mg Hg L ⁻¹
Níquel	2,0 mg Ni L ⁻¹
Nitrato	10 mg L ⁻¹
Nitrito	1 mg L ⁻¹
Prata	0,1 mg Ag L ⁻¹
Selênio	0,05 mg Se L ⁻¹
Zinco	5,0 mg Zn L ⁻¹
Parâmetros orgânicos	Valores máximos
Benzeno	1,2 mg L ⁻¹
Clorofórmio	1,0 mg L ⁻¹
Compostos organofosforados	1,0 mg L ⁻¹ em Paration carbamatos totais
Compostos organoclorados não listados	0,05 mg L ⁻¹ acima: (pesticidas, solventes, etc.)
Dicloroetano	1,0 mg L ⁻¹
Estireno	0,07 mg L ⁻¹
Etilbenzeno	0,84 mg L
Fenóis Totais	0,5 mg L ⁻¹ C ₆ H ₅ OH
Tetracloroeto de carbono	1,0 mg L ⁻¹
Tricloroetano	1,0 mg L ⁻¹
Tolueno	1,2 mg L ⁻¹
Xileno	1,6 mg L ⁻¹

Fonte: Ceará (2017).

Os parâmetros específicos para combustíveis derivados de petróleo constantes no Anexo III são: ferro solúvel, cádmio, chumbo, cobre, mercúrio, níquel, zinco, benzeno, estireno, tolueno e xileno.

A resolução CONSEMA 419/2020, estabelece critérios e procedimentos para a utilização de águas de reúso proveniente de efluentes líquidos tratados de origem industrial ou sanitária, para fins urbanos, industriais, agrícolas e florestais, no Estado do Rio Grande do Sul (Rio Grande do Sul, 2020). Na Tabela 4 estão dispostos os parâmetros e seus respectivos valores limites para água de reúso para fins agrícolas e florestais.

Tabela 4 – Parâmetros e seus valores máximos para água de reúso utilizada para fins agrícolas e florestais da resolução CONSEMA 419/2020.

Parâmetros	Padrão de qualidade
pH	Entre 6 e 9
Alumínio	5 mg L ⁻¹
Arsênio	0,1 mg L ⁻¹
Bário	5 mg L ⁻¹
Boro	0,5 mg L ⁻¹
Cádmio	0,01 mg L ⁻¹
Chumbo	0,5 mg L ⁻¹
Cianeto	0,2 mg L ⁻¹
Cloreto	106,5 mg L ⁻¹
Cobalto	0,05 mg L ⁻¹
Cobre	0,2 mg L ⁻¹
Cromo total	0,5 mg L ⁻¹
Cromo hexavalente	0,1 mg L ⁻¹
Ferro	5 mg L ⁻¹
Fluoreto	10 mg L ⁻¹
Manganês	0,2 mg L ⁻¹
Mercurio	0,01 mg L ⁻¹
Molibdênio	0,5 mg L ⁻¹
Níquel	0,2 mg L ⁻¹
Selênio	0,02 mg L ⁻¹
Sulfeto	1 mg L ⁻¹
Vanádio	0,1 mg L ⁻¹
Zinco	2 mg L ⁻¹
Óleos e Graxas: mineral	10 mg L ⁻¹
Óleos e graxas: vegetal ou animal	30 mg L ⁻¹
Fenóis totais (substâncias que reagem com 4-aminoantipirina)	0,1 mg L ⁻¹
Coliformes Termotolerantes	104 NMP 100 mL ⁻¹
Ovos de helmintos	1 Ovo L ⁻¹

Fonte: Rio Grande do Sul (2020).

2.4 Experiências no Brasil e no mundo com cultivos agrícolas fertirrigados com água produzida

Devido aos grandes volumes gerados de AP, pesquisas são realizadas com o objetivo de descobrir quais são os efeitos de seu uso na irrigação agrícola, bem como avaliar tratamentos que porventura sejam utilizadas visando esta prática.

Em experimento realizado em casa de vegetação, em Mossoró, Costa (2018) cultivou girassol irrigado com diluições de AP tratada previamente com polímero floculante, para avaliar os efeitos dessa de diluições dessa água no solo e na planta. A autora observou que os efeitos da AP no solo foram favoráveis quanto à disponibilidade de nutrientes; porém, o considerável conteúdo de sódio e cloro no solo foi destacado devido ao risco de sodificação e

toxicidade as plantas. O girassol não apresentou alterações negativas em suas características biométricas agronômicas.

Crisóstomo et al. (2018) avaliaram a concentração de íons solúveis e trocáveis no solo, e a nutrição e produção de hastes florais do abacaxizeiro ornamental (*Ananas comosus var. bracteus*) irrigado com AP, na região semiárida do Nordeste brasileiro. Os autores utilizaram dois tipos de tratamento para a AP, a saber, filtração (APF) e osmose reversa (APO), e compararam seus efeitos com os efeitos da irrigação utilizando água do aquífero Açu. Ambas as águas tratadas provocaram aumento de teores de sódio, dos valores de pH e condutividade elétrica do solo, sobretudo na camada superficial até 30 cm, de modo que evidenciou-se o risco de salinização do solo. A APF afetou a produção de hastes florais. Já a APO foi considerada tecnicamente viável, visto que a produção de hastes pode ser comparada ao cultivo do abacaxizeiro ornamental irrigado com água de aquífero.

Também utilizado os mesmos tratamentos para a AP, Weber et al. (2017), avaliaram os efeitos da irrigação com AP tratada sob a concentração de alguns nutrientes do solo, nas raízes e partes aéreas no cultivo de girassol ornamental. O experimento foi realizado no estado do Ceará em um Neossolo Quartzarênico. Os autores observaram que a irrigação com AP tratada por filtração modificou a concentração de sais trocáveis no solo, aumentando o sódio em camadas rasas, alterando o crescimento e acúmulo de nutrientes no girassol. Por outro lado, a AP tratada por osmose reversa apresentou menor efeito em nutrientes do solo e não foi capaz de modificar o desempenho agronômico da planta.

Costa et al. (2019) estudaram os efeitos de diluições de AP em água de poço em um argissolo cultivado com palma forrageira, na cidade de Mossoró. Foi observado, através dos resultados, que a irrigação com AP não apresentou risco de salinização do solo, havendo evidências de lixiviação dos íons móveis para as camadas mais profundas do solo, principalmente sódio e magnésio. Os referidos autores, também, constataram que o maior risco de sodificação foi maior no solo irrigado apenas com água subterrânea. Quanto a taxa máxima de potencial da cultura, os autores argumentam que esta pode não ter sido afetada por causa da baixa capacidade de troca catiônica do solo e devido ao pH ter sido mais adequado ao desenvolvimento da cultura.

Na mesma localidade e utilizando a mesma cultura Costa et al. (2020) avaliaram as alterações das concentrações de metais pesados também em um argissolo irrigado com diluições de AP tratada, em experimento conduzido em vasos. Foram analisados os metais Fe, Mn, Cu, Zn, Cr, Ni, Cd, e Pb. O solo não foi contaminado pelos metais analisados, sendo que a diluição com 25% de AP apresentou menor concentração desses metais no solo. Os autores

observaram que houve aumento significativo de Cr e Pb no solo, e por isso, recomendaram que a AP tratada não deve ser utilizada de forma contínua em uma mesma área.

Em trabalho realizado por Pica et al. (2017), foram analisadas as respostas de duas culturas oleaginosas, *Panicum virgatum* e *Brassica napus*, cultivadas em estufa e irrigadas com AP, variando a concentração de carbono orgânico total (COT) e sólidos dissolvidos totais (SDT). A pesquisa foi realizada no estado do Colorado - EUA. As plantas irrigadas com água de irrigação com maior salinidade e COT apresentaram características fisiológicas e de crescimento significativamente mais baixas em ambas as espécies de cultivo. Foi observado que a concentração de COT na AP impactou negativamente a produção de biomassa e na fisiologia de ambas as espécies.

Também no estado do Colorado, Miller et al. (2020), irrigaram trigo com AP minimamente tratada com o objetivo de investigar os efeitos no solo, em sua microbiota e na planta. Os resultados indicaram que a AP minimamente tratada reduziu a qualidade geral do solo, da produtividade do trigo e da microbiota do solo. Na mesma localidade, Sedlacko et al. (2019), também cultivaram trigo em casa de vegetação, porém, utilizando diluições de maiores proporções de AP. Os autores obtiveram conclusões semelhantes, destacando que houve interrupções no desenvolvimento das plantas e redução da biomassa, tanto na parte aérea quanto nas raízes. Os pesquisadores argumentaram que o estresse salino pode não ser a principal causa de danos à cultura.

Em estudo realizado no Catar, em casa de vegetação, Atia et al. (2019) estudaram o comportamento dos vegetais *Medicago sativa*, *Zea mays*, *Helianthus annuus*, *Sorghum bicolor*, *Phragmites australis* e *Caroxylon imbricatum* face a utilização de AP na irrigação desses cultivos. Os autores observaram que, salvo *M. sativa*, todas as outras plantas não sobreviveram. Porém, *Caroxylon imbricatum* tolerou até 20% de diluição de AP sem apresentar nenhuma alteração em suas características morfológicas.

Sedlacko et al. (2020), no Corado (EUA), irrigaram trigo e girassol com diluições de AP bruta, diluições de AP tratada por filtração biológica (remoção de salinidade), seguida ultrafiltração (remoção químicos orgânicos hidrofóbicos), e AP tratada por eletrodialise após receber os tratamentos anteriores, porém não diluída. As APs tratadas diminuíram os efeitos negativos na planta, de modo que as culturas conseguiram completar seus ciclos de vida, enquanto AP diluída causou maiores efeitos na fitossanidade das culturas. Nas plantas irrigadas com diluições maiores que 50% de AP bruta ou tratada, foi observado crescimento atrofiado, altura e área foliar reduzida, e perda total no rendimento das sementes de girassol.

2.5 A cultura do girassol

O girassol (*Helianthus annuus* L.) é uma das oleaginosas mais importantes do mundo, cuja produção é realizada em pelo menos em cinco continentes. É originária da porção norte da América, sendo uma dicotiledônea anual, da família Asteraceae (Sousa et al., 2012). O girassol é uma cultura anual que, além de seus usos mais comuns (alimentação animal e produção de óleo comestível) pode ser utilizada na obtenção de óleo para produção de biodiesel (Araújo et al., 2018). Embora seja uma cultura de regiões de clima tropical e subtropical, apresenta razoável tolerância à seca, mas nas fases de floração até o enchimento dos aquênios é sensível tanto ao déficit hídrico quanto estresse térmico (Hussain, 2018).

A produção girassol mundial de girassol na temporada 2018/19 ficou em torno de 50 milhões de toneladas e área cultivada aproximadamente de 25 milhões de hectares (Pilorgé, 2020). No Brasil, segundo dados da CONAB (2021), a área de plantio, a produtividade e produção do girassol na safra 2019/20 foram respectivamente: 47,1 mil ha, 1590 kg/ha e 74,9 mil toneladas.

A cultivar de girassol Hélio 251 (H-251), mostrou ser menos susceptível ao déficit hídrico quando cultivada em região de clima semiárido, inclusive com alta eficiência fotossintética (Carvalho et al., 2020); destacando-se também por sua alta produtividade de grãos em ambientes em que há escassez hídrica (Carvalho et al., 2016a). A faixa de percentagem de óleo dessa variedade é 40 a 44% (Regitano Neto et al., 2016).

Em geral, o girassol é muito exigente em boro (B), de forma que seus níveis ótimos são no solo são relativamente mais elevados se comparados com os de outras culturas (Feitosa et al., 2013). Cunha et al. (2021) reitera a alta responsividade do girassol a aplicação de boro, de modo que a produtividade da planta é elevada a partir de doses maiores que 1 kg ha⁻¹ deste elemento. Em contrapartida, sua deficiência pode promover diversos distúrbios fisiológicos.

Outro nutriente de suma importância no cultivo do girassol é o potássio (K), já que este exerce influência direta na regulação osmótica e exercer papel fundamental na manutenção das células guarda dos estômatos. Comprovadamente o aumento da adubação potássica promove o aumento da produtividade e de propriedade vegetativas dessa cultura (Soares et al., 2015). Santos et al. (2020), em recente estudo, verificaram influência da adubação potássica na diagnose foliar de K, peso de mil aquênios, rendimento de aquênios, teor de óleo e rendimento de óleo, promovendo melhor desempenho das cultivares de girassol avaliadas.

Feitosa et al. (2013), avaliaram a altura da planta, a área foliar, a massa seca da parte aérea e a produtividade do girassol adubado com diferentes doses de potássio e boro. Os

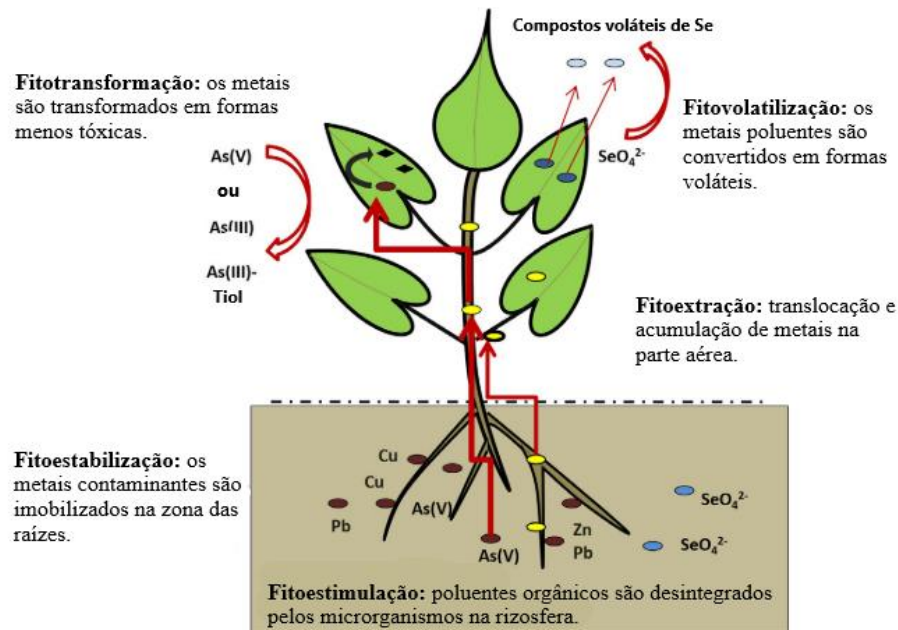
autores observaram que todas as características estudadas foram influenciadas pelas doses de B e K, convergindo para a máxima produtividade do girassol (4170 kg ha^{-1}) quando foram utilizadas as doses de 6 kg ha^{-1} e 90 kg ha^{-1} de B e K, respectivamente, sendo constatado o decréscimo dessas características com doses menores que as supracitadas.

Em se tratando do pH do solo para o desenvolvimento das plantas, os valores ótimos variam de 6,0 a 6,5, intervalo no qual ocorre a disponibilidade dos micronutrientes (Malavolta et al., 1997). Para o girassol nível ótimo está entre de 5,0 até 7,0 de acordo com Sutradhar et al. (2014).

2.6 Conceito e principais processos de fitorremediação

Conceitualmente a fitorremediação é a utilização de espécies vegetais e micro-organismos associados as mesmas para fins tratamento do solo, água ou ar contaminados (Andrade et al., 2007). Essa biotecnologia é amplamente recomendada devida à vantagens como: a) Baixo custo, por utilizar energia solar; b) Eficácia de baixo risco ambiental, por que atua na camada acima da superfície do solo ou água; c) Tem potencial para remover diversos contaminantes, e; d) É considerada uma técnica ambientalmente adequada (Atia et al., 2019).

Porém, essa técnica apresenta alguns fatores limitantes para sua utilização, são eles: velocidade lenta de crescimento das plantas, diminuição da biomassa e sensibilidade das plantas a metais pesados. Concentrações distintas desses elementos causam fitotoxicidade, influenciando na fitorremediação (Shah & Daverey, 2020). A fitorremediação se subdivide nos seguintes processos: fitoestabilização, fitoestimulação, fitoextração, fitotransformação e fitovolatilização (Mahmood-ul-Hassan, 2017; Ashraf, 2019). Na Figura 1 estão ilustrados como ocorrem esses processos.



Fonte: Adaptado de Shah & Daverey (2020).

Figura 1 – Esquema dos processos de fitorremediação.

A fitoestimulação ou rizodegradação consiste na desintegração de poluentes orgânicos realizada pela alta atividade microbiana na rizosfera (região circunvizinha das raízes, cerca de 1 mm de espessura). Diferentes fatores podem aumentar essa atividade: aminoácidos e carboidratos produzidos pelas raízes; fornecimento de oxigênio pelas raízes que ocorram os processos aeróbios; disponibilidade de carbono orgânico fornecido pela biomassa das raízes; fungos micorrizas que degradam compostos que não podem ser degradados por bactérias; e plantas que fornecem habitat para uma grande população de bactérias (Ashraf et al., 2019).

Na fitovolatilização, após serem absorvidos, os metais são transformados em compostos voláteis, e posteriormente, são liberados para atmosfera através dos estômatos. Já a fitotransformação, consiste na transformação dos metais ou metaloides absorvidos em formas menos tóxicas (Shah & Daverey, 2020).

Na fitoextração as plantas absorvem os metais pesados juntamente com a água e os nutrientes através de suas raízes. Posteriormente, esses metais são translocados, precipitados e acumulados nas partes aéreas da planta (Suman, 2018; Silva et al, 2021; Sierra et al., 2021). As plantas utilizadas nesse método devem ter as seguintes propriedades: tolerância à presença de metais em níveis tóxicos, alta produção de biomassa e acumulação de metais nas partes colhidas (Suman et al., 2018). Na Tabela 5 estão apresentadas plantas com potencial de fitoextração e suas respectivas vantagens e desvantagens.

Tabela 5 – Plantas com potencial de fitoextração e as vantagens e desvantagens de sua utilização.

Plantas	Vantagens	Desvantagens
Ricinus communis L. Helianthus annuus L. <i>Puccinellia frigida</i> (Phil.) I. M. Johnst Pisum sativum L.	Alta produção de biomassa vegetal, mecanismo de remediação de baixo custo; conservar ecossistema; adequado para laboratórios e estudo de campo.	A taxa de absorção do metal pelas raízes é menor, mecanismo lento, a biodisponibilidade do metal na rizosfera é menor.

Fonte: Adaptado de Shikha & Singh (2021).

A fitoextração é geralmente estimada através dos fatores de translocação e bioacumulação. O fator de translocação (FT) é definido como a razão entre a concentração do metal nas partes aéreas e a concentração do mesmo na raiz, representa a capacidade do vegetal de translocar o metal das raízes para os brotos e folhas. O fator de bioacumulação (FB) consiste no quociente da concentração de metal na parte aérea da planta pela concentração do metal no solo, e compreende o processo em que os metais se acumulam em diversas partes das plantas (Saravanan et al., 2019). A Tabela 6 apresentam-se esses fatores e suas possíveis interpretações de acordo com os valores calculados.

Tabela 6 – Fatores de translocação (FT) e Bioacumulação (FB), e suas possíveis interpretações.

Fator	Operador/ valor de referência	Classificação referente a planta
FT	>1	Translocação eficaz da raiz para as partes aéreas.
	<1	Translocação ineficaz da raiz para as partes aéreas
		Capacidade de acumulação do elemento
FB	>1	Biacumuladora
	=1	Indicadora
	<1	Exclusora

Fonte: Adaptado de Saravanan et al. (2019).

Outra forma de estimar a fitoextração é através do fator de bioconcentração ou razão de fitoextração (RF), definido como a razão entre a absorção total do metal pela planta, incluindo pelas raízes, e o conteúdo total de metal no solo (Mahmood-ul-Hassan et al., 2017; Sajad et al., 2019).

O girassol tem característica de ser tolerante a metais pesados (Alaboudi et al., 2018); alta produção de biomassa e alta capacidade de acumular metais pesados (Zhao et al., 2019). Nesse sentido, pesquisas foram realizadas com o girassol, comprovando sua capacidade de bioacumulação de chumbo (Zehra et al., 2020), cádmio (Benavides et al., 2021), manganês, zinco, cromo, níquel e chumbo (Costa, 2018), cádmio e chumbo (Alaboudi et al., 2018) e cádmio, mercúrio, níquel, chumbo e zinco (Zhao et al., 2019).

2.7 Mecanismos de adsorção e absorção de elementos químicos no sistema radicular de plantas

O fenômeno de adsorção consiste na acumulação de íons ou moléculas em superfícies sólidas por meio de interações físicas e químicas. Trata-se de um fenômeno de transferência de massa, em que uma superfície de um sólido retém, de forma a concentrar determinadas substâncias presentes em solução (líquida ou gasosa) (Finkler et al., 2018).

Para passar da solução do solo para as células da raiz, um soluto precisa atravessar regiões com diferentes resistências. Primeiramente, o soluto atravessa facilmente, por difusão, um filme de água imóvel aderido ao exterior da parede celular dos pelos das raízes e outras regiões de absorventes de água; e, em seguida, passam pela parede celular (Bhatla, 2018). Cargas negativas são fixadas na parede celular pelo processo desprotonação e protonação dos grupos funcionais presentes em sua superfícies ($-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$ e $-\text{H}_2\text{PO}_4^-$) (Liu et al., 2016). Essas cargas negativas são chamadas de sítios de adsorção catiônica. Os cátions presentes na solução do solo, dependendo de sua carga, têm diferentes afinidades para locais de adsorção catiônica (Bhatla, 2018). No entanto, os pelos radiculares e raízes jovens são revestidos externamente por uma camada de mucigel, um polissacarídeo carregado negativamente, que contribui para essa propriedade eletroquímica das superfícies das raízes (Liu et al., 2016).

A eficiência de absorção de água e nutrientes pelas raízes depende de sua anatomia, extensão, idade, superfície total e da permeabilidade dessa superfície (Glinski & Lipiec, 2018). O transporte de íons através da raiz obedece às mesmas leis biofísicas que governam o transporte celular. O deslocamento de moléculas por difusão ocorre de maneira espontânea na direção de um gradiente de energia livre ou potencial químico, até que seja atingido um estado de equilíbrio. Esse movimento de solutos é denominado transporte passivo. Quando esse deslocamento ocorre em direção oposta ao gradiente de energia é denominado transporte ativo e necessita de realização trabalho pela liberação de energia celular. Quando há separação das soluções por uma membrana biológica a difusão é dificultada, e passa a depender da permeabilidade da mesma, que, por sua vez, depende de sua composição e da natureza química do soluto (Taiz et al., 2021).

A membrana plasmática que envolve as células vegetais permite a passagem de solutos carregados e moléculas polares de maneira indireta (Bhatla, 2018). Esse transporte de soluto é realizado por proteínas presentes nas membranas biológicas, denominadas transportadoras, que promovem a passagem desses íons e moléculas de maneira mais fácil e

seletiva. Essas proteínas são classificadas em três tipos: canais, carregadores e bombas (Colodete, 2013).

Proteínas canais são como poros seletivos pelos quais, principalmente, íons se difundem através da membrana. O transporte das moléculas ocorre por meio de difusão simples, ou seja, transporte passivo. A seletividade de transporte de íons depende da característica do canal, incluindo: tamanho, densidade e natureza das cargas de sua superfície interna (Taiz et al., 2021).

As proteínas do tipo bomba realizam o transporte ativo primário, acoplando o movimento do soluto com a hidrólise de ATP ou pirofosfato, que fornece a energia necessária para vencer o gradiente de concentração (Bhatla, 2018).

As proteínas carregadoras medeiam tanto o transporte passivo (neste caso, difusão facilitada) quanto o ativo secundário. Compostos inorgânicos ou orgânicos se ligam a um sítio específico dessa proteína, fazendo com que ocorra uma conformação na mesma, provocando assim, a exposição da molécula transporta à solução posterior a membrana (Taiz et al., 2021).

O transporte ativo secundário utiliza a energia livre proveniente da H^+ -ATPase, que é representada pelo gradiente de H^+ , criado exatamente pela sua liberação (ação das proteínas do tipo bomba). Essa energia impulsiona várias substâncias contras seus potenciais eletroquímicos (Colodete, 2013).

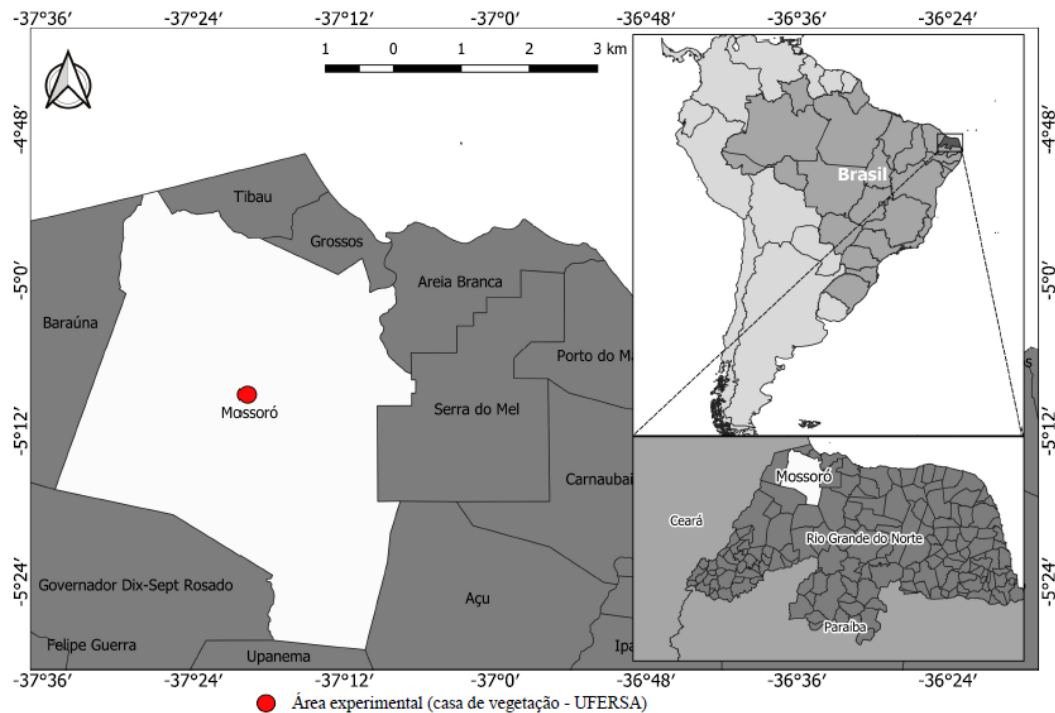
O transporte da solução do solo para dentro das raízes da maioria dos nutrientes (K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , N, P, entre outros) depende da H^+ -ATPase da membrana plasmática (Zhang et al, 2018), por tanto, realizado pelas bombas ou proteínas carregadoras.

A absorção de metais pesados é mediada por moléculas envolvidas no transporte realizado pelas proteínas transportadoras da membrana plasmática das células das raízes (Ferreira et al., 2018). Os cátions metálicos não essenciais às plantas, cádmio e chumbo por exemplo, são transportados por algumas proteínas transportadores de íons metálicos, o que beneficia os processos de fitorremediação (Taiz et al., 2021).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização, caracterização da área experimental e classificação climática

O presente trabalho foi realizado em uma das casas de vegetação localizada no campus Oeste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), em Mossoró-RN localizada nas coordenadas geográficas $5^{\circ}12'11,25''$ S e $37^{\circ}19'25,77''$ O, na altitude de 13 m (Figura 2).



Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 2 – Localização da área experimental.

A estrutura da casa de vegetação é de aço galvanizado, tendo as paredes laterais e frontais confeccionadas com tela antiafídeos (50% de sombreamento). A cobertura é na forma de arco tipo túnel, medindo 7,0 m de largura e 21,0 m de comprimento e pé direito de 3,0 m, coberta com manta de polietileno de baixa densidade, transparente, com 0,10 mm de espessura e proteção ultravioleta.

Para fins de caracterização inicial do solo, amostras do mesmo foram coletados das unidades experimentais (vasos) nas profundidades 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m. No Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP) – UFERSA, foram realizadas as análises físicas e químicas do solo utilizando-se a metodologia de Teixeira et al. (2017). O solo utilizado nos vasos foi classificado como Argilosolo Vermelho distrófico Típico (Santos et al., 2018), sendo proveniente da Fazenda Experimental Rafael Fernandes, localizada na

comunidade de Alagoinha em Mossoró-RN. Os resultados das análises químicas e físicas do solo constam nas Tabela 7 e Tabela 8, respectivamente.

Tabela 7 – Características químicas iniciais do Argiloso Vermelho distrófico Típico empregando-se a metodologia de Teixeira et al. (2017).

Prof.(m)	pH	CE _{es} dS m ⁻¹	MOg kg ⁻¹	Nmg dm ⁻³	Pmg dm ⁻³	K ⁺mg dm ⁻³	Na ⁺mg dm ⁻³	Ca ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺mg dm ⁻³	Femg dm ⁻³	Mnmg dm ⁻³	Znmg dm ⁻³	Cumg dm ⁻³
0 a 0,10	6,1	0,41	3,31	0,35	1,9	26,9	4,7	1,1	0,7	1,56	0,56	0,2	0,01
0,10 a 0,20	4,8	0,03	2,07	0,21	1,7	26,9	4,7	0,4	1	1,95	0,55	0,2	0,02
Prof.(m)	Al ³⁺cmol _c dm ⁻³	H+Al	SB	t	CTC	V	m	PST					
0 a 0,10	0	1,49	1,89	1,89	3,37	56	0	1					
0,10 a 0,20	0,15	1,97	1,49	1,64	3,47	43	9	1					

Fonte: Costa (2018).

Nota: pH em água (relação 1:2,5); CE_{es} - Condutividade elétrica do solo na relação 1:2,5; MO - Matéria orgânica, pelo método Walkley-Black; P - Fósforo disponível, K⁺ - Potássio trocável e Na⁺ - Sódio trocável, extraídos com Melich; Ca²⁺ - Cálcio trocável, Mg²⁺ - Magnésio trocável e Al³⁺ - Alumínio trocável, extraídos com KCl 1 mol L⁻¹; Fe - Ferro, Mn - Manganês; Cu - Cobre; Zn - Zinco; Ni - Níquel, Pb - Chumbo e Cd - cádmio (Cd), extraídos com Mehlich e medidas por espectrofotometria de absorção atômica; H+Al - Acidez potencial, Método Ca(OAc)₂ 0,5 mol L⁻¹; SB - Soma de bases; t - Capacidade efetiva de troca de cátions; CTC - Capacidade de troca de cátions a pH 7; V - Saturação por base; m - Saturação por alumínio; e PST - Percentagem de sódio trocável.

Tabela 8 – Características físicas iniciais do Argiloso Vermelho distrófico Típico empregando-se a metodologia de Teixeira et al. (2017).

Prof.(m)	ρ _s g cm ⁻³	ρ _p g cm ⁻³	Areia kg kg ⁻¹	Silte	Argila	Classe textural	Relação silte/argila
0 a 0,10	1,78	2,78	0,90	0,03	0,07	Areia	0,44
0,10 a 0,20	1,72	2,70	0,84	0,03	0,13	Areia Franca	0,24

Fonte: Costa (2018).

Nota: ρ_s - Massa específica do solo pelo método do anel volumétrico; ρ_p - Massa específica de partículas do solo pelo método do balão volumétrico; e areia, silte e argila obtidas pelo método da pipeta.

Pela classificação de Köppen, o clima da região é do tipo BSh (clima seco, muito quente e com estação chuvosa no verão atrasando-se para o outono), precipitação pluviométrica anual de 794 mm e bastante irregular, temperatura e umidade relativa médias de 26,5°C e 68,9 %, respectivamente (Alvares et al., 2013).

3.2 Origem e tratamento da água produzida e origem da água de diluição

O volume de água de produção de petróleo utilizado nos testes experimentais foi doado por uma empresa produtora de petróleo atuante na Bacia Potiguar. Esta água coletada foi tratada por meio de floculação, utilizando-se o polímero orgânico AGEFLOC DW-3753 como agente floculante, antes de ser utilizada na fertirrigação do girassol. Neste procedimento

foi utilizado 40 mL do floculante para cada 1000 L de água, sendo estes misturados e deixados em repouso durante 48 h, para segregação das fases: material suspensos, água e óleo, conforme as recomendações de Costa (2018) e Costa et al. (2020).

Para as diluições de água produzida pós-tratada foi utilizada água de abastecimento proveniente de poço gerenciado pela Companhia de Águas e Esgoto do Rio Grande do Norte. Nos 16 poços profundos ativos da CAERN que retiram água do Aquífero Açú, as vazões oscilam de 38 a 250 m³ h⁻¹, e profundidades entre 897,0 e 1071,0 m (Oliveira Junior, 2016).

3.3 Instalação e condução do experimento

3.3.1 Delineamento, tratamentos e parcelas experimentais

Em relação às características produtivas, morfológicas, nutricionais e fitoextortoras, o experimento foi montado no delineamento em blocos casualizados (DBC), com cinco tratamentos e cinco repetições. Entretanto, para as características químicas do solo o experimento também foi montado no delineamento em blocos casualizados, porém no esquema fatorial 5x2, sendo cinco diluições de APT (0, 25, 50, 75 e 100%) e duas profundidades do solo (0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m), totalizando 50 unidades experimentais. Os tratamentos seguiram a recomendação de diluição da água produzida tratada proposta por Costa (2018), visando à mitigação da redução da capacidade de infiltração de água no solo, em função da dispersão das argilas.

Os tratamentos foram representados pela nomenclatura e respectivas proporções de água produzida tratada (APT) e água subterrânea (AS) apresentadas na Tabela 9. Foram utilizados baldes graduados para a realização das diluições, sendo estas posteriormente encaminhadas aos reservatórios utilizados no sistema de irrigação.

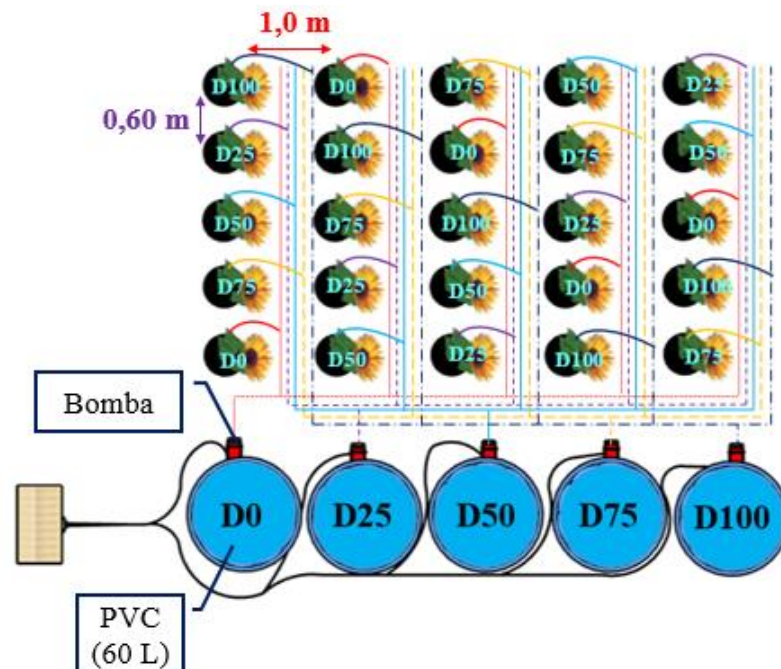
Tabela 9 – Proporções de diluição de água produzida tratada (APT) em água subterrânea (AS).

Nomenclatura	Proporção de APT (%)	Proporção de AS (%)
D0 (controle)	0	100
D25	25	75
D50	50	50
D75	75	25
D100	100	0

Fonte: Próprio Autor (2022).

Foi utilizado no experimento um sistema de irrigação localizada (Figura 3) composto pelos seguintes itens: cinco reservatórios de PVC com capacidade de 60 L; cinco eletrobombas de circulação Metalcorte/Eberle, autonivelada, modelo EBD250076; linhas

laterais de 16 mm, para condução das diluições de água produzida aos vasos; e, emissores microtubos de vazão média de $1,5 \text{ L h}^{-1}$, inseridos nas linhas laterais.



Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 3 – Layout do experimento.

3.3.2 Implantação do experimento

A cultura utilizada neste trabalho foi o girassol (*Heliantus annus*), cultivar H-251 da Embrapa Semiárido. O espaçamento utilizado foi de 1,0 m entre fileiras de plantas, e 0,60 m entre plantas, tendo bordadura ao redor das parcelas experimentais. As parcelas experimentais receberam como adubação de fundação aplicações únicas de ureia, cloreto de potássio e ácido bórico conforme recomendado por Ribeiro et al. (1999), bem como controle químico contra pragas e patologias.

Inicialmente, mudas de girassol foram semeadas em bandejas de polietileno de 200 células. Como preenchimento foi utilizado o substrato comercial GOLDEN MIX, conforme recomendado por Costa (2018). Passados 12 dias da semeadura, foi realizado o transplântio das mudas de girassol para o local do experimento.

No trasplântio foram utilizados 25 vasos de material plástico de 32 L, estes foram preenchidos com 0,8 kg de brita (n° zero) em sua base, e 1,0 kg de areia lavada e 21 kg de solo representativo do semiárido potiguar, classificado como Argissolo Vermelho Distrófico Típico oriundo da Fazenda Experimental Rafael Fernandes.

O experimento foi realizado do dia 14 de setembro de 2017 ao dia 08 de dezembro do mesmo ano, tendo seu início após o transplântio das mudas para os vãos. Inicialmente nos

primeiros 20 dias de experimento, as plantas foram irrigadas com água de abastecimento (AS) para garantir o pegamento das mudas. Após esse período inicial, todas as plantas foram irrigadas criteriosamente com diferentes proporções de água de produzida tratada (APT) + água subterrânea (AS).

3.3.3 Manejo da fertirrigação

A lâmina bruta de irrigação para a cultura (ET_c) do girassol foi determinada através do coeficiente de cultivo (K_c) sobre a evapotranspiração de referência (ET_0). Para tanto foi utilizada a equação 1, proposta por Allen et al. (2006).

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (1)$$

Em que:

ET_c - evapotranspiração da cultura, em $mm\ d^{-1}$;

ET_0 - evapotranspiração de referência, em $mm\ d^{-1}$; e

K_c - coeficiente de cultura, adimensional.

A evapotranspiração de referência (Et_0) foi determinada por meio da equação de Penman-Monteith (Allen et al., 2006) conforme a equação 2.

$$Et_0 = \frac{0,408 \Delta (Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (2)$$

Em que:

Et_0 - evapotranspiração de referência, em $mm\ d^{-1}$;

Rn - saldo de radiação à superfície, em $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$;

G - fluxo de calor no solo, em $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$;

T - temperatura do ar a 2 m de altura, em $^{\circ}C$;

U_2 - velocidade do vento à altura de 2 m, em $m\ s^{-1}$;

e_s - pressão de saturação de vapor, em kPa;

e_a - pressão de vapor atual do ar, em kPa;

$(e_s - e_a)$ - déficit de pressão de vapor, em kPa;

Δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação, em $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$; e

γ - constante psicrométrica, em $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$.

Para estimar ET_0 foram utilizados os dados meteorológicos da estação meteorológica localizada dentro da casa de vegetação. Os dados obtidos foram: temperatura do ar,

velocidade do vento, umidade relativa do ar, insolação e radiação solar. Os valores de Kc adotados nas fases I, II, III e IV do desenvolvimento do girassol foram de 0,52, 0,70, 0,98 e 0,81, respectivamente, conforme propostos por Cavalcante Júnior (2011).

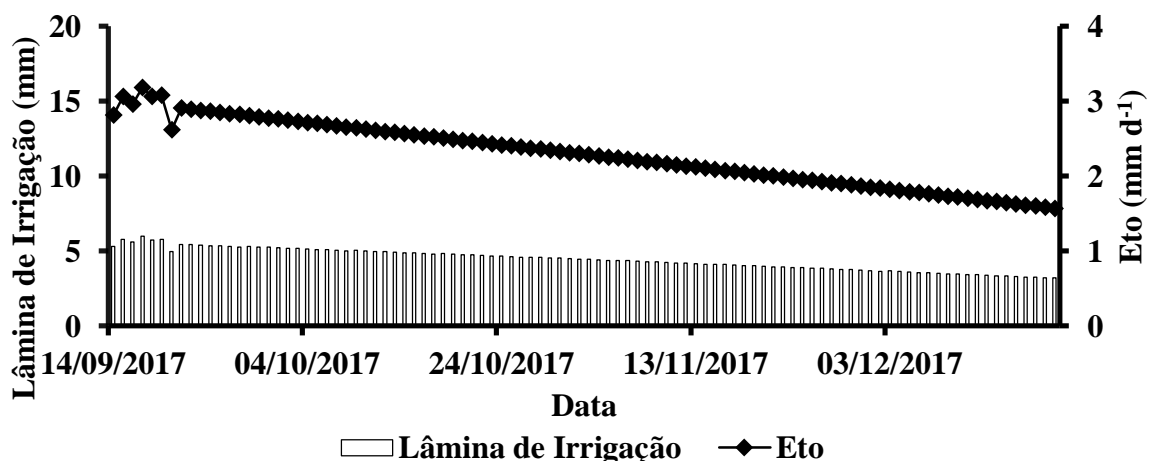
A lâmina bruta aplicada os 90 dias de experimento foi de 435,35 mm, para cada diluição de água produzida tratada (APT) em água subterrânea (AS), proveniente do Aquífero Açu. A Tabela 10 mostra as lâminas brutas de APT e AS utilizadas durante todo o período de realização do experimento.

Tabela 10 – Lâminas brutas acumuladas no período de 90 (DAT) dias de aplicação de água produzida tratada (APT) e água de subterrânea (AS).

Lâminas	Tratamentos				
	D0	D25	D50	D75	D100
APT (mm)	0	108,84	217,67	326,51	435,35
AS (mm)	435,35	326,51	217,67	108,84	0
Total (mm)	435,35	435,35	435,35	435,35	435,35

Fonte: Próprio Autor (2022).

A Figura 4 mostra o comportamento da E_{t0} e da lâmina de irrigação durante os 90 dias do experimento. Observa-se comportamentos iguais para as duas variáveis, porém, com magnitudes proporcionalmente diferentes. Ambas as variáveis apresentaram ligeira variação nos primeiros dias, e decrescimento até o fim do plantio. Devido o experimento ter sido conduzido em estufa, os valores de E_{t0} são reduzidos quando comparados a valores normalmente ocorridos em ambientes abertos nas mesmas condições climáticas.

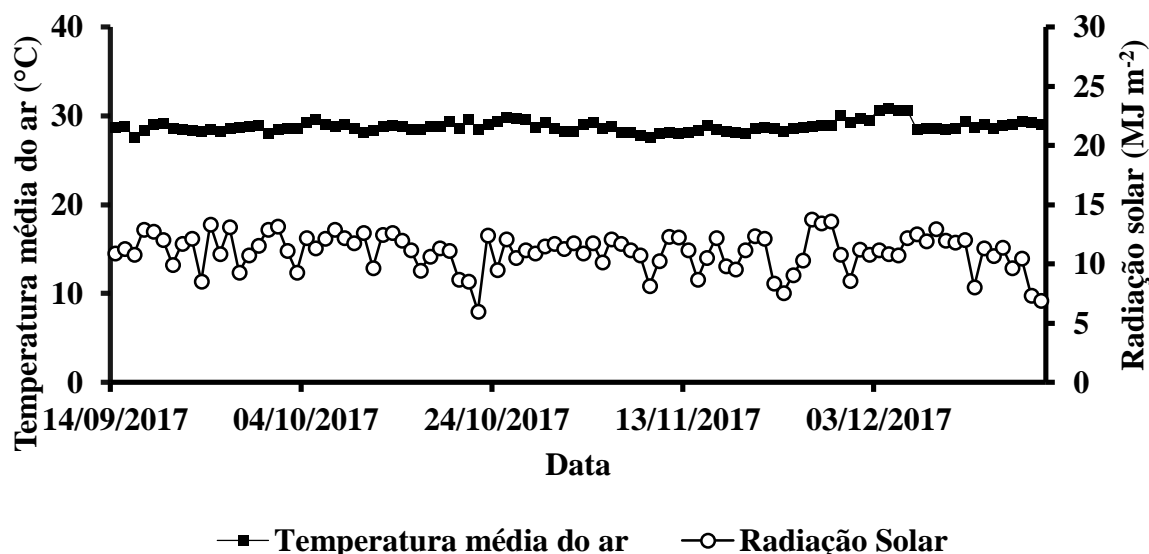


Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 4 – E_{t0} e lâmina de irrigação durante os 90 DAT.

Na Figura 5 apresentam-se os comportamentos da temperatura média do ar e da radiação solar durante o período experimental. A temperatura média do ar mostrou

comportamento pouco variado em torno dos 30°C durante todo o período experimental. Já a radiação solar mostrou variabilidade entre 5 e 15 MJ m².



Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 5 – Comportamento temperatura média do ar e da radiação solar durante os 90 DAT.

3.4 Caracterização das diluições de água produzida em água de poço

No período de setembro a dezembro de 2017 foram efetuadas três coletas de amostras das diluições D0, D25, D50, D75 e D100. As amostras coletadas foram armazenadas em recipientes plásticos de 100 mL e posteriormente preservadas em caixa isotérmica, contendo gelo para manter a temperatura entre 4 e 6°C e com isso minimizar alterações químicas nas mesmas. As análises físico-químicas das amostras das diluições foram realizadas no Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP) da UFRSA e compreenderam as seguintes características: potencial hidrogeniônico (pH); condutividade elétrica (CE); cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), cloreto (Cl⁻), carbonato (CO₃⁻²) e bicarbonato (HCO₃⁻) expressos em mmol_c L⁻¹; sódio (Na⁺) e potássio (K⁺) expressos em mmol_c L⁻¹; cobre (Cu), zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn), níquel (Ni), cádmio (Cd) e chumbo (Pb) expressos em mg L⁻¹. Todos os processos de amostragem, armazenamento, preservação, transporte e análises físico-químicas das amostras das diluições seguiram as recomendações técnicas tanto da EMBRAPA (Silva, 2009) quanto do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Baird et al., 2017). Os procedimentos metodológicos utilizados nessas análises estão descritos no Apêndice A.

Na Tabela 11 estão apresentados os valores médios das características físico-químicas das diluições de água produzida tratada.

Tabela 11 – Valores médios da características físico-químicas das diluições da água produzida tratada.

Característica	Unidade	Diluições				
		D0	D25	D50	D75	D100
pH		8,60	8,73	8,64	8,46	8,56
CE	dS m ⁻¹	0,56	0,66	0,66	0,70	0,71
Ca ²⁺	mmol _c L ⁻¹	1,39	1,40	1,20	1,00	2,00
Mg ²⁺	mmol _c L ⁻¹	0,11	0,60	0,80	0,70	0,50
Na ⁺	mmol _c L ⁻¹	2,30	3,80	3,30	3,00	4,00
RAS	(mmol _c L ⁻¹) ^{0,5}	2,65	3,80	3,30	3,20	3,60
K ⁺	mmol _c L ⁻¹	0,30	0,30	0,40	0,40	0,50
Cl ⁻	mmol _c L ⁻¹	2,40	4,00	5,00	3,00	3,00
CO ₃ ⁻	mmol _c L ⁻¹	0,50	0,60	0,70	0,70	0,60
HCO ₃ ²⁻	mmol _c L ⁻¹	2,00	3,50	4,00	3,00	4,00
Cu	mg L ⁻¹	0,070	0,080	0,090	0,075	0,085
Zn	mg L ⁻¹	0,027	0,024	0,028	0,019	0,054
Mn	mg L ⁻¹	0,007	0,008	0,013	0,012	0,069
Fe	mg L ⁻¹	0,008	0,035	0,018	0,022	0,038
Ni	mg L ⁻¹	0,011	0,017	0,009	0,014	0,007
Cd	mg L ⁻¹	0,006	0,013	0,008	0,008	0,012
Pb	mg L ⁻¹	0,11	0,13	0,28	0,24	0,13

Fonte: Adaptado de Costa (2018).

3.5 Características analisadas

3.5.1 Análise do solo após irrigação com água produzida tratada

Após a colheita do girassol, amostragens para análises químicas do solo pós irrigação com as diluições de água produzida tratada foram realizadas nos vasos utilizando-se trado holandês, nas camadas 0,0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m. Todas as amostras foram encaminhadas para o LASAP/UFERSA. Seguindo as recomendações de Teixeira et al. (2017), as seguintes análises foram realizadas: potencial de hidrogênio (pH), condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), potássio (K⁺), sódio (Na⁺), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e cobre (Cu).

3.5.2 Características produtivas e agronômicas do girassol após irrigação com as diluições de água produzida e água de abastecimento

Após a colheita do girassol, realizada manualmente após os 90 dias do transplante, foram realizadas análises de desenvolvimento das plantas por meio das seguintes características observadas: altura de planta (AP), número de folhas (NF), diâmetro de caule (DC), diâmetro

do capítulo (DCA) e produtividade (PROD). Essas características foram determinadas da seguinte forma:

- Altura da planta: determinada utilizando uma trena graduada em centímetros, tendo como pontos de referência o nível do solo e a altura de inserção do capítulo;
- Número de folhas: determinado pela contagem das folhas totalmente abertas emitidas pelas plantas aos 90 DAT;
- Diâmetro do caule: a medida do diâmetro basal do caule foi realizada a uma altura de 5 cm acima da superfície do solo, por meio de paquímetro;
- Diâmetro do capítulo: foi determinado por meio de fita métrica, medindo o capítulo de uma extremidade a outra;
- Produtividade: quantificada por meio da pesagem das sementes após a separação manual das mesmas.

3.5.3 Análise nutricional do girassol após irrigação com as diluições de água produzida tratada

Ao final do ciclo do girassol (90 DAT), além da colheita, foram realizadas a coleta das plantas e separação do capítulo, caule, raiz e folhas. Seguindo as recomendações técnicas propostas por Carmo et al. (2000) e Bataglia et al. (1983), foi feita a análise da composição química do tecido vegetal do girassol no LASAP/UFERSA. As partes separadas das plantas foram embaladas e identificadas em sacos de papel e posteriormente secadas em estufa de circulação forçada a 65°C, durante 72 horas.

Após a secagem, o material vegetal foi triturado em moinho, macerado em cadinha de porcelana e em seguida foi submetido à digestão sulfúrica. Neste processo, 0,4 g de matéria vegetal seca foi posta dentro de um tubo digestor (100 mL de capacidade), adicionando-se 2 mL de H₂O₂ 30% P.A., 4 mL de H₂SO₄ 98% P.A. e 0,7 g de uma mistura dos seguintes reagentes: K₂SO₄ (100 g), CuSO₄ 5H₂O (10 g) e Se (1 g), separadamente (Ferreira, 2014). Foram determinadas as concentrações de sódio (Na), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn), nas amostras secas trituradas da parte aérea e raízes. O teor de sódio foi determinado por fotometria de chama, e os demais elementos por espectrofotometria de absorção atômica. Os procedimentos utilizados nas duas técnicas estão listados no Apêndice B.

3.5.4 Determinação da capacidade de fitoextração do girassol

Foi determinada para cada elemento químico a capacidade de fitoextração da cultura por meio do fator de translocação (FT) e do fator de bioacumulação (FB) dos elementos (Mn, Fe, Zn e Na) utilizando-se as equações 3 e 4, respectivamente, seguindo as recomendações de Saravanan et al. (2019).

$$FT = \frac{CF}{CR} \quad (3)$$

Em que:

FT - Fator de translocação;

CF - Concentração dos elementos nas folhas; e

CR - Concentração dos elementos nas raízes.

$$FB = \frac{CT}{CS} \quad (4)$$

Em que:

FB - Fator de bioacumulação;

CT - Concentração dos elementos na planta (folha mais raízes); e

CS - Concentração dos elementos no solo.

A classificação dos valores de FT e FB foi realizada com base nos critérios descritos na Tabela 6.

3.5.5 Análise estatística

Os dados das características produtivas, morfométricas, nutricionais e fitoextratoras do girassol após aplicação das diluições de água produzida tratada foram submetidos à: 1) Análise de variância, empregando-se o teste F à 5 % de probabilidade; 2) teste de comparação de média, Tukey à 5 % de probabilidade; e 3) Contrastes ortogonais para comparação múltipla das médias à 5 % de probabilidade.

Os dados de solo após aplicação das diluições de água produzida tratada foram submetidos a: 1) Análise de variância, utilizando-se o teste F a 5 %; 2) Análise de desdobramentos, pelo teste de Tukey a 5 %; e 3) Contrastes ortogonais para comparação múltipla das médias nas duas profundidades, à 5 % de probabilidade. Os contrastes ortogonais utilizado foram os seguintes: 1) tratamento D100 versus demais tratamentos (D0, D25, D50 e

D75); 2) tratamento D75 versus tratamentos D0, D25 e D50); 3) tratamento D50 versus tratamentos D0 e D25 e 4) tratamento D25 versus tratamento D0. Todas as análises estatísticas foram efetuadas com o programa computacional Sistemas para Análises de Variância (SISVAR) desenvolvido por Ferreira (2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características físico-químicas do solo após irrigação com as diluições de água produzida tratada

Estão dispostos na Tabela 12 as probabilidades do fator diluição, do fator profundidade e da interação entre os fatores, os coeficientes de variação das parcelas (CV_p) e das subparcelas (CV_{sp}), e a média geral entre os tratamentos, calculados a partir do Teste de Tukey; bem como os desdobramentos, os erros 1 e 2, e os contrastes ortogonais para as variáveis: condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CE_{es}), potássio (K^+), sódio (Na^+); cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}).

Para os valores de CE_{es} foi observada diferença estatística entre as subparcelas a 1 % de probabilidade. Não houve efeito significativo entre as parcelas. Dessa forma, não houve alteração desse atributo devido a aplicação de água produzida comparado com o tratamento controle, no entanto, o tratamento D25 diferiu entre as profundidades. Nenhum dos contrastes ortogonais apresentou efeito significativo para este atributo.

Os valores de CE_{es} máximo ($0,472 \text{ dS m}^{-1}$) e mínimo ($0,118 \text{ dS m}^{-1}$) foram observados no tratamento D25. Todos os tratamentos apresentaram comportamento decrescente de P1 para P2. Os dados de CE_{es} ficaram abaixo do valor limite de 4 dS m^{-1} , classificação tradicional americana (Richards, 1954), e de 2 dS m^{-1} , proposto por Bohn (1985).

A condutividade do extrato de saturação (CE_{es}) é um método geral adotado para estimar a salinidade de um solo em relacionada ao crescimento da planta (Richards, 1954). O aumento da concentração de sais no solo provoca o aumento do potencial osmótico do mesmo, dificultando a absorção de água das plantas. Dependendo dos sais dissolvidos na água de reúso, podem ocorrer outros efeitos tóxicos aos vegetais (Braga & Lima, 2014).

Os valores de concentração de K^+ apresentaram diferença significativa entre as subparcelas a 1 % de probabilidade, e parcelas e interação a 5 % pelo teste de Tukey. A análise dos desdobramentos indica que não houve significância entre os tratamentos, porém, ocorreu diferença significativa entre as profundidades para os tratamentos D50, D75 e D100. Na análise de contrastes observou-se efeito significativo no contraste C3, isso sugere que o tratamento D50 difere estatisticamente dos tratamentos D0 e D25.

Os valores de K variaram de 539,0 a 844,1 mg dm^{-3} , valores correspondentes aos tratamentos D0 e D75, respectivamente. Esses valores enquadram o solo na classificação quanto a concentração de K, de acordo com Ribeiro et al. (1999), como muito ($>120 \text{ mg dm}^{-3}$). Com exceção do tratamento controle, os tratamentos mostraram decréscimo de P1 para P2.

Tabela 12 – Características físico-químicas do solo irrigado com diluições de água produzida.

Fontes de variação	Características físico-químicas do solo											
	CE _{es}	K		Na		Ca		Mg				
	dS m ⁻¹	mg dm ⁻³		mg dm ⁻³	 cmol _c dm ⁻³						
Resumo da ANOVA												
Probabilidade do fator diluições (D)	0,685 ^{NS}	0,042*		0,133 ^{NS}		0,237 ^{NS}		0,290 ^{NS}				
Probabilidade do fator profundidades (P)	0,0009**	0,002**		0,0005**		0,336 ^{NS}		0,080 ^{NS}				
Probabilidade da interação D x P	0,815 ^{NS}	0,012*		0,263 ^{NS}		0,816 ^{NS}		0,816 ^{NS}				
CVp (%)	35,39	15,63		51,53		29,83		63,76				
CVsp (%)	67,54	14,04		60,97		44,14		78,55				
Média geral	0,29	703,59		231,25		0,84		0,71				
Erro 1	0,133	79,50		103,88		0,261		0,407				
Erro 2	0,070	46,74		58,38		0,142		0,227				
Profundidades (Teste Tukey)												
Diluições	P1		P2		P1		P2		P1		P2	
D0	0,408 aA	0,238 aA	539,04 aA	664,83 aA	161,86 aA	153,71 aA	0,718 aA	0,846 aA	0,788 aA	0,480 aA		
D25	0,472 aA	0,118 aB	746,56 aA	639,71 aA	421,88 aA	135,28 aB	0,964 aA	0,834 aA	1,256 aA	0,600 aB		
D50	0,348 aA	0,174 aA	834,86 aA	675,65 aB	399,17 aA	181,66 aB	0,564 aA	0,838 aA	0,968 aA	0,728 aA		
D75	0,404 aA	0,208 aA	844,14 aA	652,66 aB	279,26 aA	160,70 aA	0,818 aA	0,958 aA	0,674 aA	0,522 aA		
D100	0,368 aA	0,180 aA	798,15 aA	640,29 aB	307,20 aA	111,80 aB	0,890 aA	0,996 aA	0,594 aA	0,496 aA		
Probabilidade dos contrastes												
Contrastes	CE _{es}		K		Na		Ca		Mg			
C ₁ : D100 Vs (D0+D25+D50+D75)	0,565 ^{NS}	0,956 ^{NS}	0,185 ^{NS}	0,754 ^{NS}	0,974 ^{NS}	0,509 ^{NS}	0,505 ^{NS}	0,426 ^{NS}	0,197 ^{NS}	0,769 ^{NS}		
C ₂ : D75 Vs (D0 + D25 + D50)	0,874 ^{NS}	0,707 ^{NS}	0,008**	0,920 ^{NS}	0,564 ^{NS}	0,919 ^{NS}	0,780 ^{NS}	0,476 ^{NS}	0,212 ^{NS}	0,807 ^{NS}		
C ₃ : D50 Vs (D0 + D25)	0,294 ^{NS}	0,963 ^{NS}	0,002**	0,685 ^{NS}	0,142 ^{NS}	0,606 ^{NS}	0,120 ^{NS}	0,991 ^{NS}	0,847 ^{NS}	0,504 ^{NS}		
C ₄ : D25 Vs D0	0,525 ^{NS}	0,237 ^{NS}	0,003**	0,706 ^{NS}	0,003**	0,824 ^{NS}	0,229 ^{NS}	0,953 ^{NS}	0,154 ^{NS}	0,711 ^{NS}		

Nota: D0 – Somente água subterrânea (AS), D25 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (APT), D50 - 50% de AS e 50% de APT, D75 – 25% de AS e 75% de APT, e D100 – somente APT; C₁ = 12 m₁ + 12 m₂ + 8 m₃ + 10 m₄ – 42 m₅; C₂ = 30 m₁ + 30 m₂ + 20 m₃ - 80 m₄; C₃ = 6 m₁ + 6 m₂ - 12 m₃; C₄ = 6 m₁ - 6 m₂

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

** e * Significativo a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

NS - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Esses resultados diferem dos observados por Costa et al. (2019) que irrigou palma forrageira com diluições de água produzida em um Argissolo, encontrando menores teores de K (36 a 50 mg dm⁻³, aproximadamente) e comportamento consideravelmente crescente deste no perfil do solo apenas para o tratamento que recebeu 100 % de água produzida.

O Na⁺ apresentou valor médio de 231,25 mg dm⁻³ e erro padrão de 103,88 mg dm⁻³. Não foi encontrada diferença significativa entre os tratamentos, entretanto foi observada significância no fator profundidade (a 1 % de probabilidade), os tratamentos D25, D50 e D100 diferiram entre P1 e P2. Na análise de contrastes, o contraste C4 apresentou diferença estatística a 1 % pelo teste de Tukey. Dessa forma o tratamento D25 difere significativamente do tratamento D0.

Os teores de Na⁺ variaram de 111,8 a 421,9 mg dm⁻³, ocorridos nos tratamentos D100 e D25, respectivamente. Em todos os tratamentos foi observado comportamento descendente dentre as profundidades, semelhante ao que foi observado na CE_{es}. Esse comportamento provavelmente foi provocado acúmulo de sais na superfície do solo devido à evaporação e lixiviação de parte desses sais para a camada mais profunda.

Costa (2018) observou variações semelhantes para os tratamentos com proporções diferentes de 0 % de água produzida em solo cultivado com a cultivar de girassol H-360. Costa et al. (2019), nas mesmas condições experimentais, também relatou a menor concentração de Na no tratamento com 100 % de água produzida.

O excesso de Na trocável no solo provoca o efeito de dispersão das argilas na presença de água, e, por consequência, modifica a estrutura do solo de modo que a drenagem é dificultada, originando um ambiente encharcado, que é desfavorável ao desenvolvimento das plantas devido à ausência de aeração (Dias & Blanco, 2010).

Os teores de Ca²⁺ apresentaram média de 0,84 cmol_c dm⁻³, erro padrão de 0,261 cmol_c dm⁻³, e não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos, profundidades e interação. Também não houve significância quando se analisou os contrastes ortogonais. Observou-se que houve crescimento no teor de Ca²⁺ para todos os tratamentos com exceção do D25 de P1 para P2. Os valores deste atributo variaram de 0,564 a 0,996 cmol_c dm⁻³. Esses valores permitem classificar o solo agronomicamente como baixo (0,41 – 1,20 cmol_c dm⁻³) segundo Ribeiro et al. (1999).

O Mg²⁺ apresentou teor médio de 0,71 cmol_c dm⁻³, e também não apresentou efeito significativo entre as parcelas e subparcelas, bem como em nenhum dos contrastes. Os valores variaram de 0,864 a 1,896 cmol_c dm⁻³, sendo que todos os tratamentos apresentaram decréscimo de concentração com a profundidade. Dessa forma pode-se classificar o solo

quanto ao teor de Mg como médio (0,46 – 0,90 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) a bom (0,91 – 1,50 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), conforme a classificação de Ribeiro et al. (1999).

Os nutrientes cálcio, magnésio e potássio têm como característica a interferência que promovem entre si no processo de absorção pelas plantas, sendo as proporções utilizadas na adubação destes tão importante quanto sua quantidade. O potássio, por exemplo, se estiver presente em alta proporção na solução do solo pode inibir a absorção de Ca e Mg pelas plantas (Nguyen et al., 2017).

4.2 Micronutrientes no solo após irrigação com diluições de água produzida tratada

Na Tabela 13 estão apresentadas as probabilidades do fator diluição, do fator profundidade e da interação; coeficientes de variação (%) das parcelas (CV_p) e subparcelas (CV_{sp}), e média geral, obtidos através do Teste de Tukey; os desdobramentos e os contrastes ortogonais aplicados de acordo com as variáveis: potencial hidrogeniônico (pH), Fe (ferro), Mn (manganês), Zn (zinco) e Cu (cobre) aos 90 DAT.

Os valores de pH apresentaram efeito significativo entre as diluições a 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey. Não houve diferença estatística entre as profundidades para nenhum dos tratamentos. Para os contrastes ortogonais houve efeito significativo, a 5 % de probabilidade, somente para o contraste C4, indicando que o tratamento D0 difere estatisticamente de D25. O tratamento de maior concentração de água produzida (D100) apresentou pequena variação crescente, praticamente constante. Os demais tratamentos mostraram comportamento descendente ao longo do perfil do solo. O valor máximo foi de 8,29 (D0) e o valor mínimo de 7,37 (D75). Esses valores denotam que o solo é classificado como pH muito alto ($>7,0$) agronomicamente (Ribeiro et al., 1999).

Weber et al. (2017) observaram redução do pH do solo tanto no irrigado com água produzida tratada por osmose reversa quanto o irrigado com a tratada por filtração. Os autores também relataram redução do pH com a profundidade no segundo e terceiro ciclos da cultura. Já Crisóstomo et al. (2016) verificaram aumento do pH no solo após o primeiro ciclo do girassol irrigado com dois tipos de água produzida tratada (por osmose reversa e filtração).

Para o Fe não houve diferença estatística entre tratamentos e profundidades. No entanto, houve diferença estatística no contraste C4, indicando que o tratamento D25 difere do tratamento D0. Os valores máximo e mínimo foram de 6,983 mg dm^{-3} (D25) e 1,836 mg dm^{-3} (D0), respectivamente. Os tratamentos D100, D75 e D25 mostraram comportamento decrescente ao longo do perfil do solo, enquanto nos demais tratamentos houve acréscimo com a profundidade.

Tabela 13 – Características químicas do solo após irrigação com diluições de água produzida.

Fontes de variação	Características químicas do solo											
	pH		Fe		Mn		Zn		Cu			
			mg dm ⁻³		mg dm ⁻³		mg dm ⁻³		mg dm ⁻³			
Resumo da ANOVA												
Probabilidade do fator diluições (D)	0,042*		0,062 ^{NS}		0,056 ^{NS}		0,047*		0,242 ^{NS}			
Probabilidade do fator profundidades (P)	0,090 ^{NS}		0,053 ^{NS}		0,013*		0,003**		0,360*			
Probabilidade da interação D x P	0,809 ^{NS}		0,373 ^{NS}		0,036*		0,940 ^{NS}		0,119 ^{NS}			
CVp (%)	5,50		62,61		28,45		18,25		118,54			
CVsp (%)	5,84		88,30		33,48		18,55		106,71			
Média geral	7,79		3,717		1,197		0,277		0,045			
Erro 1	0,346		2,322		0,296		0,040		0,039			
Erro 2	0,196		1,272		0,166		0,023		0,023			
Profundidades (Teste Tukey)												
Diluições	P1		P2		P1		P2		P1		P2	
D0	8,294 aA	8,094 aA	1,838 aA	2,196 aA	1,288 aA	1,496aA	0,354 aA	0,285 aB	0,044 aA	0,028 aA		
D25	7,836 aA	7,670 aA	6,984 aA	2,226 aB	1,192 aA	0,880 aA	0,298 aA	0,260 aA	0,039 aA	0,049 aA		
D50	7,810 aA	7,438 aA	5,052 aA	5,296 aA	1,280 aA	1,052 aA	0,300 aA	0,264 aA	0,037 aA	0,127 aB		
D75	7,806 aA	7,372 aA	4,400 aA	2,074 aA	1,096 aA	0,920 aA	0,290 aA	0,235 aA	0,036 aA	0,030 aA		
D100	7,770 aA	7,794 aA	5,076 aA	2,026 aA	1,896 aA	0,866 aB	0,265 aA	0,223 aA	0,039 aA	0,025 aA		
Probabilidade dos contrastes												
Contrastes	pH		Fe		Mn		Zn		Cu			
C ₁ : D100 Vs (D0+D25+D50+D75)	0,410 ^{NS}	0,597 ^{NS}	0,704 ^{NS}	0,607 ^{NS}	0,0008**	0,216 ^{NS}	0,068 ^{NS}	0,142 ^{NS}	0,991 ^{NS}	0,277 ^{NS}		
C ₂ : D75 Vs (D0 + D25 + D50)	0,400 ^{NS}	0,090 ^{NS}	0,908 ^{NS}	0,540 ^{NS}	0,425 ^{NS}	0,232 ^{NS}	0,269 ^{NS}	0,189 ^{NS}	0,872 ^{NS}	0,256 ^{NS}		
C ₃ : D50 Vs (D0 + D25)	0,299 ^{NS}	0,075 ^{NS}	0,682 ^{NS}	0,056 ^{NS}	0,853 ^{NS}	0,508 ^{NS}	0,359 ^{NS}	0,768 ^{NS}	0,876 ^{NS}	0,003**		
C ₄ : D25 Vs D0	0,110 ^{NS}	0,138 ^{NS}	0,007**	0,987 ^{NS}	0,688 ^{NS}	0,013*	0,089 ^{NS}	0,451 ^{NS}	0,883 ^{NS}	0,521 ^{NS}		

Nota: D0 – Somente água subterrânea (AS), D25 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (APT), D50 - 50% de AS e 50% de APT, D75 – 25% de AS e 75% de APT, e D100 – somente APT; C₁ = 12 m₁ + 12 m₂ + 8 m₃ + 10 m₄ – 42 m₅; C₂ = 30 m₁ + 30 m₂ + 20 m₃ - 80 m₄; C₃ = 6 m₁ + 6 m₂ - 12 m₃; C₄ = 6 m₁ - 6 m₂.

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

** e * Significativo a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

ns - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Em estudo realizado por Sedlacko et al. (2020), o teor de Fe mínimo ($12.600 \text{ mg dm}^{-3}$) foi observado em solo irrigado com água produzida bruta diluída a 90% e o teor máximo ($14.900 \text{ mg dm}^{-3}$) em solo irrigado com APT por FB-UF (filtro biológico seguido de ultrafiltração) diluída a 90 % dentre os demais tratamentos, sendo o valor máximo também encontra em solo irrigado com APT por eletrodialise (sem diluição). Já Costa et al. (2020), observaram concentração de $2,55 \text{ mg dm}^{-3}$ de Fe em solo irrigado com 100 % de APT por polímero floculante, sendo o teor máximo encontrado no tratamento com 75 % de APT.

A análise de variância mostrou que houve diferença significativa entre os tratamentos nas profundidades para o Mn a 5 % de significância pelo teste de Tukey. Além disso, foi notado que apenas o contraste C4 apresentou diferença estatística.

O Mn variou de $0,864$ a $1,896 \text{ mg dm}^{-3}$, ambos observados no tratamento D100, sendo o valor máximo encontrado na profundidade mais superficial, provavelmente por que este elemento é pouco móvel no solo. Apenas o tratamento D0 mostrou comportamento crescente ao longo do perfil. Costa (2018) obteve resultados similares em que todas as diluições de água produzida e o tratamento controle mostraram comportamento decrescente ao longo de $0,20 \text{ m}$ de solo.

No solo, pHs ácidos favorecem a disponibilidade de Mn, sendo mais comum a toxidez do que a deficiência deste nutriente nos vegetais. Os teores que provocam toxidez variam com a espécie, cultivar e características do ambiente, sendo a faixa de 100 a 7000 mg kg^{-1} associada a redução de 10 % da matéria seca, a depender da espécie (Faquin, 2005). Neste estudo a faixa de pH não favoreceram a disponibilidade de Mn, o que explica sua baixa disponibilidade no solo.

Quanto ao Zn, foi observado efeito significativo para as parcelas (a 5 % de significância) e subparcelas (a 1 % de significância), porém não foi encontrada significância na interação entre as mesmas. Entre diferença estatística entre as profundidades apenas para D0. Ao analisar-se os contrastes ortogonais, observou-se diferença estatística para o contraste C1, denotando que o tratamento D100 difere estatisticamente dos demais tratamentos.

Observou-se pequenas variações nos teores de Zn de P1 para P2, o maior valor encontrado foi $0,354 \text{ mg dm}^{-3}$ e o menor foi $0,223 \text{ mg dm}^{-3}$. Essa faixa de concentração está muito abaixo dos valores limites estabelecidos para prevenção (300 mg kg^{-1}) e investigação agrícola (450 mg kg^{-1}) estabelecidos pela resolução CONAMA 420/2009 (Brasil, 2009). Todos os tratamentos apresentaram decréscimo ao longo da profundidade do solo. Comportamento semelhante foi relatado por Weber et al. (2017), em experimento de cultivo de girassol irrigado com água produzida tratada por osmose reversa e filtração, nos três ciclos da cultura e entre as profundidades de 20 a 80 cm.

Não houve diferença significativa para o Cu entre os tratamentos e profundidades. Além disso, não houve efeito significativo entre os contrastes ortogonais. O comportamento da concentração de Cu entre as profundidades foi de crescimento para os tratamentos D25 e D50, e decréscimo para os demais tratamentos. Sua variação foi de 0,025 (D100) a 0,127 mg dm⁻³ (D50), muito abaixo dos limites estabelecidos pela resolução CONAMA 420/2009 (Brasil, 2009).

É importante observar que todos os micronutrientes se enquadram na classificação muito baixo segundo Ribeiro et al. (1999), isso ocorreu devido ao pH alcalino que reduziu a disponibilidade desses elementos no solo conforme afirma Novais et al. (2007).

4.3 Características agrônômicas do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada

Na Tabela 14 estão dispostos as médias dos tratamentos para a produtividade (PROD), altura da planta (AP), número de folhas (NF), diâmetro do caule (DC) e diâmetro do capítulo (DCA) com suas respectivas probabilidades calculadas pelo teste de Tukey a 5 %.

Tabela 14 – Características produtivas do girassol, irrigado com diluições de água produzida em água de abastecimento.

Fontes de variação	Características agrônômicas da planta				
	PROD kg ha ⁻¹	AP cm	NF uni	DC cm	DCA cm
Probabilidade do fator diluição	0,511 ^{NS}	0,703 ^{NS}	0,306 ^{NS}	0,014*	0,062 ^{NS}
CV (%)	66,37	18,92	16,45	28,46	23,23
Média	290,53	58,18	10,68	0,360	4,384
Erro-padrão	86,23	4,923	0,785	0,046	0,455
Diluições	Comparação da médias (Teste Tukey)				
D0	216,34	52,30	11,40	0,26 a	3,26 a
D25	409,01	61,70	11,80	0,28 ab	5,36 b
D50	267,33	57,80	10,20	0,46 b	4,56 ab
D75	229,29	58,52	10,40	0,34 ab	4,18 ab
D100	330,70	60,60	9,60	0,46 b	4,56 ab
Contrastes	Probabilidade dos contrastes				
	PROD	AP	NF	DC	DCA
C ₁ : D100 Vs (D0+D25+D50+D75)	0,637 ^{NS}	0,584 ^{NS}	0,120 ^{NS}	0,017*	0,654 ^{NS}
C ₂ : D75 Vs (D0 + D25 + D50)	0,481 ^{NS}	0,820 ^{NS}	0,364 ^{NS}	0,677 ^{NS}	0,720 ^{NS}
C ₃ : D50 Vs (D0 + D25)	0,673 ^{NS}	0,896 ^{NS}	0,165 ^{NS}	0,004**	0,660 ^{NS}
C ₄ : D25 Vs D0	0,134 ^{NS}	0,196 ^{NS}	0,723 ^{NS}	0,762 ^{NS}	0,005**

Nota: D0 – Somente água subterrânea (AS), D25 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (APT), D50 – 50% de AS e 50% de APT, D75 – 25% de AS e 75% de APT, e D100 –somente APT; C₁ = 12 m₁ + 12 m₂ + 8 m₃ + 10 m₄ – 42 m₅; C₂ = 30 m₁ + 30 m₂ + 20 m₃ - 80 m₄; C₃ = 6 m₁ + 6 m₂ - 12 m₃; C₄ = 6 m₁ - 6 m₂

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade. ** e * Significativo a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente. NS - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Segundo a ANOVA, não houve efeito significativo entre os tratamentos pelo Teste de Tukey a 5 % de probabilidade para a produtividade ($p = 0,511$). Também não houve efeito significativo em nenhum dos contrastes ortogonais. Esses resultados indicam que as diluições de APT não interferiram na produtividade do girassol H-251, no entanto, foi observado aumento da produtividade nos tratamentos que receberam diluições de APT, corroborando o estudo de Costa (2018), que utilizou água produzida tratada na irrigação do girassol H-360.

Crisostomo et al. (2016) encontraram rendimento de grãos de 652,7 e 468,8 kg ha⁻¹ para água produzida tratada por osmose reversa e filtração, respectivamente, no primeiro ciclo do girassol.

Quanto à altura da planta, foi observado valor máximo em D25 (61,70 cm) e o valor mínimo em D0 (52,30 cm), indicando que houve incremento nessa característica devido à irrigação com APT, apesar de não ter ocorrido diferença estatística entre as médias.

Silva & Nascimento (2019), em experimento utilizando girassol irrigado com águas residuárias de estação de tratamento (1,03 dS m⁻¹), esgoto de fossa (1,79 dS m⁻¹), água salina (2,0 dS m⁻¹) e água de poço (0,97 dS m⁻¹), observaram que a altura da planta foi máxima (53,63 cm) para o girassol irrigado com água de fossa aos 80 dias após a semeadura, não havendo significância pelo Teste de Tukey a 5 %.

O número de folhas não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, indicando que o uso das proporções de APT não influenciaram este atributo. Também não houve significância nos contrastes ortogonais. O valor mínimo (9,60) foi observado no tratamento de maior proporção de APT.

Mello et al. (2020) encontraram resultados diferentes ao cultivar girassol ornamental com diluições de água cinza, observando significância no número de folhas. Já Costa et al. (2018), ao irrigar girassol com diluições de esgoto doméstico, também encontraram significância entre os tratamentos para número de folhas com valor mínimo de 12,20. Coelho et al. (2018), relataram número de folhas máximo (17,08) em girassol irrigado com água contendo 20 % de lixiviado de aterro sanitário e 80 % de água de abastecimento.

Segundo a ANOVA houve efeito significativo entre os tratamentos para o diâmetro do caule ($p = 0,014$), a 5 % de significância. O tratamento D0 diferiu dos tratamentos D50 e de D100, não diferindo dos demais tratamentos. Foi observado diferença estatística nos contrastes C1 e C3 (a 5 e 1 %, respectivamente), indicando que o tratamento D0 difere da combinação dos demais tratamentos, e que D50 difere da combinação de D25 e D0.

Resultado semelhante foi observado por Melo et al. (2020), em experimento em que foi cultivado girassol ornamental irrigado com diluições de água cinza, no qual houve efeito significativo no diâmetro do caule devido ao uso desse efluente de diluído.

Embora a ANOVA não tenha revelado efeito significativo para o diâmetro do capítulo, o teste de média mostrou diferença significativa entre os tratamentos D0 e D25, e ambos não diferiram dos demais tratamentos. Apenas o contraste C4 foi significativo (a 1 % de significância), isso denota que a diluição D25 difere da D0. Assim, o diâmetro do capítulo foi influenciado pelas diluições de APT. Esse comportamento também foi verificado por Costa (2018) utilizando as mesmas diluições de APT na cultivar H-360 de girassol.

Os incrementos na altura da planta e nos diâmetros do caule e do capítulo provavelmente ocorreram devido ao grande aporte de potássio no solo, uma vez que o girassol é muito exigente em adubação potássica, respondendo bem ao aporte desse nutriente.

4.4 Composição mineral da parte aérea e das raízes do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada

4.4.1 Concentração de manganês, ferro, zinco e sódio no capítulo do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada

Na Tabela 15 estão apresentados os teores médios de manganês (Mn), ferro (Fe), zinco (Zn) e sódio (Na) no capítulo do girassol aos 90 DAT. Não houve efeito significativo entre os tratamentos para nenhum dos elementos analisados na ANOVA. Também não houve efeito significativo nos contrastes ortogonais.

Para o Mn a maior concentração ocorreu no tratamento D25 (25,38 mg kg⁻¹), e a menor (12,88 mg kg⁻¹) no tratamento que recebeu apenas água de abastecimento (D0). Dentre os micronutrientes o Fe foi elemento que apresentou os maiores valores, variando de 63,85 (D25) a 334,75 mg dm⁻³ (D0). Isso ocorreu devido a maior quantidade inicial de Fe presente no solo comparado com os demais elementos estudados. O teor de Zn máximo foi observado no tratamento D0 (45,90 mg dm⁻³) e o valor mínimo no tratamento D25 (30,70 mg dm⁻³).

Segundo Ribeiro et al. (1999), as faixas adequadas do Mn, Fe e Zn no tecido vegetal do girassol são, respectivamente: 300 a 600, 150 a 200 e 70 a 140 mg dm⁻³. Dessa forma, os teores de Mn ficaram abaixo da faixa adequada em todos os tratamentos; para o Fe apenas o tratamento D0 foi observado dentro da faixa adequada; e o Zn apresentou teores abaixo do intervalo adequado em todos os tratamentos.

Tabela 15 – Características químicas do capítulo do girassol irrigado com diluições de água produzida em água de abastecimento.

Fontes de Variação	Concentração no capítulo			
	Mn	Fe	Zn	Na
 mg kg ⁻¹			g kg ⁻¹
Probabilidade do fator diluição	0,761 ^{NS}	0,323 ^{NS}	0,254 ^{NS}	0,490 ^{NS}
CV (%)	87,03	111,04	78,51	131,51
Média	19,91	175,53	37,57	1,893
Erro-padrão	7,750	87,161	13,190	1,113
Diluições	Comparação da médias (Teste Tukey)			
D0	12,88	334,75	45,90	2,836
D25	25,38	63,85	30,70	1,834
D50	19,13	153,28	33,67	0,418
D75	22,05	87,30	33,81	3,474
D100	20,13	239,20	43,78	0,900
Contrastes	Probabilidade dos contrastes			
	Mn	Fe	Zn	Na
C ₁ : D100 Vs (D0+D25+D50+D75)	0,714 ^{NS}	0,252 ^{NS}	0,693 ^{NS}	0,672 ^{NS}
C ₂ : D75 Vs (D0 + D25 + D50)	0,385 ^{NS}	0,398 ^{NS}	0,268 ^{NS}	0,099 ^{NS}
C ₃ : D50 Vs (D0 + D25)	0,679 ^{NS}	0,130 ^{NS}	0,384 ^{NS}	0,449 ^{NS}
C ₄ : D25 Vs D0	0,394 ^{NS}	0,642 ^{NS}	0,071 ^{NS}	0,999 ^{NS}

Nota: D0 – Somente água subterrânea (AS), D25 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (APT), D50 – 50% de AS e 50% de APT, D75 – 25% de AS e 75% de APT, e D100 –somente APT; C₁ = 12 m₁ + 12 m₂ + 8 m₃ + 10 m₄ – 42 m₅; C₂ = 30 m₁ + 30 m₂ + 20 m₃ - 80 m₄; C₃ = 6 m₁ + 6 m₂ - 12 m₃; C₄ = 6 m₁ - 6 m₂
Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

** e * Significativo a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

NS - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Com média de concentração de 1,893 g kg⁻¹ e CV de 131,51 %, o Na variou de 0,418 a 3,474 g kg⁻¹, valores observados nos tratamentos D50 e D75 respectivamente. Lemos (2016), observou teor de Na na ordem de 0,452 g kg⁻¹ em matéria seca de palma forrageira irrigada com esgoto doméstico tratado.

4.4.2 Concentração de manganês, ferro, zinco e sódio no caule do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada

Os teores médios e a ANOVA dos elementos Mn, Fe, Zn e Na no caule da planta estão dispostos na Tabela 16, bem como a análise dos contrastes ortogonais. Não foi observado diferença estatística entre os tratamentos para nenhum dos elementos. Quanto aos contrastes ortogonais, foi observada significância apenas para o Zn.

Tabela 16 – Características químicas do caule do girassol irrigado com diluições de água produzida em água de abastecimento.

Fontes de variação	Características químicas do caule			
	Mn	Fe	Zn	Na
 mg kg ⁻¹			g kg ⁻¹
Probabilidade do fator diluição	0,499 ^{NS}	0,932 ^{NS}	0,117 ^{NS}	0,619 ^{NS}
CV (%)	142,68	94,08	47,26	87,46
Média	27,32	126,96	52,92	12,15
Erro-padrão	17,431	53,416	11,184	4,756
Diluições	Comparação da médias (Teste Tukey)			
D0	22,73	114,60	62,77	7,88
D25	50,70	136,88	57,50	14,73
D50	5,48	161,38	24,89	8,75
D75	25,90	97,15	52,76	12,31
D100	31,78	124,80	66,69	17,11
Contrastes	Probabilidade dos contrastes			
	Mn	Fe	Zn	Na
C ₁ : D100 Vs (D0+D25+D50+D75)	0,857 ^{NS}	0,988 ^{NS}	0,248 ^{NS}	0,273 ^{NS}
C ₂ : D75 Vs (D0 + D25 + D50)	0,884 ^{NS}	0,553 ^{NS}	0,913 ^{NS}	0,770 ^{NS}
C ₃ : D50 Vs (D0 + D25)	0,163 ^{NS}	0,593 ^{NS}	0,020*	0,667 ^{NS}
C ₄ : D25 Vs D0	0,273 ^{NS}	0,772 ^{NS}	0,743 ^{NS}	0,323 ^{NS}

Nota: D0 – Somente água subterrânea (AS), D25 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (APT), D50 – 50% de AS e 50% de APT, D75 – 25% de AS e 75% de APT, e D100 – somente APT; C₁ = 12 m₁ + 12 m₂ + 8 m₃ + 10 m₄ – 42 m₅; C₂ = 30 m₁ + 30 m₂ + 20 m₃ - 80 m₄; C₃ = 6 m₁ + 6 m₂ - 12 m₃; C₄ = 6 m₁ - 6 m₂
Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

** e * Significativo a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

NS - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Os teores de Mn variaram entre 5,48 e 31,78 mg dm⁻³, correspondentes aos tratamentos D50 e D100, respectivamente. Em estudo realizado por Sedlacko et al. (2020), foi observado elevação Mn no tecido vegetal do trigo irrigado com água produzida tratada (redução de salinidade e matéria orgânica).

Observou-se que o Fe variou entre 97,15 mg kg⁻¹ (D50) e 161,38 mg kg⁻¹ (D100), com média de 126,96 mg kg⁻¹. Resultados similares foram encontrados por Costa (2019), em que o teor de Fe em cladódios de palma irrigada com diluições de água produzida variaram de 87,12 a 133,78 mg kg⁻¹.

Para o Zn o teor máximo ocorreu no tratamento D100 (66,69 mg kg⁻¹) e o teor mínimo no tratamento D50 (24,89 mg kg⁻¹). Quanto aos contrastes ortogonais, foi observada significância no contraste C₃, indicando que o tratamento D50 difere da combinação dos tratamentos D0 e D25. Costa (2018), relatou variação de Zn no girassol irrigado com diluições APT em tecido foliar de 41,43 a 46,75 mg kg⁻¹.

A deficiência de zinco em geral provoca diminuição da taxa de alongamento do caule, encurtamento dos entrenós, nas folhas pode causar clorose branda, redução de tamanho e deformação das mesmas (Kerbaudy, 2019).

Os maiores teores de Na foram observados nos tratamentos que receberam maior proporção de APT, sendo o valor mínimo observado em D0 (7,88 g kg⁻¹) e o máximo em D100 (17,11 g kg⁻¹). Embora não tenha ocorrido diferença estatística entre os tratamentos para esse elemento, verificou-se incremento em detrimento das diluições de APT. Isso ocorreu devido às altas concentrações de sais no efluente, que foram absorvidos em quantidades consideráveis mesmo com as perdas por lixiviação. Weber et al. (2017), encontram teores de sódio de 0,60, 5,13 e 0,60 g kg⁻¹, no caule de plantas de girassol irrigados com água produzida tratada por osmose reversa, filtração e água de abastecimento, respectivamente, no primeiro ciclo da planta.

4.4.3 Concentração de manganês, ferro, zinco nas folhas do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada

Os teores médios de Mn, Fe, Zn e Na nas folhas, a ANOVA e a análise de contrastes ortogonais estão dispostos na Tabela 17. Apenas os elementos Zn e Na apresentaram diferença significativa entre tratamentos e em pelo menos um dos contrastes ortogonais.

Não foi observada diferença estatística entre os tratamentos para o Mn, sua concentração variou de 10,10 (D75) a 25,08 mg kg⁻¹ (D25). Também não foi encontrada diferença significativa entre os contrastes ortogonais. Esses resultados se assemelham aos encontrados por Costa (2018), que em condições experimentais iguais, irrigou a cultivar de girassol H-360 com diluições de água produzida tratada, observando variação de Mn de 4,30 a 13,70 mg kg⁻¹. Segundo Faquin (2005), a faixa de limite crítico deste nutriente para a maior parte das culturas é de 10 a 20 mg kg⁻¹ em folhas maduras.

A concentração de Fe nas folhas variou entre 160,26 a 414,96 mg kg⁻¹, com média de 291,60 mg kg⁻¹ e CV igual a 88,58 %, não apresentando diferença significativa entre os tratamentos, nem nos contrastes ortogonais. Aquino et al. (2013) ao testar o estado nutricional de cultivares de girassol irrigado com água não residuária, observaram concentração média de Fe no tecido foliar da cultivar Hélio-251 de 100,35 mg kg⁻¹.

Os teores de Zn variaram de 25,02 a 64,17 mg kg⁻¹, a média entre os tratamentos foi de 45,34 mg kg⁻¹. Foi observado diferença significativa entre os tratamentos ($p = 0,047$). O teste de média mostrou que D25 diferiu de D75, e não diferiu estatisticamente dos demais tratamentos. Os tratamentos D0, D50 e D100 não diferiram entre si. Quanto a análise de

contrastes, foi observado significância no contraste C2, isso denota que o tratamento D75 difere da combinação de D0, D25 e D50.

Tabela 17 – Características químicas das folhas do girassol irrigado com diluições de água produzida em água de abastecimento.

Fontes de variação	Características químicas das folhas			
	Mn	Fe	Zn	Na
 mg kg ⁻¹			g kg ⁻¹
Probabilidade do fator diluição	0,412 ^{NS}	0,653 ^{NS}	0,047*	0,032*
CV (%)	96,43	88,58	41,84	63,60
Média	15,60	291,60	45,34	4,21
Erro-padrão	6,727	115,51	8,483	1,199
Diluições	Comparação da médias (Teste Tukey)			
D0	20,86	307,76	53,88 ab	6,80 a
D25	25,08	302,28	64,17 b	6,43 a
D50	10,54	160,26	38,68 ab	3,20 a
D75	10,10	272,74	25,02 a	2,51 a
D100	11,42	414,96	44,93 ab	2,14 a
Contrastes	Probabilidade dos contrastes			
	Mn	Fe	Zn	Na
C ₁ : D100 Vs (D0+D25+D50+D75)	0,429 ^{NS}	0,279 ^{NS}	0,826 ^{NS}	0,050 ^{NS}
C ₂ : D75 Vs (D0 + D25 + D50)	0,229 ^{NS}	0,977 ^{NS}	0,010*	0,032*
C ₃ : D50 Vs (D0 + D25)	0,151 ^{NS}	0,321 ^{NS}	0,068 ^{NS}	0,033*
C ₄ : D25 Vs D0	0,663 ^{NS}	0,974 ^{NS}	0,404 ^{NS}	0,830 ^{NS}

Nota: D0 – Somente água subterrânea (AS), D25 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (APT), D50 – 50% de AS e 50% de APT, D75 – 25% de AS e 75% de APT, e D100 –somente APT; C₁ = 12 m₁ + 12 m₂ + 8 m₃ + 10 m₄ – 42 m₅; C₂ = 30 m₁ + 30 m₂ + 20 m₃ - 80 m₄; C₃ = 6 m₁ + 6 m₂ - 12 m₃; C₄ = 6 m₁ - 6 m₂

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

** e * Significativo a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

NS - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Em estudo realizado com variedades de girassol ornamental, utilizando efluente da piscicultura, Rêgo (2018) observou significância a 1 % entre as proporções do efluente nos teores de Zn no tecido foliar, verificando comportamento decrescente. Sandri et al. (2006) observaram teores de Zn variando de 46,7 a 55,3 g kg⁻¹, em tecido foliar da alface (planta da mesma família do girassol) irrigado com esgoto de uma universidade.

Quanto ao Na observou-se concentração máxima de 6,80 g kg⁻¹ e mínima de 2,14 g kg⁻¹, média entre tratamentos de 4,21 g kg⁻¹ e erro padrão de 1,199 g kg⁻¹, sendo o valor máximo observado no tratamento controle (D0). De acordo com a ANOVA houve diferença significativa entre os tratamentos (p = 0,032) a 5% de significância; porém, no teste de média não ocorreu diferença entre os tratamentos. Os contrastes C2 e C3 foram significativos, dessa forma, D75 difere do agrupamento de D50, D25, D0, e D50 difere do agrupamento entre D25 e D0.

Sandri et al. (2006) encontraram, dentre vários elementos estudados, maior concentração de Na (985, 676 e 617 mg kg⁻¹, utilizando sistemas por aspersão, gotejamento subterrâneo e gotejamento superficial, respectivamente) na parte aérea da alface irrigada com água residuária (esgoto de uma universidade tratada por reator anaeróbio), apresentando diferença estatística em relação ao tratamento controle. Já Costa (2019) observou valores menores de Na em cladódios de palma forrageira irrigada com diluições de água produzida (0,298 a 0,431 g kg⁻¹), porém, observou diferença significativa a 1 % de probabilidade para este elemento pelo teste de Tukey.

4.4.4 Concentração de manganês, ferro, zinco e sódio nas raízes do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada

Segunda a ANOVA, nenhum dos elementos analisados nas raízes apresentou diferença estatística a 5 % de significância pelo Teste de Tukey (Tabela 18). Porém, o teste de média revelou diferença estatística entre os tratamentos para o Na.

Tabela 18 – Características químicas das raízes do girassol irrigado com diluições de água produzida em água de abastecimento.

Fontes de variação	Características químicas da raiz			
	Mn	Fe	Zn	Na
 mg kg ⁻¹			g kg ⁻¹
Probabilidade do fator diluição	0,155 ^{NS}	0,244 ^{NS}	0,924 ^{NS}	0,056 ^{NS}
CV (%)	47,24	60,08	49,45	109,46
Média	34,05	657,12	126,58	18,25
Erro-padrão	7,193	176,56	27,994	8,936
Diluições	Comparação da médias (Teste Tukey)			
D0	41,93	371,68	130,82	10,95 ab
D25	29,90	475,30	120,40	13,92 ab
D50	20,45	827,64	121,48	5,05 a
D75	32,40	777,46	113,08	17,12 ab
D100	45,55	833,50	147,10	44,24 b
Contrastes	Probabilidade dos contrastes			
	Mn	Fe	Zn	Na
C ₁ : D100 Vs (D0+D25+D50+D75)	0,115 ^{NS}	0,227 ^{NS}	0,433 ^{NS}	0,005 ^{**}
C ₂ : D75 Vs (D0 + D25 + D50)	0,967 ^{NS}	0,234 ^{NS}	0,728 ^{NS}	0,537 ^{NS}
C ₃ : D50 Vs (D0 + D25)	0,098 ^{NS}	0,080 ^{NS}	0,906 ^{NS}	0,510 ^{NS}
C ₄ : D25 Vs D0	0,254 ^{NS}	0,684 ^{NS}	0,796 ^{NS}	0,817 ^{NS}

Nota: D0 – Somente água subterrânea (AS), D25 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (APT), D50 – 50% de AS e 50% de APT, D75 – 25% de AS e 75% de APT, e D100 –somente APT; C₁ = 12 m₁ + 12 m₂ + 8 m₃ + 10 m₄ – 42 m₅; C₂ = 30 m₁ + 30 m₂ + 20 m₃ - 80 m₄; C₃ = 6 m₁ + 6 m₂ - 12 m₃; C₄ = 6 m₁ - 6 m₂
Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

** e * Significativo a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

NS - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

A concentração de Mn variou entre 20,45 (D50) e 45,55 mg kg⁻¹ (D100). Quanto a análise contrastes, não houve significância em nenhum dos contrastes analisados. Costa (2019) encontrou teores mais elevados de Mn (130,48 a 177,05 mg kg⁻¹) em raízes de palma forrageira irrigada com diluições de APT, no entanto, também não observou efeito estatístico entre as diluições.

Embora não tenha ocorrido significância entre as médias de Fe, notou-se incremento desse elemento ocasionado pelas proporções de APT, de forma que seu teor mínimo ocorreu no tratamento D0 (371,68 mg kg⁻¹) e o máximo em D100 (833,50 mg kg⁻¹). Crisóstomo et al. (2018) encontraram teores de Fe dentro dessa faixa quando analisaram raízes de abacaxizeiro irrigado com água de poço (548,10 mg kg⁻¹), APT por filtração (490,13 mg kg⁻¹) e APT por osmose reversa (396,27 mg kg⁻¹).

A concentração de Zn apresentou valor máximo e valor mínimo nos tratamentos D100 (147,10 mg kg⁻¹) e D75 (113,08 mg kg⁻¹), respectivamente. Nenhum dos contrastes ortogonais apresentou diferença significativa para este elemento.

Weber et al. (2017) observaram efeito positivo na concentração de Zn nas raízes no segundo ciclo do girassol irrigado com água produzida tratada por osmose reversa (24,87 g kg⁻¹) em comparação com a planta irrigado com água de aquífero (21,77 g kg⁻¹).

As concentrações de Na variaram de 5,05 a 44,24 g kg⁻¹, sendo o valor máximo observado no tratamento D100. De acordo com o teste de média, o tratamento D50 diferiu do tratamento D100, não diferindo dos demais tratamentos. Apenas o contraste C1 apresentou diferença estatística, a 1% de significância, indicando que o tratamento de maior proporção de APT diferiu da combinação dos demais tratamentos.

Uma variação pequena de Na (5,46 a 6,09 g kg⁻¹) foi encontrada em raízes de palma forrageira irrigada com diluições de APT em experimento realizado por Costa (2019). Já Sousa et al. (2016) observou os seguintes teores de Na nas raízes no primeiro ciclo do girassol irrigado com água produzida tratada por osmose reversa e filtração, e água poço, respectivamente: 10,08, 27,99 e 22,08 g kg⁻¹.

4.5 Capacidade de fitoextração do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada

4.5.1 Fator de Translocação

Os valores médios dos fatores de translocação (FT) do girassol aos 90 DAT, para o manganês (Mn), ferro (Fe), zinco (Zn) e sódio (Na) estão dispostos na Tabela 19. Também

estão dispostos a média, coeficiente de variação (CV), erro padrão, probabilidade (p-valor) e probabilidade dos contrastes ortogonais.

Tabela 19 – Fator de translocação (FT) do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada.

Fontes de variação	Fator de translocação			
	Mn	Fe	Zn	Na
Probabilidade do fator diluição	0,544 ^{NS}	0,471 ^{NS}	0,680 ^{NS}	0,023*
CV (%)	127,93	153,17	129,63	108,01
Média	0,620	0,661	0,568	0,693
Erro-padrão	0,355	0,452	0,329	0,335
Diluições	Comparação da médias (Teste Tukey)			
D0	0,840	1,376	0,778	1,728 b
D25	1,056	0,674	0,894	0,746 ab
D50	0,518	0,332	0,402	0,742 ab
D75	0,362	0,284	0,444	0,142 a
D100	0,326	0,638	0,324	0,108 a
Contrastes	Probabilidade dos contrastes			
	Mn	Fe	Zn	Na
C ₁ : D100 Vs (D0+D25+D50+D75)	0,329 ^{NS}	0,881 ^{NS}	0,375 ^{NS}	0,057 ^{NS}
C ₂ : D75 Vs (D0 + D25 + D50)	0,263 ^{NS}	0,298 ^{NS}	0,468 ^{NS}	0,024*
C ₃ : D50 Vs (D0 + D25)	0,34 ^{NS}	0,229 ^{NS}	0,298 ^{NS}	0,245 ^{NS}
C ₄ : D25 Vs D0	0,368 ^{NS}	0,290 ^{NS}	0,810 ^{NS}	0,054 ^{NS}

Nota: D0 – Somente água subterrânea (AS), D25 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (APT), D50 – 50% de AS e 50% de APT, D75 – 25% de AS e 75% de APT, e D100 –somente APT; C₁ = 12 m₁ + 12 m₂ + 8 m₃ + 10 m₄ – 42 m₅; C₂ = 30 m₁ + 30 m₂ + 20 m₃ - 80 m₄; C₃ = 6 m₁ + 6 m₂ - 12 m₃; C₄ = 6 m₁ - 6 m₂

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

** e * Significativo a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

NS - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

O FT para o Mn variou de 0,326 a 1,056, valores correspondentes aos tratamentos D100 e D25 respectivamente. Não houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5 % de probabilidade. Não houve significância entre os contrastes ortogonais. Apenas o tratamento D25 apresentou valor maior que 1, indicando que houve translocação das raízes para as folhas apenas neste tratamento. Costa (2019) observaram alta translocação de Mn realizada pela palma forrageira em experimento utilizando diluições de água produzida como água de irrigação.

Para o Fe os valores de FT dos tratamentos que receberam APT ficaram abaixo de 1, indicando que não houve translocação de Fe das raízes para as partes aéreas. A diferença entre os tratamentos não foi significativa. Também não foi encontrada significância nos contrastes ortogonais. Ismail et al. (2019) encontraram resultados semelhantes ao estudar FTs de Fe para

Scirpus grossus exposta à diferentes proporções de Fe^{2+} e Al^{3+} em efluente sintético de mineração, observando valores menores que 1 para todos os tratamentos.

Os valores FT para o Zn não apresentaram significância entre os tratamentos pelo Teste de Tukey a 5 %. Os valores variaram de 0,324 a 0,894, denotando que não ocorreu transporte desse elemento do sistema radicular para as folhas do girassol, já que esses valores são menores que 1. A análise contrastes não mostrou diferença estatística em nenhum dos contrastes. Zelaya (2020) calculou o FT do Zn para o melão cultivado em solo contaminado por metais pesados, o autor encontrou os seguintes valores para o caule, folha e fruto, respectivamente, ao final do ciclo da cultura: 0,29, 0,51 e 0,48.

Quanto ao Na, o FT variou de 0,108 (D100) a 1,728 (D0), apresentando comportamento decrescente com as proporções de APT. Com exceção de D0, foram calculados FTs abaixo de 1, portanto, não houve translocação de Na nos tratamentos D25 a D100. Foi observada diferença estatística entre as médias, de forma que D0 diferiu de D75 e D100, e não diferiu dos demais tratamentos. Apenas o contraste C2 foi significativo, indicando que D75 difere estatisticamente da combinação de D50, D25 e D0. Esses resultados mostram a planta foi capaz de translocar o Na apenas quando foi irrigada com D0.

Esses resultados diferem dos encontrados por Costa (2018) que observou valores de FT maiores que 1 para o Na nas quatro diluições de APT (25, 50, 75 e 100 %) e no tratamento controle, não encontrando diferença estatística entre as médias dos tratamentos.

4.5.2 Fator de Bioacumulação

Os fatores de bioacumulação médios para os elementos manganês (Mn), ferro (Fe), zinco (Zn) e sódio (Na), bem como seus respectivos coeficientes de variação (CV), erro padrão e probabilidade pelo teste F, estão dispostos na Tabela 20.

Os valores máximo e mínimo de FB para o Mn foram observados em D25 e em D75. Os valores foram maiores que 1, indicando que houve bioacumulação deste elemento. Porém, não foi encontrada significância entre as médias. Não foi observado efeito estatistíssimo na análise de contrastes ortogonais. O mesmo resultado foi observado por Costa (2018), em estudo que mostrou bioacumulação de Mn por plantas de girassol irrigado com diluições de água produzida.

Tabela 20 – Fator de bioacumulação (FB) do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada.

Fontes de variação	Fator de bioacumulação			
	Mn	Fe	Zn	Na
Probabilidade do fator diluição	0,366 ^{NS}	0,173 ^{NS}	0,541 ^{NS}	0,395 ^{NS}
CV (%)	44,47	61,55	39,65	102,85
Média	42,77	292,54	643,23	0,123
Erro-padrão	8,506	80,524	114,05	0,057
Diluições	Comparação da médias (Teste Tukey)			
D0	45,67	317,68	587,58	0,138
D25	53,14	168,50	702,13	0,140
D50	28,04	191,15	574,70	0,034
D75	42,94	414,80	556,72	0,108
D100	44,06	370,56	795,03	0,196
Contrastes	Probabilidade dos contrastes			
	Mn	Fe	Zn	Na
C ₁ : D100 Vs (D0+D25+D50+D75)	0,978 ^{NS}	0,301 ^{NS}	0,168 ^{NS}	0,204 ^{NS}
C ₂ : D75 Vs (D0 + D25 + D50)	0,911 ^{NS}	0,065 ^{NS}	0,601 ^{NS}	0,952 ^{NS}
C ₃ : D50 Vs (D0 + D25)	0,057 ^{NS}	0,606 ^{NS}	0,622 ^{NS}	0,156 ^{NS}
C ₄ : D25 Vs D0	0,543 ^{NS}	0,209 ^{NS}	0,488 ^{NS}	0,967 ^{NS}

Nota: D0 – Somente água subterrânea (AS), D25 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (APT), D50 – 50% de AS e 50% de APT, D75 – 25% de AS e 75% de APT, e D100 –somente APT; C₁ = 12 m₁ + 12 m₂ + 8 m₃ + 10 m₄ – 42 m₅; C₂ = 30 m₁ + 30 m₂ + 20 m₃ - 80 m₄; C₃ = 6 m₁ + 6 m₂ - 12 m₃; C₄ = 6 m₁ - 6 m₂

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

** e * Significativo a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

NS - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

O valor mais elevado de FB para o Fe foi observado no tratamento D75 (414,80). De acordo com o valor de FB pode-se classificar o girassol H-251 como bioacumuladora de Fe. Não foi observada diferença significativa entre os tratamentos. Nenhum dos contrastes ortogonais apresentou significância. Valores de FB de Fe superiores a 1, para *Scirpus grossus* exposto a um efluente sintético de mineração (mistura de ferro e alumínio), foram relatados por Ismail et al. (2019).

Todos os valores de FB para o Zn foram maiores que 1, indicando bioacumulação deste elemento nos tecidos do girassol em todos os tratamentos. No entanto, não houve efeito significativo entre as médias a 5 % pelo Teste de Tukey. Não correu significância nos os contrastes analisados. Zelaya (2020) verificou fatores de bioacumulação do Zn de 1,27, 2,02 e 0,71 aos 30, 45 e 60 dias do ciclo do melão cultivado em solo contaminado com metais pesados.

Os valores de FB para o Na variaram entre 0,034 e 0,196, denotando que o girassol não bioacumulou esse elemento. Não foi encontrada diferença estatística entre os tratamentos, tampouco nos contrastes ortogonais. Resultado diferente ocorreu no estudo de Costa (2019),

em que a palma forrageira apresentou capacidade de bioacumular o Na, visto que seu FB em todos os tratamentos foi maior que 1.

5 CONCLUSÕES

As aplicações contínuas de diluições de água produzida tratada promoveram o aumento do diâmetro do caule e do capítulo em 77 % e 65 % considerando seus valores máximos, respectivamente, provocando também um maior aporte de Zn nas folhas e de Na nas raízes.

Se tratando dos efeitos da água produzida nos atributos físico-químicos analisados no solo, não houve influência das diluições para nenhum dos atributos estudados. No entanto, ao se analisar os tratamentos nas duas profundidades, foi observada diferença entre as profundidades para CE_{es} , K, Na, Mg, Fe, Mn, Zn e Cu, nos quais ocorreu redução dos teores da profundidade mais superficial para a mais profunda, exceto o Cu.

A faixa de pH observada no solo não é a mais favorável ao desenvolvimento das plantas, no entanto, essa faixa também diminuiu a disponibilidade dos metais pesados no solo, protegendo-o de contaminação ambiental.

O girassol H-251 não foi capaz de translocar nenhum dos elementos estudados. No entanto, foi capaz de bioacumular Mn, Fe e Zn, sendo que os tratamentos não influenciaram significativamente nessa capacidade.

Neste estudo, considerando os efeitos no solo e na planta, a diluição que melhor se adequa ao semiárido nordestino é a que recebeu 100 % de água produzida, visto que promoveu menor aporte de Na no solo, e não comprometeu as características produtivas e morfométricas da planta. Porém, se faz necessários novas pesquisas que analisem os efeitos de outros componentes desse efluente no solo e na planta, tais como hidrocarbonetos e outros metais pesados.

6 REFERÊNCIAS

- Abdelfattah, I.; Ismail, A. A.; Sayed, F. Al, Almedolab, A.; Aboelghait, K. M. Biosorption of heavy metals ions in real industrial wastewater using peanut husk as efficient and cost effective adsorbent. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, v.6, p.176–183, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.10.007>
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. Dados Estatísticos: produção por poço 2020. Rio de Janeiro: ANP, 2021. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- Alaboudi, K. A.; Ahmed, B.; Brodie, G. Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*Helianthus annuus*) plant. *Annals of Agricultural Sciences*, v.63, p.123–127, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2018.05.007>
- Al-Ghouti, M. A.; Al-Kaabi, M. A.; Ashfaq, M. Y.; Da'na, D. A. Produced water characteristics, treatment and reuse: A review. *Journal of Water Process Engineering*, v. 28, p. 222–239, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.02.001>
- Al-Jobori, K. M.; Kadhim, A. K. Evaluation of sunflower (*Helianthus annuus* L.) for phytoremediation of lead contaminated soil. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, v.11, p.847–854, 2019.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D; Smith, M. Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 2006. 298p.
- Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, p. 711–728, 2013.
- Alves, L. S. Remoção de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos de efluentes líquidos por adsorção em carvões ativados. Rio de Janeiro: UERJ. 2018. 180f. Tese (Doutorado em Engenharia Química).
- Ammar, S. H.; Akbar, A. S. Oilfield produced water treatment in internal-loop airlift reactor using electrocoagulation/flotation technique. *Chinese journal of chemical engineering*, v.26, p.879-885, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.07.020>
- Araújo, A. D. S.; Silva, D. J.; Silva, A. V. S.; Magalhães, I. C. S.; Barros, R. P. Análise da fenologia do Girassol *Helianthus annuus* L. variedade anão. *Diversitas Journal*, v.3, p.184, 2018. <https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v3i2.602>
- Ashraf, S.; Ali, Q.; Zahir, Z. A.; Ashraf, S.; Asghar, H. N. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v.174, p.714–727, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>
- Asim, N.; Amin, M. H.; Samsudin, N. A.; Badiei, M.; Razali, H.; Akhtaruzzaman, M.; Amin, N.; Sopian, K. Development of effective and sustainable adsorbent biomaterial from an agricultural waste material: Cu(II) removal. *Materials Chemistry and Physics*, v.249, p.123128, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123128>

- Assunção, M. V. D.; Vieira, M. M.; Almeida, M. R. Fatores influenciadores na produção indesejada da água produzida de petróleo: um estudo na bacia Potiguar/Brasil. *HOLOS*, v.2, p.146–160, 2018. <https://doi.org/10.15628/holos.2018.6479>
- Atia, F. A.; Al-Ghouti, M. A.; Al-Naimi, F.; Abu-Dieyh, M.; Ahmed, T.; Al-Meer, S. H. Removal of toxic pollutants from produced water by phytoremediation: Applications and mechanistic study. *Journal of Water Process Engineering*, v.32, p.15, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100990>
- Ayers, R. S.; Westcot, D. W. *Water quality for agriculture* (Vol. 29). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1985.174 p.
- Baby, R.; Saifullah, B.; Hussein, M. Z. Palm Kernel Shell as an effective adsorbent for the treatment of heavy metal contaminated water. *Scientific Reports*, v.9, p.18955, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55099-6>.
- Baird, R. B.; Eaton, A. D.; Rice, E. W. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23.ed. Washington: APHA, AWWA, WPCR, 2017. 1504p.
- Bataglia, O. C.; Furlani, A. M. C.; Teixeira, J. P. F.; Furlani, P. R.; Gallo, J. R. Métodos de análise química de plantas. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 48p. (Boletim Técnico, 78).
- Benavides, B. J.; Drohan, P. J.; Spargo, J. T.; Maximova, S. N.; Gultinan, M. J.; Miller, D. A. Cadmium phytoextraction by *Helianthus annuus* (sunflower), *Brassica napus* cv Wichita (rapeseed), and *Chrysopogon zizanioides* (vetiver). *Chemosphere*, v.265, p.129086, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129086>
- Bhatla, S. C. Water and solute transport. In: Bhatla, S. C.; Lal, M. A. *Plant physiology, development and metabolism*. Singapore: Springer, 2018. Cap.3, p. 83-115. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1_3
- Bohn, H.L.; McNeal, B.L.; O'Connor, G.A. *Soil chemistry*. New York, John Wiley & Sons, 1985. 341p.
- Braga, M. B.; Lima, C. E. P. *Reúso de água na agricultura*. 1 ed. Brasília: Embrapa, 2014, 200p.
- Brasil, 1997. Lei nº 9.478 de 6 de agosto de 1997. Dispõe sobre a Política Energética Nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional de Petróleo e dá outras providências. *Diário Oficial*, Brasília, 1997.
- Brasil, 2005. Resolução CNRH nº 54 de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. *Diário Oficial*, Brasília, 2005.
- Brasil, 2007. Resolução nº 393 de 8 de agosto de 2007. Dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, e dá outras providências. *Diário Oficial*, Brasília, 2007.
- Brasil, 2009. Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas

por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial, Brasília, 2009.

Brasil, 2010. Resolução CNRH nº 121 de 16 de dezembro de 2010. Estabelece diretrizes e critérios para a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal, definida na Resolução CNRH no 54, de 28 de novembro de 2005. Diário Oficial, Brasília, 2010.

Brasil, 2011a. Portaria nº 422, DE 26 DE OUTUBRO DE 2011. Dispõe sobre procedimentos para o licenciamento ambiental federal de atividades e empreendimentos de exploração e produção de petróleo e gás natural no ambiente marinho e em zona de transição terra-mar. Diário Oficial, Brasília, 2011a.

Brasil, 2011b. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Diário Oficial, Brasília, 2011b.

Brasil, 2021. Resolução CONAMA nº 403, de 14 de dezembro de 2021. Define critérios e procedimentos para o reúso em sistemas de fertirrigação de efluentes provenientes de indústrias de alimentos, bebidas, laticínios, frigoríficos e graxarias. Diário Oficial, Brasília, 2021.

Brasil, N. I. do; Araújo, M. A. S.; Souza, E. C. M. de. Processamento de petróleo e gás. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014, 292p.

Brasil. Lei nº 12.351, de 22 de dezembro de 2010. Dispõe sobre a exploração e a produção de petróleo, de gás natural e de outros hidrocarbonetos fluidos, sob o regime de partilha de produção, em áreas do pré-sal e em áreas estratégicas; cria o Fundo Social - FS e dispõe sobre sua estrutura e fontes de recursos; altera dispositivos da Lei no 9.478, de 6 de agosto de 1997; e dá outras providências. Publicação Diário Oficial, Poder executivo, Brasília, 2010.

Carmo, C. A. F. de S.; Araújo, W. S. de; Bernardi, A. C. de C.; Saldanha, M. F. C. Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2000. 41 p. (Circular Técnica, n.06).

Carvalho, L. M.; Carvalho, H. W. L.; Carvalho, C. G. P. Yield and photosynthetic attributes of sunflower cultivars grown under supplemental irrigation in the semiarid region of the Brazilian Northeast. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.55, p.1–9, 2020. <https://doi.org/10.1590/s1678-3921.pab2020.v55.01715>

Carvalho, L. M.; Oliveira, I. R.; Carvalho, H. W. L.; Carvalho, C. G. P.; Marques, M. G.; Porto, E. S. Produtividade do Girassol em Função da Disponibilidade de Umidade. *Embrapa*, v.106, p.37, 2016a.

Carvalho, P. C. A. P. Tratamento combinado de água produzida: filtração, adsorção e foto-Fenton. Natal: UFRN, 2016b.184p. Tese Doutorado.

Cavaco, P. C. C. Gestão de Tratamento de Efluentes e Recursos Hídricos em Instalações de produção de Petróleo Terrestres, com Enfoque em Novas Tecnologias. Niterói: UFF. 2004. 129f. Dissertação Mestrado.

- Ceará. Resolução COEMA nº 2 de 2 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, revoga as Portarias SEMACE nº 154, de 22 de julho de 2002 e nº 111, de 05 de abril de 2011, e altera a Portaria SEMACE nº 151, de 21 de fevereiro de 2017. Diário Oficial do Estado do Ceará, Fortaleza, 2017.
- Coelho, D. C. L.; Medeiros Júnior, A. O.; Silva, K. B.; Dias, N. S.; Batista, R. O. Fertigation of sunflower crops using landfill leachate. *Revista Caatinga*, v.31, p. 944–953, 2018. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018V31N417RC>
- Colodete, C. M. Fluxo molecular e iônico das proteínas de transporte em membranas. *Biológicas e Saúde*, v.3, p.43-52,2013. <https://doi.org/10.25242/8868311201311>
- Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. Série Histórica - Custos - Girassol 1ª e 2ª Safras - 2013 a 2020. Disponível em: <www.conab.gov.br> Acesso em: 08 mai. 2021.
- Costa, D. O. Utilização de água produzida do petróleo na produção e capacidade de fitoextração de cactácea no semiárido brasileiro. Mossoró: UFERSA, 2019. 135 f. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água).
- Costa, D. O.; Vale, H. S. M.; Batista, R. O.; Travassos, K. D.; Portela, J. C. Chemical characteristics of soil irrigated with produced water treatment and underground water. *DYNA*, v.86, p.143–149, 2019. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.79115>
- Costa, D. O.; Vale, H. S. M.; Batista, R. O.; Travassos, K. D.; Gurgel, M. T.; Lemos Filho, L. C. A. Metal contents in soils irrigated with diluted treated produced water from oil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.24, p.672–678, 2020. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n10p672-678>
- Costa, F. G. B. Produção e capacidade de fitoextração do girassol (*Heliantus annuus*) irrigado com água produzida. Mossoró: UFERSA. 2018. 92f. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água).
- Costa, F. G. B.; Batista, R. O.; Pereira, J. O.; Neto, M. F.; Alves, S. M. C.; Simões, W. L.; Souza, L. Di; Pordeus, R. V. Productive and morphogenetic characteristics of sunflower irrigated with domestic treated wastewater on northeast semiarid area. *Australian Journal of Crop Science*, v.12, p.1184–1190, 2018. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.07.PNE1158>
- Crisóstomo, L. A.; Weber, O. B.; Miranda, F. R. de, Aragão, F. A. S.; Bezerra, F. C.; Mosca, J. L. Reuso da água produzida na irrigação do abacaxizeiro ornamental: efeitos sobre as características químicas do solo. *Embrapa*, v.158, p.27, 2018.
- Crisóstomo, L. A.; Weber, O. B.; Miranda, F. R.; Aragão, F. A. S.; Oliveira, M. E. B. Irrigação com Água Produzida: Efeitos sobre Características do Solo e a Produção do Girassol. *Embrapa*, v. 120, p.37, 2016.
- Crisóstomo, L. A.; Weber, O. B.; Miranda, F. R.; Aragão, F. A. S.; Bezerra, F. C.; Mosca, J. L. Reuso da água produzida na irrigação do abacaxizeiro ornamental: efeitos sobre as características químicas do solo. *Embrapa*, v.158, p.27, 2018.

- Cunha, L. S., Duarte Júnior, J. B.; Shimada; B. S.; Simon, M. V. Efeito da aplicação de boro na produtividade do girassol. *Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente*, v.2, p.10, 2021. <https://doi.org/10.51189/rema/1595>
- Dias, N. S.; Blanco, F. F. Efeitos dos sais no solo e na planta. In: Gheyi, H. R.; Dias, N.S.; Lacerda, C. F. *Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados*. Fortaleza: INST Sal, 2010. Cap. 9, p. 129-144.
- Dickhout, J. M.; Moreno, J.; Biesheuvel, P. M.; Boels, L.; Lammertink, R. G. H.; Vos, W. M. de. Produced water treatment by membranes: A review from a colloidal perspective. *Journal of Colloid and Interface Science*, v.487, p.523–534, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.10.013>
- Dolan, F. C.; Cath, T. Y.; Hogue, T. S. Assessing the feasibility of using produced water for irrigation in Colorado. *Science of The Total Environment*, v.640, p.619-628, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.200>
- Echchelh, A.; Hess, T.; Sakrabani, R. Reusing oil and gas produced water for irrigation of food crops in drylands. *Agricultural Water Management*, v.206, p.124–134, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.006>
- Echchelh, A.; Hess, T.; Sakrabani, R.; Prigent, S.; Stefanakis, A. I. Towards agro-environmentally sustainable irrigation with treated produced water in hyper-arid environments. *Agricultural Water Management*, p.243, v.12, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106449>
- Farias, J. P.; Loebens, L.; Demarco, C. F.; Cadaval Junior, T. R. S.; Quadro, M. S.; Andrezza, R. Post-treatment of landfill leachate using rice husk ash as adsorbent medium. *Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v.14, p.1-8, 2019. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2350>
- Feitosa, H. D. O.; Farias, G. C.; Silva Júnior, R. J. C.; Ferreira, F. J.; Andrade Filho, F. L.; Lacerda, C. F. Influência da adubação borácica e potássica no desempenho do girassol. *Science with Quality*, v.4, p.302-307, 2013.
- Ferreira, A. K. C. Avaliação de métodos de análises químicas de nutrientes em tecido vegetal. Mossoró: UFERSA, 2014. 88p. Dissertação Mestrado.
- Ferreira, D. F. Sisvar: A computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, n. 1, p.1039-1042, 2011.
- Ferreira, P. A. A.; Lourenzi, C. R.; Tiecher, T.; Tiecher, T. L.; Ricachenevsky, F. K.; Brunetto, G.; Giachini, A. J.; Soares, C. R. F. S. Physiological, Biochemical Changes, and Phytotoxicity Remediation in Agricultural Plant Species Cultivated in Soils Contaminated with Copper and Zinc. In: Hasanuzzaman, M.; Nahar, K.; Fujita, M. *Plants Under Metal and Metalloid Stress*. Singapore: Springer, 2018. Cap. 2, p. 29–76. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2242-6_2
- Figueredo, K. S. L. de, Martínez-Huitle, C. A.; Teixeira, A. B. R.; Pinho, A. L. S. de, Vivacqua, C. A.; Silva, D. R. da. Study of produced water using hydrochemistry and multivariate statistics in different production zones of mature fields in the Potiguar Basin–Brazil. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v.116, p.109-114, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2013.10.018>

- Finkler, R.; Pedroso, R. M.; Stein, R. T.; Lazzarini, P. R. C. *Ciência do solo e fertilidade*. 1.ed. Porto Alegre: Sagah, 2018. 240p.
- Glinski, J.; Lipiec, J. *Soil Physical Conditions and Plant Roots*. 1.ed. Lublin: CRC Press, 2018. 250p. <https://doi.org/10.1201/9781351076708>
- Hisham, S.; Ayub Khan, F.; Aljlil, S. A.; Ghasemi, M. Investigating new techniques for the treatment of oil field produced water and energy production. *SN Applied Sciences*, v.1, p.646, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0636-8>
- Hussain, M.; Farooq, S.; Hasan, W.; Ul-Allah, S.; Tanveer, M.; Farooq, M.; Nawaz, A. Drought stress in sunflower: Physiological effects and its management through breeding and agronomic alternatives. *Agricultural Water Management*, v.201, p.152–166, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.028>
- Jiménez, S.; Andreozzi, M.; Micó, M. M.; Álvarez, M. G.; Contreras, S. Produced water treatment by advanced oxidation processes. *Science of The Total Environment*, v.666, p.12–21, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.128>
- Jiménez, S.; Micó, M. M.; Arnaldos, M.; Medina, F.; Contreras, S. State of the art of produced water treatment. *Chemosphere*, v.192, p.186–208, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.139>
- Kabyl, A.; Yang, M.; Abbassi, R.; Li, S. A risk-based approach to produced water management in offshore oil and gas operations. *Process Safety and Environmental Protection*, v.139, p.341–361, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.021>
- Kerbauy, G. B. *Fisiologia Vegetal*. 3ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2019.
- Leil, I. M. A. El, Mezughi, K. M.; Triki, N. M.; Altayeb, S. A. Physiochemical characteristics of produced water in oilfields and its environmental impacts. *International Journal of Scientific Development and Research*, v.6, p.288–300, 2021.
- Lemos, M. *Uso de esgoto doméstico tratado na produção de palma forrageira em assentamento rural do semiárido brasileiro*. Mossoró: UFERSA, 2016. 244p. Tese Doutorado.
- Li, G.; Bai, B.; Carlson, K. H. Characterization of solids in produced water from wells fractured with recycled and fresh water. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v.144, p.91-98, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.03.011>
- Liu, Y.; Lu, H.; Li, Y.; Xu, H.; Pan, Z.; Dai, P.; Wang, H.; Yang, Q. A review of treatment technologies for produced water in offshore oil and gas fields. *Science of The Total Environment*, v.775, p.16. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145485>
- Liu, Z.; Wang, H.; Xu, R. The effects of root surface charge and nitrogen forms on the adsorption of aluminum ions by the roots of rice with different aluminum tolerances. *Plant and Soil*, v.408, p.43–53, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2909-y>
- Mahmood-ul-Hassan, M.; Suthar, V.; Ahmad, R.; Yousra, M. Heavy metal phytoextraction—natural and EDTA-assisted remediation of contaminated calcareous soils by sorghum and oat. *Environmental Monitoring and Assessment*, v.189, p.10, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6302-y>

- Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- Martins, D. F. F. Estudo integrado do potencial fitorremediador da *Eichhornia crassipes* em ambientes naturais e sua utilização para obtenção de extratos proteicos. Natal: UFRN. 2014. 162 f. Tese (Doutorado em Química).
- McLaughlin, M. C.; Borch, T.; McDevitt, B.; Warner, N. R.; Blotvogel, J. Water quality assessment downstream of oil and gas produced water discharges intended for beneficial reuse in arid regions. *Science of The Total Environment*, v.713, p.1–12, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136607>
- Meire, R. O.; Azeredo, A., Paulo, J.; Torres, M. Ecotoxicology aspects from policyclic aromatic hydrocarbons. *Oecologia Australis*, v.11, p.188–201, 2007.
- Melo, M. R. S.; Dias, N. S.; Medeiros, I. J. N.; Travassos, K. D.; Miranda, N. de O.; Gurgel, M. T.; Lemos Neto, H. de S.; Fernandes, C. S. Strategies for applying gray water effluent on ornamental sunflower crops. *Environmental Science and Pollution Research*, v.27, p.38537–38544, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09200-6>
- Menkiti, M. C.; Ndaji, C. R.; Ezemagu, I. G. Deturbidization of petroleum-produced water by novel mucuna seed: Characterization, kinetics, and statistical analyses. *Water Conservation Science and Engineering*, v.2, p.67-83,2017. <https://doi.org/10.1007/s41101-017-0027-1>
- Miller, H.; Dias, K.; Hare, H.; Borton, M. A.; Blotvogel, J.; Danforth, C. Wrighton, K. C.; Ippolito, J. A.; Borch, T. Reusing oil and gas produced water for agricultural irrigation: Effects on soil health and the soil microbiome. *Science of the Total Environment*, v.722, p.9, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137888>
- Nasiri, M.; Jafari, I. Produced Water from Oil-Gas Plants: A Short Review on Challenges and Opportunities. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, v.61, p.73–81, 2016. <https://doi.org/10.3311/PPch.8786>
- Novais, R. F.; Alvarez, V. V. H.; Barros, N. F.; Fontes, R. L. F.; Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS, 2007. 1017p.
- Nguyen, H. H.; Maneepong, S.; Suraninpong, P. Effects of Potassium, Calcium, and Magnesium Ratios in Soil on Their Uptake and Fruit Quality of Pummelo. *Journal of Agricultural Science*, v.9, p.110, 2017. <https://doi.org/10.5539/jas.v9n12p110>
- Nunes, C. R. de O. Ocorrência de poluentes orgânicos voláteis e semi- voláteis com potencial tóxico em ambientes internos. Campos dos Goytacazes: UENF. 2018. 197f. Tese (Doutorado em Ciências Naturais).
- Olajire, A. A. Recent advances on the treatment technology of oil and gas produced water for sustainable energy industry-mechanistic aspects and process chemistry perspectives. *Chemical Engineering Journal Advances*, v.4, p.25, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.100049>
- Oliveira Junior, H. S. Monitoramento e mapeamento das águas subterrâneas de abastecimento urbano do município de Mossoró-RN. Mossoró: UFRSA. 2016. 87f. Dissertação (Mestrado em Manejo de Solo e Água).

- Pica, N. E.; Carlson, K.; Steiner, J. J.; Waskom, R. Produced water reuse for irrigation of non-food biofuel crops: Effects on switchgrass and rapeseed germination, physiology and biomass yield. *Industrial Crops and Products*, v.100, p.65–76, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.02.011>
- Pilorgé, E. Sunflower in the global vegetable oil system: situation, specificities and perspectives. *Oilseeds and Fats, Crops and Lipids*, v.27, p.34, 2020. <https://doi.org/10.1051/ocl/2020028>
- Rêgo, L. G. S. Uso de efluente da piscicultura na produção de girassol ornamental. In *Advanced Optical Materials*. Mossoró: UFERSA, 2018. 48p. Dissertação Mestrado.
- Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Venegas, V. H. A. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação. Viçosa-MG: CFSEMG, 1999. 359p.
- Richards, L. A. *Diagnosis and improvement of saline and álcali soils*. Washington-US: Department of Agriculture, 1954. 160p. (USDA Agricultural Handbook, 60).
- Rio Grande do Sul. Resolução CONSEMA nº149 de fevereiro de 2020. Estabelece critérios e procedimentos para a utilização de água de reúso para fins urbanos, industriais, agrícolas e florestais no Estado do Rio Grande do Sul. *Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, 2017.
- Sajad, M. A., Khan, M. S., Bahadur, S., Naeem, A., Ali, H., Batool, F., Shuaib, M., Khan, M. A. S., & Batool, S. (2020). Evaluation of chromium phytoremediation potential of some plant species of Dir Lower, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Acta Ecologica Sinica*, 40(2), 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2019.12.002>
- Sandri, D.; Matsura, E. E.; Testezlaf, R. Teores de nutrientes na alface irrigada com água residuária aplicada por sistemas de irrigação. *Engenharia Agrícola*, p.26, v.45–57, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162006000100006>
- Santana, J. S.; Santos, B. R.; Resende, B. de O. Utilização da casca de banana como bioadsorvente para adsorção de metais pesados viabilizando sua utilização em águas residuárias da indústria galvânica. *INOVAE*, v.8, p.143–157, 2020.
- Santos, A. P.; Tartaglia, F. D. L.; Souza, A. R. E.; Santos, M. G.; Silveira, L. M.; Barros Júnior, A. P. B. Sunflower fertigated with potassium fertilization in two agricultural seasons in the Brazilian semiarid region1. *Revista Ciencia Agronomica*, v.51, p.1-9, 2020. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200023>
- Santos H. G.; Jacomine, P. K. T.; Anjos, L. H. C.; Oliveira, V. Á.; Lumbreras, J. F.; Coelho, M. R.; Almeida, J. A.; Araújo Filho, J. C.; Oliveira, J. B.; Cunha, T. J. F. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed., rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p
- Sappington, E. N.; Rifai, H. S. Low-frequency electromagnetic treatment of oilfield produced water for reuse in agriculture: effect on water quality, germination, and plant growth. *Environmental Science and Pollution Research*, v.25, p.34380–34391, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3343-x>
- Saravanan, A.; Jayasree, R.; Hemavathy, R. V.; Jeevanantham, S.; Hamsini, S.; Senthil Kumar, P.; Yaashikaa, P. R.; Manivasagan, V.; Yuvaraj, D. Phytoremediation of Cr(VI)

- ion contaminated soil using Black gram (*Vigna mungo*): Assessment of removal capacity. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v.7, p.7, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103052>
- Scanlon, B. R.; Reedy, R. C.; Xu, P.; Engle, M.; Nicot, J. P.; Yoxtheimer, D.; Yang, Q.; Ikonnikova, S. Can we beneficially reuse produced water from oil and gas extraction in the U.S.? *Science of the Total Environment Journal*, v.717, p.12, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137085>
- Sedlacko, E. M.; Chaparro, J. M.; Heuberger, A. L.; Cath, T. Y.; Higgins, C. P. Effect of produced water treatment technologies on irrigation-induced metal and salt accumulation in wheat (*Triticum aestivum*) and sunflower (*Helianthus annuus*). *Science of The Total Environment*, v.740, p.13, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140003>
- Sedlacko, E. M.; Jahn, C. E.; Heuberger, A. L.; Sindt, N. M.; Miller, H. M.; Borch, T.; Blaine, A. C.; Cath, T. Y.; Higgins, C. P. Potential for beneficial reuse of oil-and-gas-derived produced water in agriculture: physiological and morphological responses in spring wheat (*Triticum aestivum*). *Environmental Toxicology and Chemistry*, v.38, p.1756–1769, 2019. <https://doi.org/10.1002/etc.4449>
- Shah, V.; Daverey, A. Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. *Environmental Technology Innovation*, v.18, p.16, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.100774>
- Silva, F. C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.
- Silva, P. V.; Nascimento, P. S. Salinidade do solo e desenvolvimento do girassol submetido à irrigação com água de diferentes qualidades. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, v.7, p.255–269, 2019. <https://doi.org/10.9771/gesta.v7i2.33080>
- Simões, W. L.; Silva, J. S.; Oliveira, A. R.; Regitano Neto, A.; Drumond, M. A.; Lima, J. A.; Nascimento, B. R. Sunflower cultivation under different irrigation systems and planting spacings in the sub-middle region of São Francisco Valley. *Semina: Ciências Agrárias*, v.41, p.2899–2910, 2020. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2020v41n6Supl2p2899>
- Sousa, A. F.; Crisostomo, L. A.; Weber, O. B.; Escobar, M. E. O.; Oliveira, T. S. Nutrient content in sunflowers irrigated with oil exploration water. *Caatinga*, v.29, p.94-100, 2016. <https://doi.org/10.1590/1983-21252016v29n111rc>
- Sousa, J. R. M.; Soares, L. A. A.; Sousa Júnior, J. R.; Maia, P. M. E.; Furtado, G. F. Maracajá, P. B. Germinação de sementes de girassol cv. BRS 321 umedecidas com solução salina. *Agropecuária Científica no Semiárido*, v.8, p.56-60, 2012. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v8i1.418>
- Souza, J. S. B.; Ferreira Júnior, J. M.; Simonelli, G.; Souza, J. R.; Góis, L. M. N.; Santos, L. C. L. Removal of oil contents and salinity from produced water using microemulsion. *Journal of Water Process Engineering*, v.38, p.9, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101548>
- Speight, J. G. (2014). *The Chemistry and Technology of Petroleum*. 5ed. New York: CRC Press, 2014. 913p.

- Srivastava, N. Phytoremediation of Toxic Metals/Metalloids and Pollutants by Brassicaceae Plants. In: Hasanuzzaman M. The Plant Family Brassicaceae. Singapore: Springer, 2020. p. 409-435. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6345-4_14
- Stein, P.; Melo Júnior, G.; Souza, L. C. Monitoring groundwater chemical composition at a experimental area irrigated with petroleum produced water. *Geochimica Brasiliensis*, v.33, p.24, 2019. <https://doi.org/10.21715/GB2358-2812.2019332197>
- Stewart, M.; Arnold, K. Produced water treatment field manual. Part 1 - Produced Water Treating Systems, p. 1-134. 2011.
- Suman, J.; Uhlik, O.; Viktorova, J.; Macek, T. Phytoextraction of Heavy Metals: A Promising Tool for Clean-Up of Polluted Environment? *Frontiers in Plant Science*, v.9, p.15, 2018. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01476>
- Sutradhar, A.; Lollato, R. P.; Butchee, K.; Arnall, D. B. Determining Critical Soil pH for Sunflower Production. *International Journal of Agronomy*, p.1-13, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/894196>
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I. M.; Murphy, A. (2021). *Fundamentos de fisiologia vegetal*. 1ed. Porto Alegre: Artmed, 2021. 528p. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br>>. Acesso em: 12 out. 2021.
- 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. 573 p.
- Tejada-Tovar, C.; Bonilla-Mancilla, H.; del Pino-Moreyra, J.; Villabona-Ortíz, A.; Ortega-Toro, R. Effect of the adsorbent dose in Pb(II) removal by using sugar cane bagasse: Kinetics and isotherms. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, v.19, p.1413-1423, 2020. <https://doi.org/10.24275/rmiq/IA1101>
- Thomas, J. E. *Fundamentos de engenharia de Petróleo*. 2ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. 286p.
- United States Environmental Protection Agency (US-EPA). *Clean Water Act*, Boston, 2007.
- Weber, O. B.; Crisostomo, L. A.; Miranda, F. R.; Sousa, A. F.; Mesquita, A. L. M.; Cabral, J. E. de O. Production of ornamental sunflower irrigated with oilfield produced water in the Brazilian semiarid region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.52, p.443-454, 2017. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2017000600008>
- Weschenfelder, S. E.; Borges, C. P.; Campos, J. C. Evaluation of membranes for the treatment of oilfield-produced water. *Revista Ambiente Água*, v.10, p.376-385, 2015. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1578>
- Yogafanny, E.; Utami, A.; A, K. E.; Nandari, W. W. Rapid Lava Sand Filtration for Decentralized Produced Water Treatment System in Old Oil Well Wonocolo. *Journal of the Civil Engineering Forum*, v.5, p.10, 2019. <https://doi.org/10.22146/jcef.43760>
- Yousef, R.; Qiblawey, H.; El-Naas, M. H. Adsorption as a Process for Produced Water Treatment: A Review. *Processes*, v.8, p.1657, 2020. <https://doi.org/10.3390/pr8121657>
- Zehra, A.; Sahito, Z. A.; Tong, W.; Tang, L.; Hamid, Y.; Khan, M. B.; Ali, Z.; Naqvi, B.; Yang, X. (2020). Assessment of sunflower germplasm for phytoremediation of lead-

polluted soil and production of seed oil and seed meal for human and animal consumption. *Journal of Environmental Sciences*, v.87, p.24–38.
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.05.031>

- Zelaya, C. R. I. Translocação de metais pesados em plantas de melão (*Cucumis melo*) cultivadas em um neossolo quartzarênico do estado do ceará. Fortaleza: UFC, 2020. 49p. Dissertação Mestrado.
- Zhang, B.; Bu, J.; Liang, C. Root Morphology and Growth Regulated by Mineral Nutrient Absorption in Rice Roots Exposed to Simulated Acid Rain. *Water, Air, Soil Pollution*, v. 227, p. 1-12, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3151-1>
- Zhang, M.; Wang, J.; Zhang, Z.; Song, Z.; Zhang, Z.; Zhang, G.; Zhang, B.; Wu, W. M. A field pilot-scale study of biological treatment of heavy oil-produced water by biological filter with airlift aeration and hydrolytic acidification system. *Environmental Science and Pollution Research*, v.23, p.4919-4930, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5721-y>
- Zhao, X.; Joo, J. C.; Lee, J.-K.; Kim, J. Y. Mathematical estimation of heavy metal accumulations in *Helianthus annuus* L. with a sigmoid heavy metal uptake model. *Chemosphere*, v.220, p.965–973, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.210>
- Zolghadr, E.; Firouzjaei, M. D.; Amouzandeh, G.; LeClair, P.; Elliott, M. The Role of Membrane-Based Technologies in Environmental Treatment and Reuse of Produced Water. *Frontiers in Environmental Science*, v.9, p.1–11, 2021.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.629767>

7 APÊNDICE A – METODOLOGIA UTILIZADA NA ANÁLISE DE DILUIÇÕES DE ÁGUA PRODUZIDA

Nas análises físico-químicas das amostras das diluições foram empregados os seguintes equipamentos e procedimentos:

- Determinação do pH e da condutividade elétrica (CE)

Procedimento experimental:

- Colocou-se em um copo descartável, aproximadamente, 25 mL da água a ser analisada;
- Em seguida, foi realizada a leitura em um peagâmetro e registrado o valor medido;
- A mesma amostra foi, então, conduzida ao condutivímetro, no qual foi medida e registrada a CE em dS m^{-1} .

- Determinação do sódio (Na^+) e potássio (K^+)

Procedimento experimental:

- Primeiramente, o fotômetro de chama foi ajustado com a solução padrão de Na e K, realizando-se a leitura dessas soluções que estimaram a curva;
- Em um copo descartável, foi retirada uma amostra de água de 25 mL a ser analisada;
- Em seguida, a amostra foi conduzida ao fotômetro de chama;
- Realizaram-se as leituras na escala do equipamento;
- Se o valor da leitura fosse superior ao último ponto da curva, haveria a necessidade de uma nova diluição da amostra, podendo ser efetuada retirando-se 1 mL e acrescentando 9 mL de água deionizada.

- Determinação do Cálcio (Ca^{2+})

Procedimento experimental:

- Foi adicionado 25 mL da amostra de água em um Erlenmeyer de 125 mL;
- Em seguida foi adicionado à amostra 3 mL da solução de KOH a 10%;
- Adicionou-se uma pitada de indicador Calcon (cor rosa);
- Realizou-se a titulação com a solução EDTA até ponto de viragem do rosa para azul;
- Registrou-se o volume gasto.

- Determinação do cálcio + magnésio ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)

Procedimento experimental:

- Foi adicionado 25 mL da amostra em um Erlenmeyer de 125 mL de capacida;

- Em seguida, adicionou-se à amostra 4 mL da solução de tampão (hidróxido de amônio + cloreto de amônio);
- Efetuou-se a titulação com a solução de EDTA 0,0125 M, até o ponto de viragem de rosa para azul;
- Registrou-se o volume gasto.

- Determinação do magnésio (Mg^{2+})

Procedimento:

- Foi determinado pela diferença das medições do $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ e Ca^{2+} .

- Determinação do cloreto (Cl^-)

Procedimento experimental:

- 25 mL da amostra foi posto dentro de um Erlenmeyer;
- Foram adicionados à amostra 3 gotas de cromato de potássio;
- Realizou-se a titulação com nitrato de prata ($AgNO_3$) até o ponto de viragem, cor vermelha para cor de telha.

- Determinação do carbonato (CO_3^{2-})

Procedimento experimental:

- Foi adicionado 50 mL da amostra em um Erlenmeyer;
- Adicionou-se 3 gotas de fenolftaleína;
- Ao ficar rosa, a amostra era titulada com a solução de H_2SO_4 à 0,025 M, até a cor inicial, incolor.
- Registra-se o valor, que posteriormente era multiplicado por 2;
- A ausência de mudança de cor indicava a ausência de CO_3^{2-} .

- Determinação do bicarbonato (HCO_3^-)

Procedimento experimental

- Na mesma amostra que foi efetuada a medição CO_3^{2-} , foram adicionadas 3 gotas de alaranjada de metila;
- Realizou-se a titulação H_2SO_4 à 0,025 M;
- A mudança da coloração ocorreu do amarelo claro para o amarelo cor de cenoura (alaranjado).

- Determinação da razão de adsorção de sódio (RAS)

- Foi calculada a partir das concentrações de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , conforme a equação 5, conforme metodologia de Richards (1954).

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}} \quad (5)$$

Onde:

RAS - Razão de adsorção de sódio, mmol_c L⁻¹;

Na⁺ - Concentração de sódio, mmol_c L⁻¹;

Ca²⁺ - Concentração de cálcio, mmol_c L⁻¹ e;

Mg²⁺ - Concentração de magnésio, mmol_c L⁻¹.

- Determinação do cobre (Cu), manganês (Mn), ferro (Fe), zinco (Zn), cromo (Cr), níquel (Ni), cádmio (Cd) e chumbo (Pb)

Procedimento experimental:

- Primeiramente realizou-se o ajuste do espectrofotômetro de absorção atômica, conforme o manual do equipamento;
- Efetuou-se a leitura das soluções padrão que estimem a curva analítica;
- Em seguida, foram realizadas as leituras dos micronutrientes (Fe, Mn, Cu e Zn) e dos metais (Cr, Ni, Cd e Pb) na amostra, realizando-se trocas das lâminas de cátodo oco.

8 APÊNDICE B – PROCEDIMENTOS METODOLÓGICO UTILIZADOS NA ANÁLISE NUTIRCIONAL DA PLANTA

- Determinação de sódio (Na⁺) por fotometria de chama

Procedimento experimental:

- Primeiramente, foi pipetado 1 mL do extrato 1, e acrescentou-se 19 mL do extrator 2 (água destilada);
- Em seguida, o fotômetro de chama foi ajustado com a solução padrão de Na, realizando-se a leitura da solução que estimou a curva;
- Quando a leitura era superior ao último ponto da curva, havia a necessidade de realizar uma nova diluição. Esta poderia ser realizada retirando-se 1 mL de extrato 2 e adicionando-se 9 mL do extrato 3 (água destilada).

- Determinação dos micronutrientes (Fe, Mn e Zn) por espectroscopia de absorção atômica (EAA)

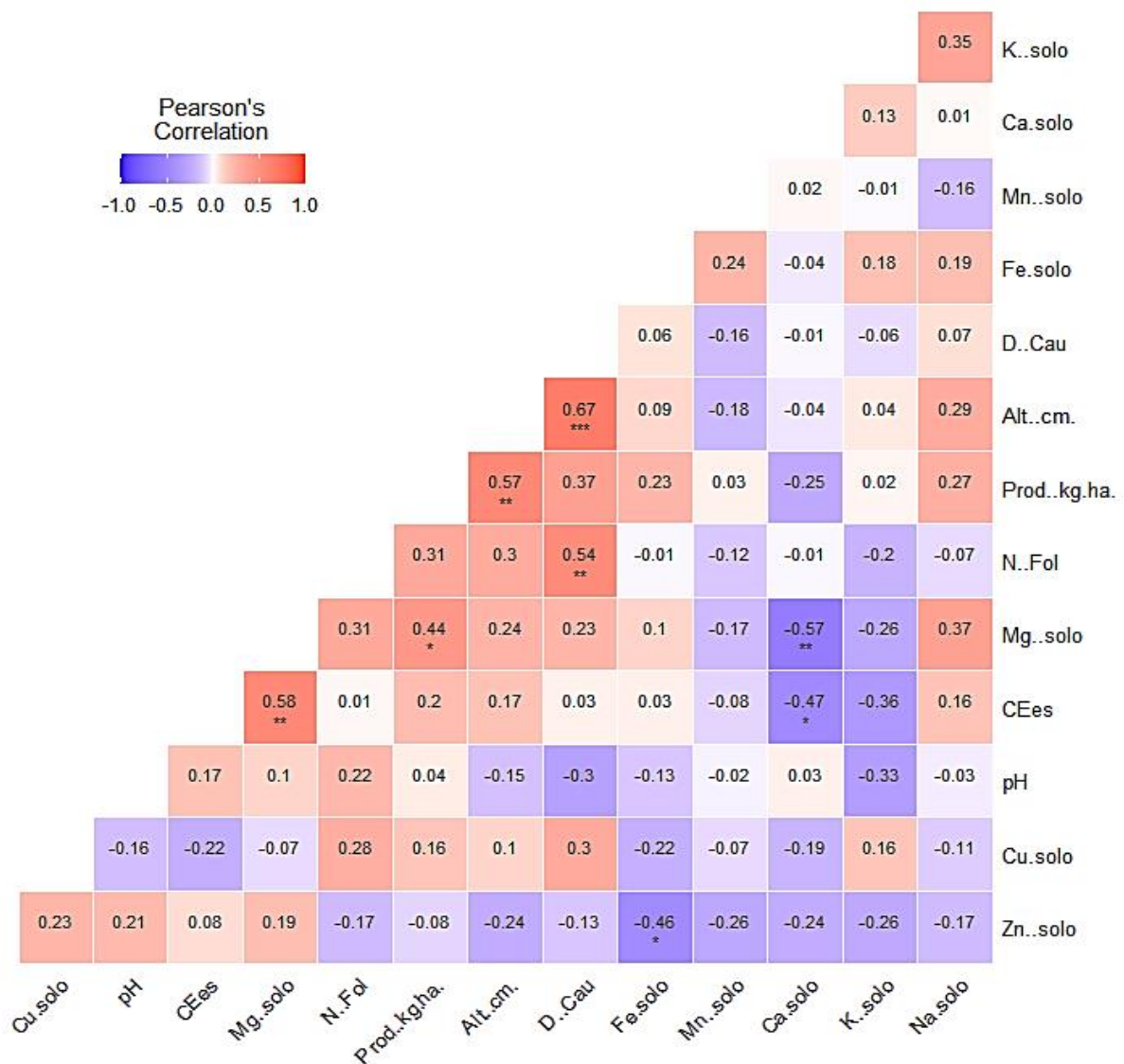
Procedimento experimental:

- Ajustou-se inicialmente o espectrofotômetro, realizando-se a leitura a partir do extrato 1;

- Em seguida, foram efetuadas das leituras de micronutrientes e metais a partir do extrato 1;
- Se fosse necessária realização de uma nova diluição, utiliza-se o extrato 2 (1 mL do extrato 1, adicionado 19 mL de água destilada); nesta ocasião, havia também a necessidade de efetuar o mesmo procedimento, na mesma proporção, com a prova em branco.
- Por fim, foi utilizada a lâmpada de cátodo oco de Fe, Mn e Zn.

9 APÊNDICE C – MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE PEARSON CONSIDERANDO DADOS DO SOLO E DADOS AGRONÔMICOS DO GIRASSOL

Matriz de correlações da composição geral do solo + produção agrônômica das plantas de girassol indicando o grau de correlação com nível de significância ao nível de 5 e 1 % de probabilidade. Matriz das 13 variáveis.



* p < 0.05; ** p < 0.01; and *** p < 0.001