



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

FABRÍCIA GRATYELLI BEZERRA COSTA

**PRODUÇÃO E CAPACIDADE DE FITOEXTRAÇÃO DO GIRASSOL (*Heliantus annus*)
IRRIGADO COM ÁGUA PRODUZIDA**

MOSSORÓ/RN

2018

FABRÍCIA GRATYELLI BEZERRA COSTA

Tese apresentada ao Doutorado em Manejo de Solo e Água do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFRPE, como parte dos requisitos para obtenção do título de “Doutora em Manejo de Solo e Água”.

Linha de Pesquisa: Impactos ambientais pelo uso do solo e da água

Orientador: Prof. Dr. Rafael Oliveira Batista
Co-orientador: Prof. Dr. Luis César de Aquino Lemos Filho

MOSSORÓ/RN

2018

© 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 nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

C837p Costa, Fabricia Gratyelli Bezerra.
PRODUÇÃO E CAPACIDADE DE FITOEXTRAÇÃO DO
GIRASSOL (*Heliantus annus*) IRRIGADO COM ÁGUA
PRODUZIDA / Fabricia Gratyelli Bezerra Costa. -
2018.
92 f. : il.

Orientador: RAFAEL OLIVEIRA BATISTA.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2018.

1. ÁGUA. 2. REUSO. 3. PETROLEO. 4. GIRASSOL.
I. BATISTA, RAFAEL OLIVEIRA, orient. II. 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.

FABRÍCIA GRATYELLI BEZERRA COSTA

Tese apresentada ao Doutorado em Manejo de Solo e Água do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, como parte dos requisitos para obtenção do título de “Doutora em Manejo de Solo e Água”.

Linha de Pesquisa: Impactos ambientais pelo uso do solo e da água

Defendida em: 31/08/2018

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Luis César de Aquino Lemos Filho - UFERSA
Presidente



Prof. Dr. Wesley de Oliveira Santos - UFERSA
Membro Examinador



Dra. Mychelle Karla Teixeira de Oliveira - UFERSA
Membro Examinador



Dra. Ana Kaline da Costa Ferreira - UFERSA
Membro Examinador



Dr. Ketson Bruno da Silva – P.M. de Assu
Membro Examinador

Aos meus avós paternos, **Francisca Elita** (*in memoriam*) e **José Jerônimo** (*in memoriam*), pelo exemplo de luta.

DEDICO

Aos meus pais, **Adenildo e Liduína**, as minhas irmãs, **Fabíola e Fernanda**, ao meu sobrinho, **Mateus**, e ao meu esposo, **Michelangelo**, pelo amor incondicional.

Ao Professor **Rafael Oliveira Batista**, pelo exemplo de bondade, honestidade e humildade.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por manter minha fé inabalável, por guiar todos dos meus passos, por me abençoar todos os dias.

Aos meus pais, Adenildo Jerônimo e Liduína B. Maia Jerônimo, e as minhas irmãs Fabíola Grasyelli B. Costa e Fernanda Grasiene B. Costa, pelo amor, dedicação e incentivo.

Ao meu sobrinho, Mateus Filippo Padre Costa, motivo da minha alegria diária.

A Michelangelo Bezerra Fernandes, pela contribuição no desenvolvimento desta pesquisa, pelo amor oferecido diariamente.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido pela formação acadêmica e oportunidade de concluir dois cursos de Pós-Graduação.

A CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Prof. Rafael Oliveira Batista por honrar o título de orientador, por me guiar durante esses anos com paciência, dedicação e confiança, por todo ensinamento e acima de tudo, amizade.

Ao Professor Luis César A. Lemos pelas valiosas contribuições no exame de qualificação, pelo apoio e exemplo de profissional.

Aos Professores do PPGMSA pelos conhecimentos compartilhados ao longo do curso de Doutorado.

Aos membros da banca pela disponibilidade e pelas contribuições valiosas a este trabalho.

Ao amigo Wesley Santos, pela disponibilidade de sempre e ajuda nas análises estatísticas.

Aos amigos Hudson Salatiel e Danielly Oliveira, por toda ajuda e incentivo durante esses anos de curso.

À Valécia Dantas e Hérick Claudino pela ajuda nas coletas de água.

Aos estagiários, Audilene Dantas e Ricardo André, pela ajuda durante a condução do experimento.

À Joseane Dunga e Hudson Salatiel pela ajuda na elaboração das imagens.

A todos que fazem parte do LASAP, em especial à Ana Kaline e Paula Romyna.

Muito Obrigada!

“Descanse somente em Deus, ó minha alma;
Dele vem a minha esperança”.

(Salmos 62:5)

RESUMO

COSTA, F. G. B. **Produção e Capacidade de fitoextração do girassol (*Heliantus annuus*) irrigado com água produzida.** 2018. 92f. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018.

O presente trabalho objetivou analisar os efeitos da água produzida tratada no sistema produtivo da cultura do girassol. Para isso, foi montada uma área experimental em casa de vegetação, no Departamento de Ciências Agrárias e Florestais do Centro de Ciência Agrárias da Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O experimento foi montado no delineamento em blocos casualizados com cinco tratamentos e cinco repetições. Os tratamentos utilizados foram T1 - 100% de aplicação água de abastecimento (AA) e 0% de água de produzida tratada (AP), T2 - 75% de AA e 25% de AP, T3 - 50% de AA e 50% de AP, T4 - 25% de AA e 75% de AP e T5 - 0% de AA e 100% de AP. No ensaio experimental foram utilizados vasos de 32L preenchidos com brita (nº zero) cobrindo a base dos mesmos e solo proveniente da Fazenda Experimental Rafael Fernandes em Mossoró, sendo classificado como Argissolo Vermelho Distrófico Típico. Todas as parcelas receberam adubação de fundação. Aos 90 dias após o transplântio foram avaliadas as características químicas do solo, onde se utilizou o esquema de parcelas subdivididas tendo nas parcelas os tratamentos, nas subparcelas as profundidades de amostragem (0 a 0,10 m; 0,20 a 0,30 m). A caracterização físico-química da água produzida e da água de abastecimento, foi realizada mensalmente por meio da coleta de três amostras durante o período experimental. Para a produtividade, características agrônômicas, composição química das folhas, fatores de translocação e bioacumulação foram analisados os efeitos dos tratamentos. Os dados foram submetidos à análise de variância, testes de média e contrastes ortogonais. Entre os atributos físico-químicos monitorado no solo, apenas os teores de Mg^{2+} aumentaram, significamente, com as diluições de água produzida tratada, porém, deve enfatizar o relevante conteúdo de Na^+ e Cl^{-1} na água produzida tratada, que pode limitar a utilização desta água para irrigação, devido aos riscos de sodificação do solo e de fitotoxicidades à cultura, principalmente se for aplicada via sistema de irrigação por aspersão. Os efeitos da água produzida tratada no solo após o cultivo do girassol foram favoráveis quanto ao fornecimento e à disponibilidade de nutrientes. Além disso valores de pH superiores a 7,50 na água produzida tratada e de 8,0 no solo, minimizam os riscos ambientais dos metais pesados. Não houve efeito negativo causado pela água produzida tratada nas características biométricas agrônômicas do girassol. Inclusive o diâmetro de capítulo do girassol apresentou aumento significativo com o uso das diluições de água produzida tratada. O girassol apresentou eficiência na translocação de Na e bioacumulação de Mn, Zn, Cr, Ni e Pb. Para aprimorar os conhecimentos sobre o uso sustentável da água produzida para fins agrícolas, recomenda-se a realização de estudos complementares sobre os efeitos dos hidrocarbonetos, fenóis e outros metais pesados no sistema solo-planta.

Palavras-chave: Reuso de água, petróleo, fitorremediação.

ABSTRACT

COSTA, F. G. B. **Production and phytoextraction capacity of sunflower (*Helianthus annuus*) irrigated with produced water.** 2018. 92f. Thesis (Doctor of Science in Manejo de Solo e Água), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018.

The present work aimed to analyze the effects of treated water in the sunflower crop production system. For that, an experimental area was set up in a greenhouse, in the Department of Agrarian and Forestry Sciences of the Agrarian Science Center of the Universidade Federal Rural do Semi-Árido. The experiment was assembled in a randomized block design with five treatments and five replicates. The treatments used were T1 - 100% application water (AA) and 0% treated treated water (AP), T2 - 75% AA and 25% AP, T3 - 50% AA and 50% AP, T4 - 25% AA and 75% AP and T5 - 0% AA and 100% AP. In the experimental trial 32L pots filled with gravel (n°. zero) were used covering the soil base and soil from the Rafael Fernandes Experimental Farm in Mossoró, being classified as Typic Rhodustults. All plots were fertilized with a foundation. At 90 days after transplanting, the chemical characteristics of the soil were evaluated, using the subdivided plots scheme, with treatments in the subplots, the sampling depths (0 to 0.10 m, 0.20 to 0.30 m). The physical-chemical characterization of the water produced and the water supply was carried out monthly by means of the collection of three samples during the experimental period. For the productivity, agronomic characteristics, chemical composition of leaves, translocation factors and bioaccumulation, the effects of treatments were analyzed. Data were submitted to analysis of variance, mean tests and orthogonal contrasts. Among the physicochemical attributes monitored in the soil, only Mg^{2+} contents increased significantly with dilutions of treated treated water, but should emphasize the relevant content of Na^{+} and Cl^{-1} in treated treated water, which may limit the use of this water for irrigation due to the risks of soil sodification and crop phytotoxicities, especially if it is applied via a sprinkler irrigation system. The effects of treated water on the soil after sunflower cultivation were favorable in terms of supply and availability of nutrients. In addition pH values higher than 7.50 in the treated water and 8.0 in the soil, minimize the environmental risks of heavy metals. There was no negative effect caused by the produced water treated in the biometric agronomic characteristics of the sunflower. Even the chapter diameter of the sunflower showed a significant increase with the use of treated water dilutions. In order to improve knowledge about the sustainable use of water produced for agricultural purposes, it is recommended to carry out complementary studies on the effects of hydrocarbons, hydrocarbons, phenols and other heavy metals in the soil-plant system.

Key words: Reuse of water, oil, phytoremediation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores orientados para disposição dos resíduos em solos e em águas subterrâneas	19
Tabela 2. Concentração média de ânions em água produzida e água do mar	22
Tabela 3. Teor de metais pesados na água do mar e em águas produzidas no mar	22
Tabela 4. Características químicas iniciais do solo	38
Tabela 5. Características físicas iniciais do solo	39
Tabela 6. Lâminas brutas acumuladas no período de 90 dias de aplicação de água produzida tratada (AP) e água de abastecimento (AA).	44
Tabela 7. Valores médios das características físico-químicas das diluições da água produzida tratada em água de abastecimento, resultantes de quatro amostragens realizadas de setembro a dezembro de 2017.....	48
Tabela 8. Características químicas do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento	53
Tabela 9. Características químicas do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento.	61
Tabela 10. Características agronômicas do girassol irrigado com diluições de água produzida em água de abastecimento.	65
Tabela 11. Características químicas das folhas de girassol irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento.	68
Tabela 12. Fator de translocação (FT) do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento	72
Tabela 13. Fator de bioacumulação (FB) do girassol irrigado com diluição de água produzida tratada em água de abastecimento	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da casa de vegetação na UFERSA, campus Mossoró-RN.....	36
Figura 2. Croqui da área experimental	40
Figura 3. Girassol irrigado com proporções de água produzida tratada e água de abastecimento	41
Figura 4. Valores de pH e CEes (dS m^{-1}) do solo sob aplicação de água produzida tratada em função da profundidade de cada tratamento.	55
Figura 5. Valores de MO (g dm^{-3}) e P (mg dm^{-3}) do solo sob aplicação de água produzida tratada em função da profundidade de cada tratamento	57
Figura 6. Valores de Ca^{2+} ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), Mg^{2+} ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), K^+ (mg dm^{-3}) e Na^+ (mg dm^{-3}) do solo sob aplicação de água produzida tratada em função da profundidade de cada tratamento.	58
Figura 7. Valores de Cu (mg dm^{-3}), Mn (mg dm^{-3}), Zn (mg dm^{-3}), Fe (mg dm^{-3}), Ni (mg dm^{-3}), Pb (mg dm^{-3}) do solo sob aplicação de água produzida tratada em função da profundidade de cada tratamento.....	63

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Geração da água produzida no Brasil e no Nordeste.....	15
2.2 Legislação aplicada ao lançamento e descarte da água produzida	17
2.3 Características da água produzida	21
2.4 Métodos de tratamento da água produzida.....	24
2.5 Impactos ambientais da disposição de água produzida.....	27
2.6 Importância do girassol no Brasil e no Nordeste.....	29
2.7 Fitoextração	31
2.8 Efeitos da água produzida no solo e no girassol.....	34
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.1 Localização da área experimental.....	36
3.2 Origem do efluente e da água de abastecimento utilizadas nos ensaios experimentais	37
3.2 Caracterização das diluições da água produzida tratada em água de abastecimento	37
3.3 Instalação e condução do experimento.....	40
3.3.1 Parcelas experimentais e tratamentos	40
3.3.2 Implantação do experimento e cultura utilizada.....	42
3.4 Características avaliadas.....	44
3.4.1 Monitoramento do solo após aplicação de água produzida tratada.....	44
3.4.2 Determinação de características produtivas e agrônômicas do girassol irrigado com proporções de água produzida e água de abastecimento	44
3.4.2.1 Altura de planta.....	45
3.4.2.2 Número de folhas.....	45
3.4.2.3 Diâmetro do caule.....	45
3.4.2.4 Diâmetro do capítulo	45
3.4.2.5 Produtividade	45

3.4.3 Determinação do estado nutricional das plantas de girassol irrigadas com água produzida tratada e água de abastecimento	45
3.4.4 Determinação do Fator de Translocação (FT) e Fator de Bioacumulação (FB)	46
3.5 Experimentação e análises estatísticas	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1 Características químicas da água produzida e de abastecimento	48
4.2 Atributos físico-químicos do solo após irrigação com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento	52
4.2.1 Potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento	55
4.2.2 Matéria orgânica (MO) e fósforo (P) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento.....	56
4.2.3 Cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e sódio (Na) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento	58
4.3 Micronutrientes no solo após irrigação com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento	60
4.3.1 Cobre (Cu), manganês (Mn), ferro (Fe), zinco (Zn), níquel (Ni), chumbo e (Pb) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento.....	62
4.4 Características agrônômicas do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento	65
4.5 Composição mineral do tecido foliar de girassol irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento	67
4.6 Capacidade fitoextratora do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento	72
4.6.1 Fator de translocação do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento	72
4.6.2 Fator de bioacumulação do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento	74
5 CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

A indústria petrolífera, apesar de seus aspectos econômicos e estratégicos de suma importância para a gestão e política mundial, possui diversos limitadores para sua expansão, sendo a questão ambiental, um dos fatores de grande relevância neste contexto (Goldemberg et al., 2014). Seu desenvolvimento e exploração estão associados a diversos impactos ao meio ambiente, tendo em vista o potencial poluidor de toda sua cadeia de produção. No entanto, este recurso ainda é um dos mais importantes na matriz energética mundial, principalmente se considerada sua versatilidade de aplicações em diversos setores industriais (Brasil, 2013).

A água produzida é oriunda de formações geológicas que contêm petróleo e gás (Benko et al., 2008). Com a extração do petróleo por longos períodos de tempo, os poços vão envelhecendo e geram quantidades cada vez maiores de água produzida do petróleo, cujo gerenciamento se torna um assunto de importância capital (Cavaco, 2004). A proporção do volume de água produzida em relação ao petróleo extraído, de acordo com Thomas (2004), varia de 50 a 100%, ao fim da vida econômica dos poços.

O impacto ambiental provocado pelo descarte da água produzida é, geralmente, avaliado pela toxicidade dos constituintes e pela quantidade de compostos orgânicos. Além destes agentes tóxicos, a água produzida, ainda, apresenta quantidades elevadas de produtos químicos tóxicos adicionados durante o processo de extração do petróleo como: inibidores de corrosão e incrustação, desemulsificantes, polieletrólitos, entre outros (Rocha et al., 2012).

Quando adequadamente tratada, a água produzida pode tornar-se uma alternativa para irrigar culturas cujos produtos não se destinam diretamente ao consumo humano.

Dentre as plantas oleaginosas com potencial para a produção de biodiesel, o girassol (*Heliantus annus L.*) apresenta as seguintes características desejáveis: elevado teor de óleo, cultivo com menor exigência hídrica, bom potencial produtivo e possibilidade de adequar-se em sistemas de produção sem competir com a cultura principal (Gazzoni, 2005).

Ainda, é uma oleaginosa que apresenta características agronômicas importantes, como maior resistência à seca, ao frio e ao calor do que a maioria das espécies, normalmente, cultivadas no Brasil. Adicionalmente, apresenta ampla adaptabilidade às diferentes condições edafoclimáticas e seu rendimento é pouco influenciado pela latitude, altitude e pelo fotoperíodo (Fagundes, 2012).

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de diluições de água produzida tratada em água de abastecimento nas características químicas do solo e na produção, desenvolvimento e capacidade de fitoextração do girassol (*Heliantus annus L.*).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Geração da água produzida no Brasil e no Nordeste

A água produzida é gerada como subproduto da produção de petróleo e gás, durante o processo de separação por que esses fluidos passam (processamento primário) para que possam se transformar em produtos comerciais. As alternativas usualmente adotadas para o seu destino são o descarte, a injeção e o reuso. Em todos os casos, existe a necessidade de tratamento específico, a fim de atender as demandas ambientais, operacionais ou da atividade produtiva que a utilizará como insumo (Amini et al., 2012).

O gerenciamento da água produzida é o conjunto completo de soluções para o processo de produção de água, incluindo técnicas de separação, análises laboratoriais para a caracterização da água, tratamento e descarte/reinjeção (Vieira, 2011). Durante a produção de petróleo a água produzida pode estar livre e ou emulsionada. A água livre é uma emulsão instável (sua maior parte não está misturada) podendo ser separada por decantação. Já a fase emulsionada é uma mistura íntima, relativamente estável entre óleo e água (Curbelo, 2002).

No Brasil, segundo informações da base de dados da Agência Nacional de Petróleo e Biocombustíveis - ANP, as operações de produção *offshore* no ano de 2013 registraram a geração de cerca de 95 milhões de m³ de água produzida, para uma produção de 107 milhões de m³ de petróleo, resultando em uma razão água:óleo de 0,89:1. Vale ressaltar, que a diferença observada entre a atividade brasileira e a média reportada para o restante do mundo (3:1), pode estar relacionada à idade da maior parte dos campos brasileiros e início da atividade de exploração e produção no Brasil, mais recente do que em diversos outros países, uma vez que se trata apenas dos dados da atividade *offshore* (Morais, 2013).

Os maiores quantitativos de sua geração são observados nas Bacias de Campos, no litoral do estado do Rio de Janeiro, Espírito Santo, e a Bacia Potiguar onde apresenta uma razão de água:óleo de 2,64:1. Os maiores volumes de água de produção são observados nos campos de Serra e Aratum, tendo este último apresentado a maior razão água:óleo dentre todos os empreendimentos do Brasil no ano de 2013 (20,55:1). O início da produção neste campo ocorreu em 1987, indicando que a maturidade do reservatório não se trata do único fator determinante para o quantitativo de geração de água produzida (Coday, 2014), uma vez que outras localidades mais maduras apresentam a razão água:óleo inferior ao mesmo. Neste caso, a elevada geração deste efluente pode estar associada a outras características do reservatório.

A Bacia Potiguar localiza-se na porção mais oriental da região nordeste do Brasil, estendendo-se pelos estados do Rio Grande do Norte e do Ceará. A área sedimentar na porção

emersa é de aproximadamente 26.700 km², enquanto que a porção submersa soma aproximadamente 195.400 km². Geologicamente, limita-se a leste com a Bacia de Pernambuco-Paraíba, pelo Alto de Touros, a noroeste com a Bacia do Ceará pelo Alto de Fortaleza e ao sul com rochas do embasamento cristalino (ANP, 2015).

Em 1973 foram descobertos os campos de Ubarana e em 1975 os de Agulha na plataforma continental e do Campo de Mossoró em 1979 na porção terrestre. A partir destas descobertas, a Bacia Potiguar experimentou grande incremento exploratório que resultou em importantes descobertas como os campos de Fazenda Belém em 1980, Alto do Rodrigues em 1981, Estreito, Fazenda Pocinho, Guamaré e Serraria em 1982, Lorena e Upanema em 1984, Canto do Amaro em 1985, entre outros. O período entre 1980 a 1990 corresponde à fase de maior investimento exploratório na bacia. Foram perfurados 675 poços exploratórios, os quais representam aproximadamente 52% do total perfurado na bacia até o momento (ANP, 2015).

Dados da ANP de abril de 2015 indicaram que a Bacia Potiguar conta com 102 campos de produção e em desenvolvimento que produzem 1,74 milhão de bblmês⁻¹ de petróleo e 37,52 milhões m³mês⁻¹ de gás natural. O volume original *in situ* de petróleo é de 5,88 bilhões de bbl e a produção acumulada é de 840,80 milhões de bbl. O volume original *in situ* de gás total na bacia é de 97,74 bilhões de m³ e a produção acumulada é de 27,25 bilhões de m³ (ANP, 2015).

Ainda a ANP, em maio de 2017, a produção de petróleo no Brasil totalizou 2,65 milhões de barris por dia (bbl d⁻¹). O volume representa um crescimento de 4,5% na comparação com o mês anterior e de 6,7% em relação ao mesmo mês em 2016. Já a produção de gás natural foi de 105 milhões m³ d⁻¹, superando em 5% a produção do mesmo mês em 2016 e em 2,1% a de abril. A produção total de petróleo e gás natural no País foi de aproximadamente 3,31 milhões de barris de óleo equivalente por dia (boe d⁻¹).

Em 2016, o Estado do Rio Grande do Norte ocupou a quarta colocação no cenário nacional em relação à produção de petróleo explorado no solo e mar, com 20,43 milhões de barris, sendo superado pelos Estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e São Paulo; considerando apenas a produção de petróleo em solo, o Estado do Rio Grande do Norte ocupou a primeira colocação nacional com 18,18 milhões de barris produzidos no ano de 2016 (ANP, 2017).

2.2 Legislação aplicada ao lançamento e descarte da água produzida

Sobre o descarte da água produzida no ambiente, não existe legislação específica apesar do seu impacto negativo. O único parâmetro regulamentado para água produzida é o teor de óleo em água.

Com relação à legislação federal, podem-se destacar as Resoluções CONAMA nº 357/2005 (Brasil, 2005), 393/2007 (Brasil, 2007), 430/2011 (Brasil, 2011b), 420/2009 (Brasil, 2009) e a portaria 422/2011 (Brasil, 2011a) do Ministério do Meio Ambiente, ambas, não são específicas para água produzida, porém, destacam-se por regulamentar a destinação de água em corpos receptores.

A resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente estabelece parâmetros para a classificação dos corpos hídricos receptores, bem como condições e padrões de lançamento de efluentes. Dessa forma, propõe que o valor referente para descarte é de até 20 mg L⁻¹ de óleos e graxas (Brasil, 2005).

Porém, essa resolução não abrange, totalmente, os contaminantes existentes na composição da água produzida e devido ao grande poder de contaminação desta criou-se a Resolução CONAMA nº 393/2007 que, é a única voltada especificamente para a regulamentação dos padrões e práticas relacionadas à água produzida. Entretanto, a mesma dispõe exclusivamente sobre o descarte contínuo deste efluente em plataformas marítimas de óleo e gás natural, não sendo aplicável a outros empreendimentos da mesma natureza, porém realizados *onshore*. Assim, ficou-se determinado através desta resolução que os descartes de água produzida na região oceânica devem obedecer a um limite diário para o teor de óleos e graxas (TOG) de 42 mg L⁻¹ e uma concentração média mensal de 29 mg L⁻¹, calculada por meio de média aritmética simples, com base nos valores diários de TOG para os descartes realizados.

Nesta Resolução destaca-se:

- 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.

Neste contexto, destaca-se, ainda, a Resolução nº 430/2011 (Brasil, 2011b) que trata dos padrões de qualidade dos efluentes que serão lançados, descrevendo os padrões que devem ser monitorados e respeitados no efluente previamente ao descarte. Fica estabelecido também, que o enquadramento e o automonitoramento dos efluentes para descarte devem ser realizados pelos responsáveis do empreendimento, complementando e alterando a Resolução nº 357/2005. Nesta resolução destacam-se dois artigos sobre a disposição final de efluentes tratados:

- Art. 2º A disposição de efluentes no solo, mesmo tratados, não está sujeita aos parâmetros e padrões de lançamento dispostos nesta Resolução, não podendo, todavia, causar poluição ou contaminação das águas superficiais e subterrâneas.

- Art. 3º Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, diretamente, nos corpos hídricos receptores com o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução.

A Resolução CONAMA nº 420 de 28 de dezembro de 2009 dispõe sobre critérios e valores orientadores de 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). Os valores orientadores são pré-estabelecidos, de forma a determinar a ausência de contaminação ou conhecer o seu nível.

De acordo com essa Resolução, o gerenciamento de áreas contaminadas deverá conter ações voltadas a eliminar ou reduzir o risco à saúde e ao meio ambiente, observando os seguintes aspectos: planejamento de uso e ocupação do solo, visando demonstrar uso declarado ou futuro da área; procedimentos de investigação de áreas suspeitas de contaminação, que serão submetidas a uma avaliação preliminar para aferir a qualidade do solo; ações de controle e fiscalização (Brasil, 2009). Na Tabela 1 estão apresentados os valores orientados para disposição dos resíduos em solos e em águas subterrâneas.

Tabela 1. Valores orientados para disposição dos resíduos em solos e em águas subterrâneas

Substâncias	Solo (mg kg ⁻¹ de peso seco)		Água Subterrânea (µg L ⁻¹)
	Prevenção	Investigação em áreas agrícolas	Investigação
Inorgânicos			
Alumínio	-	-	3.500
Antimônio	2	5	5
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
Mercúrio	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

Fonte: Resolução CONAMA n° 420/2009 (Brasil, 2009).

A Portaria n° 422/2011, dispõe sobre os procedimentos para o licenciamento ambiental federal de atividades e empreendimentos de exploração e produção de petróleo e gás natural no ambiente marinho e zona de transição terra-mar. Esta foi lançada no ano de 2011 com intuito de unificar as demais regulamentações existentes sobre o tema. Nesta Portaria em seu Capítulo IV, trata do licenciamento da produção, escoamento de petróleo e gás natural e do teste de longa duração (Brasil, 2011a).

A ANP como órgão regulador da indústria do petróleo tem o papel de promover a regulação, a contratação e a fiscalização das atividades econômicas integrantes do setor,

podendo ainda autuar e aplicar sanções administrativas em decorrência do seu poder de polícia administrativa (Nascimento, 2009).

Ainda, com relação à legislação ambiental no Brasil voltada ao descarte de água produzida existe a Lei 9.478/97, conhecida como Lei do Petróleo, 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 e dá outras providências, com atribuição de propor políticas para o setor petrolífero, Gás Natural e Biocombustíveis. Nesta lei estão elencados os principais objetivos da Política Energética Nacional, as funções e objetivos do Conselho Nacional de Política Energética e ANP, além das especificações sobre o regime de concessão, editais de licitação, atividades de *downstream*, importações e exportações e biocombustíveis (Brasil, 1997).

A Lei do Petróleo foi alterada pela Lei 12.351/2010, após a descoberta da camada do pré-sal, porém sua essência não foi modificada em relação às obrigações do setor com relação às questões ambientais, sobre as quais fica definido na referida lei que é objetivo da Política Energética Nacional proteger o meio ambiente e garantir a conservação de energia e cabe aos concessionários adotar as medidas necessárias para preservação dos reservatórios e outros recursos naturais e para proteção do meio ambiente (Brasil, 2010).

Em termos internacionais, os limites máximos de óleos e graxas totais estabelecidos pelos padrões para descarte da água produzida no mar estão entre 15 mg L⁻¹ (Venezuela e Argentina) e 50 mg L⁻¹ (Nigéria, Angola, Camarões e Costa do Marfim). Destacam-se, ainda Malásia, países do Oriente Médio, Austrália e países do Mar do Norte, todos com limite de 30 mg L⁻¹, e Estados Unidos, com 29 mg L⁻¹ (Stewart et al., 2011).

Ainda, é comum que diversos países utilizem, como base para elaboração de suas próprias regulamentações sobre gerenciamento de água produzida, acordos definidos em convenções internacionais que possuam como objetivo a proteção ambiental de ecossistemas comuns a mais de um país (Gabardo, 2007). Este fato é, ainda, mais usual quando se trata de atividades *offshore*, onde as regulamentações são voltadas para os descartes no oceano e no limite para o teor de óleos e graxas (TOG) que poderá ser descartado juntamente à água produzida.

2.3 Características da água produzida

A constituição da água trata-se de uma mistura complexa de compostos químicos orgânicos e inorgânicos, naturalmente ocorrentes, que foram dissolvidos ou dispersados na forma de particulados das formações geológicas e rotas de migração onde esse efluente esteve represado por milhares de anos (Neff et al., 2011).

Suas propriedades físicas e químicas podem variar bastante, de acordo com a idade geológica, profundidade, características geoquímicas e localização da formação rochosa, assim como da composição química das fases de óleo e gás no reservatório e processos adicionados, durante a produção (Hosseini et al., 2012).

De maneira geral, a água produzida possui os mesmos sais e metais presentes na água do mar, porém em concentrações e razões muito superiores (cerca de até 1.000 vezes maior), que refletem a idade do poço (Figueredo, 2010).

Fazem parte da sua constituição sais inorgânicos dissolvidos, incluindo sulfetos e sais de amônio, compostos orgânicos dissolvidos e dispersos, dentre eles hidrocarbonetos, ácidos orgânicos e fenóis, e produtos químicos adicionados nos diversos processos de produção como, coagulantes, floculantes, inibidores de incrustação e corrosão, biocidas (utilizados para reduzir o crescimento microbiano) e quebradores de emulsão e de espuma (Wang et al., 2012; Figueredo, 2010).

Dentre os constituintes inorgânicos mais abundantes na água produzida e que contribuem para a elevada salinidade da mesma, pode-se citar os compostos formados a partir de ânions como o cloreto, sódio, cálcio, magnésio, potássio, sulfeto, brometo, bicarbonato, iodeto e amônia. Especificamente com relação a este último, sugere-se que além de estar associado às condições geológicas da formação produtora, assim como os demais, pode ainda ser resultado da ação bacteriana sobre os compostos orgânicos (Gabardo, 2007; Neff et al., 2011).

Assim, apresentam em sua constituição diferentes concentrações desses cátions (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} e Fe^{2+}) e ânions (Cl^- , SO_4^{2-} , S^{2-} , CO_3^{2-} e HCO_3^-), sendo responsáveis pelo potencial de incrustação destas águas (Oliveira et. al., 2000). As concentrações médias de constituintes aniônicos da água produzida e da água do mar são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Concentração média de ânions em água produzida e água do mar

Íon	Água produzida	Água do mar
Bicarbonato (mg L ⁻¹)	771	19
Cloreto (g L ⁻¹)	60,9	28
Sulfato (mg L ⁻¹)	325	900
Sulfeto (mg L ⁻¹)	140	-
Nitrato (mg L ⁻¹)	1	0,67
Fosfato (mg L ⁻¹)	0	0,09

Fonte Gabardo, 2007

A salinidade da água produzida baixa a elevada (> 300 mg L⁻¹), muito superior a salinidade normal da água do mar de 32 a 36 ppm; o que ocorre na maioria dos diferentes campos de produção, devido à dissolução do sal das formações rochosas, durante o período de represamento, contribuindo para o alto potencial de toxicidade deste efluente e tornando-o mais denso que a água do ambiente marinho (Frag et al., 2014).

Sua composição apresenta, ainda, grandes concentrações e diversidade de metais pesados, sólidos em suspensão como areia, lodo, argila e outros silicatos, e traços de radionuclídeos (Wang et al., 2012; Figueredo, 2010). Hansen & Davies (1994) determinaram a concentração típica de diferentes metais pesados dissolvidos nas águas produzidas nos campos de petróleo comparados a água do mar apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Teor de metais pesados na água do mar e em águas produzidas no mar

Metais pesados	Teor de metais pesados (µg L ⁻¹)	
	Água produzida	Água do mar
Cádmio	5	0,02
Cromo	100	0,001
Cobre	800	0,2
Chumbo	500	0,03
Mercúrio	3	0,001
Níquel	900	0,3
Prata	80	0,3
Zinco	1000	0,6

Fonte: Segui (2009).

Os compostos orgânicos naturais presentes nas águas produzidas podem ser divididos em quatro grupos principais: alifáticos (incluindo os naftênicos), aromáticos, polares e ácidos graxos (Oliveira et al., 2000).

A quantidade relativa e a distribuição de peso molecular destes compostos variam de poço para poço. Os compostos alifáticos de maior interesse são aqueles mais leves, pois são os mais solúveis em água e contribuem para o total de carbono orgânico volátil. Compostos aromáticos, tais como: benzeno, tolueno, xileno e naftaleno, são relativamente solúveis na água, estando ainda presentes em pequenas quantidades os hidrocarbonetos aromáticos polinucleares de alto peso molecular (Oliveira et al., 2000). Estes compostos são os mais abundantes na água produzida e os que conferem maior preocupação sobre o ponto de vista ambiental em relação ao seu descarte. Dentre os principais compostos orgânicos presentes na água de produção representam a sua maioria, hidrocarbonetos de petróleo, ácidos carboxílicos e fenóis (Neff et al., 2011).

Os gases mais comumente encontrados são gás natural (metano, etano, propano e butano), CO_2 e H_2S . O H_2S pode estar presente naturalmente ou ser produzido por bactérias redutoras de sulfato. Pode causar incrustação por sulfeto de ferro e ser tóxico, se inalado. O O_2 não é encontrado naturalmente na água produzida. Quando trazida a superfície, esse gás é, então, incorporado a sua composição, o que pode causar problemas como torná-la corrosiva e produzir sólidos insolúveis, devido a reações de oxidação. O CO_2 pode estar presente naturalmente e pode ser corrosivo ou se precipitar como CaCO_3 . A remoção de CO_2 e H_2S aumenta o pH, podendo gerar precipitados (Stewart et al., 2011).

Além dos compostos naturais presentes na água produzida, uma variedade de produtos químicos é adicionada durante o processo de produção. Esses produtos químicos denominados aditivos são empregados para prevenir ou resolver problemas operacionais. Cada sistema de produção tem uma necessidade de utilização destes aditivos, gerando, desta forma, efluentes com diferentes características físico-químicas. Os principais aditivos adicionados durante o processo de produção de petróleo são: inibidores de incrustação, inibidores de corrosão, biocidas, desemulsificantes, aditivos para o tratamento da água (coagulantes e floculantes), inibidores de deposição de parafinas/asfaltenos e antiespumantes (Nunes, 2013).

A toxicidade da água produzida pode estar relacionada a três grandes grupos de componentes: os materiais orgânicos (por exemplo, hidrocarbonetos e fenóis), os metais pesados, e os íons, principais responsáveis pela salinidade e pelas propriedades osmóticas da água. Os compostos orgânicos presentes na água produzida são volatilizados ou biodegradados, enquanto a concentração de compostos inorgânicos é constante, embora a precipitação possa reduzir seus níveis na fase aquosa. A biodegradação da matéria orgânica

pode alterar a toxicidade da água produzida de diferentes maneiras, além disso, a razão de hidrocarbonetos particulados/dissolvidos pode ser alterada, fazendo com que os produtos biodegradados apresentem diferentes níveis de toxicidade, se comparados aos compostos originais (Stromgren et al., 1995).

Alguns problemas associados à água produzida são causados pela atividade dos microrganismos redutores de sulfato presentes, e conseqüentemente, pela geração de sulfeto em todas as etapas do processo de produção do petróleo. Há ainda problemas causados pela reação entre compostos químicos presentes nas águas de formação e injeção, com conseqüente formação de sais insolúveis, que podem precipitar causando redução da permeabilidade e conseqüentemente queda no índice de produtividade do poço (Segui, 2009).

2.4 Métodos de tratamento da água produzida

A quantidade de água produzida associada com o óleo varia muito, podendo alcançar valores da ordem de 50% em volume ou até mesmo próximos de 100%, ao fim da vida econômica dos poços. O tratamento da água tem por finalidade recuperar parte do óleo nela presente em emulsão e condicioná-la para reinjeção ou descarte (Thomas, 2004).

O tratamento antes do descarte remove sólidos e líquidos não-aquosos dispersos, incluindo óleo disperso, sólidos suspensos e bactérias, assim como a maior parte de hidrocarbonetos voláteis e gases corrosivos, como o gás carbônico (CO₂) e o ácido sulfúrico (H₂S). Experiências com a indústria *offshore* têm mostrado que se o tratamento de água produzida é eficiente na remoção de óleo disperso, as concentrações de hidrocarbonetos dispersos e voláteis são reduzidas a níveis aceitáveis (Neff et al., 2011).

A estratégia para remoção do óleo presente na água produzida pode variar bastante em função das características do óleo produzido. De maneira geral, os tratamentos dados ao óleo para separação de água e gás, quando chegam às plataformas, são separadores bifásicos e trifásicos, e tratamentos eletrostáticos. O gás é condensado através de compressão, podendo haver outros tratamentos para remoção de gases e ácidos, se for o caso (Fakhru'l-Razi et al., 2009).

Todas as tecnologias utilizadas no tratamento primário de águas oleosas estão baseadas na Lei de Stokes e se encarregam basicamente da separação de sistemas particulados (água livre e emulsionada e sólidos em suspensão). É comum utilizar nestas unidades, separadores de óleo livre, flotores naturais (grandes tanques que utilizam parte do gás proveniente da água para flotar gotículas de óleo emulsionadas) ou por gás dissolvido, hidrociclones e filtros de areia (Petrobras, 2007).

Os principais tratamentos estão classificados em dois tipos, que são: métodos convencionais abrangendo separadores gravitacionais, flotação e hidrociclones, e métodos não convencionais que empregam tratamentos químicos, biológicos e por membranas.

Os separadores gravitacionais são o primeiro estágio do tratamento primário utilizado em campos terrestres e empregam equipamentos de separação gravitacional. Neles ocorre a separação do óleo da água, sendo o óleo concentrado na parte superior do separador, por ser menos denso, e assim escoado por uma saída em cima, enquanto que a água fica localizada na parte mais inferior do tanque, sendo escoada pela parte de baixo. Já os sólidos ficam acumulados no fundo do separador (Capps et al., 1993).

O método da flotação tem se apresentando como uma tecnologia promissora na remoção de óleos e graxas provenientes de refinarias, plantas petroquímicas, metalúrgicas, indústrias alimentícias e outros, reduzindo a carga poluente de efluentes. O objetivo é gerar bolhas gasosas no interior da água produzida, em seguida, as bolhas formadas colidem e aderem nas gotículas de óleo dispersas na água, reduzindo a densidade destes agregados e promovendo a ascensão do óleo que, por sua vez, forma uma camada de espuma de simples transferência. Isto ocorre pelo fato do óleo ser hidrofóbico, tendo pouca afinidade à água, e com a aderência as microbolhas de ar permite que o mesmo seja conduzido até o topo do flotor (Bensadok et al., 2007).

Os Hidrociclones funcionam como centrifugadores, aumentando a velocidade do processo de separação. São utilizados equipamentos que permitem a formação de escoamento em espiral, gerando campo centrífugo no seu interior que, em função da diferença de densidade entre as fases, promove a separação do óleo disperso. Segundo Santos (2008), os hidrociclones funcionam da seguinte maneira: a água entra no equipamento por meio de entradas tangenciais, onde a energia potencial da água é transformada em energia centrífuga. Esta força centrífuga direciona o fluido mais denso (água) para as paredes do equipamento e o fluido menos denso (óleo) para o centro do corpo do equipamento. A manutenção da pressão corrente de rejeito, por onde sai o óleo recuperado, sempre abaixo da pressão de saída de água garante o direcionamento do cone de óleo no sentido oposto ao da saída da água. Os processos mencionados apresentam desvantagens, como o elevado tempo de residência requerido, a utilização de produtos químicos especiais e caros, a geração de resíduos sólidos e baixas eficiências, principalmente no caso de gotas com diâmetros na faixa de micrometros ou submicrometros (Hong et al., 2002).

Segundo Fakhru'l-razi et al. (2009), o tratamento de adsorção consiste em um método físico que pode ser incorporado ao carvão ativado (ajuda a remover compostos orgânicos dissolvidos, alguns metais pesados e Benzeno, Tolueno, Etil-benzeno e Xileno-BTEX), argila

orgânica (ajuda a remover hidrocarbonetos livres insolúveis que contribuem para hidrocarbonetos totais de petróleo e Teor de Óleos e Graxas -TOG), copolímeros (remove TOG), zeólitos e resinas (remove compostos orgânicos dissolvidos, BTEX, TOG, sólidos suspensos, cálcio e magnésio).

Os tratamentos químicos geralmente são utilizados associados com métodos convencionais. Os processos químicos possuem larga escala de aplicação no tratamento da água produzida, servindo na desestabilização do óleo finamente dissolvido. Os princípios mais comuns são a precipitação e a oxidação química, processos eletroquímicos, tratamentos fotocatalíticos, processos envolvendo a reação de Fenton ou líquidos iônicos, tratamentos com ozônio e também os agentes desemulsificantes (Ahmadun et al., 2009).

Segundo Richter (2009) o tratamento químico envolve a aplicação de produtos químicos para precipitação de compostos em solução e desestabilização de suspensões coloidais de partículas sólidas, que, de outra maneira, não poderiam ser removidas por sedimentação, flotação ou filtração são chamados de tratamento de coagulação. A coagulação desempenha papel dominante na cadeia de processos de tratamento de água, principalmente na preparação da decantação ou da flotação e, assim, na filtração que se segue. Para que os outros processos obtenham êxito, tem que ter o processo de coagulação bem-sucedido.

Os processos biológicos também são aplicados no tratamento de água utilizam tanto microrganismos aeróbicos, como microrganismos anaeróbicos. Tem função na remoção de compostos orgânicos e amônia, metabolizando estes contaminantes, porém não servem para tratamento de sólidos dissolvidos (Iwaki, 2015).

Os processos de separação por membranas estão presentes em diversos setores, como na indústria química, na área médica, na biotecnologia, na indústria alimentícia, na indústria farmacêutica e em tratamentos de águas residuárias. Em relação à indústria petrolífera, a utilização de membranas vem sendo usado na remoção de partículas de óleo estáveis de diâmetro na ordem de micrômetros (Iwaki, 2015).

Os principais processos de separação de membranas são a microfiltração, a ultrafiltração, a nanofiltração e a osmose inversa, onde, a microfiltração separa partículas sólidas suspensas e bactérias, são membranas totalmente permeáveis aos compostos solúveis, independente das massas molares. São aplicadas em filtração estéril, tanto de líquidos quanto de gases; a ultrafiltração separa partículas sólidas suspensas, bactérias, vírus e compostos orgânicos com macromoléculas. É utilizada na purificação e concentração de proteínas e enzimas; a nanofiltração é remoção de compostos orgânicos de baixo peso molecular e separa íons multivalentes (Li, 2008).

A osmose inversa permite a retenção de componentes iônicos dissolvidos e compostos orgânicos solúveis. Capaz de remover grandes quantidades de sódio, cálcio e magnésio. O processo funciona com alta pressão fazendo com que a água atravesse a membrana no sentido da solução mais concentrada para a menos concentrada, ou seja, fenômeno da osmose é observado quando duas soluções de concentrações diferentes são separadas por uma membrana permeável ao solvente e praticamente impermeável ao soluto (Silva, 2000).

Os sistemas de tratamento para água produzida devem possuir alta eficiência e baixo custo de operação e manutenção para que se tornem viáveis. Ocorre que o método de tratamento da água produzida depende fortemente de fatores como a localização do reservatório, o volume de água gerado, a sua composição, o destino final e os limites da legislação em vigor.

A qualidade da água produzida descartada é uma função primária da eficiência da tecnologia de tratamento e do rigor e nível de cumprimento das regulações para descarte no ambiente (Neff et al., 2011). Porém, mesmo nas melhores combinações de ambos os fatores, ainda resta óleo residual ou microgotas finamente dispersas na água de produção (Ogp, 2005), além de outros compostos não removidos durante o tratamento, que nas concentrações apresentadas e em conjunto conferem um potencial apreensivelmente tóxico à água produzida.

2.5 Impactos ambientais da disposição de água produzida

Em geral, a água produzida possui volumes de produção muito maiores que o próprio petróleo, o que juntamente com a complexidade de sua composição gera preocupação com relação aos impactos que a disposição desse efluente pode ocasionar.

O impacto ambiental provocado pelo seu descarte é geralmente avaliado pela toxicidade dos constituintes e pela quantidade de compostos orgânicos e inorgânicos presentes. Os contaminantes presentes nas águas produzidas podem causar diferentes efeitos sobre o meio ambiente. Após o descarte, alguns destes contaminantes permanecem dissolvidos, ao passo que outros tendem a sair de solução. Acredita-se que os efeitos mais nocivos ao meio ambiente são aqueles relacionados aos compostos que permanecem solúveis após o descarte da água produzida (Oliveira et al., 2000).

Segundo estudos da Ogp (2012), os impactos ambientais relacionados ao descarte deste efluente são considerados irreversíveis e permanentes quando são realizados por atividades longas e contínuas que mantêm o ambiente constantemente em contato com os agentes contaminantes.

A atividade de exploração e produção de petróleo produz expressivas quantidades de resíduos perigosos, que apresentam risco de contaminação ao meio ambiente, devido às suas

características de toxicidade, inflamabilidade, reatividade, patogenicidade ou corrosividade, e também de resíduos não perigosos. Tanto nas operações em solo (*onshore*) como nas operações no mar (*offshore*), as atividades na fase *upstream* são as que mais geram resíduos perigosos; com alto grau de toxicidade e presença de contaminantes, e de resíduos não perigosos, normalmente são realizadas em ambientes inóspitos, com pouca interferência da atividade humana, tornando estes impactos mais relevantes (O'Rourke et al., 2003).

Porém, nem toda água produzida gerada durante a atividade petrolífera é descartada no ambiente, podendo uma parcela deste efluente ser reinjetado nos poços de produção de petróleo. Em 2007, por exemplo, nos Estados Unidos o volume estimado de geração de água produzida foi de 93,4 milhões de m³, para uma produção de 75,5 milhões de m³ de petróleo e 2,8 bilhões de m³ de gás natural. Esse valor representou 256.000 m³ por dia de água produzida, dos quais 22.000 m³ por dia foram reinjetados nos poços para incremento da produção de petróleo ou disposição deste efluente e 234.000 m³ por dia foram tratados e descartados no oceano (Clarck et al., 2009).

No Brasil, a reinjeção para recuperação secundária de hidrocarbonetos é uma atividade comum e presente em quase todas as bacias sedimentares marítimas. Porém, para descarte, em poços secos não produtores ou poços já maduros de outras locações é praticamente inexistente nas operações brasileiras. Estas práticas apresentam vantagens econômicas, operacionais e ambientais, além de se tratarem de uma das poucas disponíveis para as atividades *offshore*, em substituição ou redução dos descartes no mar, reforçando a importância de serem consideradas para o gerenciamento de água produzida (Pinheiro et al., 2014).

Já nas operações em solo a reinjeção de água produzida é uma prática bastante comum, uma vez que elimina os problemas relacionados aos descartes da mesma que, geralmente, são proibidos em corpos hídricos de água doce ou devem atender a parâmetros muito rigorosos (Gabardo, 2007), além de evitar passar pelos processos de licenciamento específicos e necessários para estações de tratamento (Nascimento, 2009).

A reinjeção de água produzida nos reservatórios de óleo e gás deve ser incentivada, não só pela redução dos descartes no ambiente, como também pela redução da reutilização de recursos hídricos, que poderiam ser utilizados para outros fins, para recuperação e produção de hidrocarbonetos. Este fato baseia-se, principalmente, em atividades *onshore* onde é necessária a perfuração de outros poços para recuperação de água doce visando à injeção nos poços de produção.

Nascimento (2009) cita como exemplo o caso do Campo de Canto do Amaro, no Rio Grande do Norte, onde cerca de 60% da água reinjetada no poço para incrementar a produção é água produzida. Ou seja, trata-se de uma estratégia para reuso de água com fins industriais

como uma forma de racionalização e de conservação de recursos hídricos, em acordo com o preconizado pela Política Nacional de Recursos Hídricos.

Dentre os destinos possíveis para a água produzida, existe a possibilidade de reaproveitamento em atividades de grande relevância socioeconômica, como a utilização em campos para irrigação de plantações de oleaginosas no semiárido nordestino, opção esta bastante atraente e de elevado interesse sustentável (Xavier et al., 2010).

No Brasil, na Unidade de Produção do Rio Grande do Norte e Ceará, existe o problema da falta de destinação para a água produzida. Desta forma, o uso da água produzida com a finalidade de irrigação de oleaginosas para produção de biodiesel é uma opção atrativa, devido à qualidade da água desse campo, que possui baixa salinidade, e a situação atual de escassez hídrica no semiárido nordestino. Todavia, por ser uma iniciativa precursora, é preciso realizar um levantamento dos possíveis impactos no solo e na água subterrânea e também dos efeitos no plantio de culturas controladas (Pinheiro et al., 2014).

No Rio Grande do Norte a Petrobras possui uma Unidade de Tratamento e Processamento de Fluidos em Guamaré que recebe todo o escoamento da produção dos campos marítimos e terrestres da bacia potiguar e conta com terminais de armazenamento e transferência de petróleo, três unidades de processamento de gás natural, unidade de tratamento de óleo, uma planta de produção de diesel, uma planta de produção de querosene de aviação (QAV), uma planta de produção de biodiesel, além de laboratório próprio, subestações e estações de tratamento de água produzida (ANP, 2017).

2.6 Importância do girassol no Brasil e no Nordeste

O girassol pertencente ao gênero *Helianthus*, hélios, “sol” e anthos, “flor” que também faz menção ao movimento da flor em relação ao sol, movimento este conhecido como heliotropismo (Oliveira et al., 2005). É uma planta herbácea, dicotiledônea, pertencente à família das compostas, que possui um sistema radicular profundo, chegando a 2 m de profundidade, geralmente com inúmeras raízes secundárias; caule tipicamente não ramificado, ereto e cilíndrico; altura variando de 1,0 a 3,0 m; diâmetro da haste de 2,0 a 5,0 cm; folhas inferiores opostas e superiores, geralmente, alternadas com três nervuras principais de coloração variando de verde escuro a verde amarelo; inflorescência em capítulos, formados por inúmeras flores, situados em um receptáculo discoidal; flores do tipo lingulada e tubulosa; o fruto apresenta coloração diversificada; planta alógoma de polinização entomófila (Calegare et al., 1993).

A inflorescência pode ter formação plana, convexa ou côncava, com flores que se desenvolvem do exterior para o interior do capítulo, dando origem aos frutos (Castro et al., 1996). Os capítulos têm diâmetros de 6 a 50 cm, contendo de 100 a 8000 flores, sendo mais frequente um número de flores variando entre 800 e 1700 por capítulo. O caule e o capítulo são os componentes de maior participação na produção de massa do girassol.

No Brasil, o girassol demonstra um grande potencial de expansão, isso se deve a diversidade de aplicações em diferentes áreas como produção de ração, silagem, óleo para consumo humano, floricultura, alimentação animal, além de ser uma excelente alternativa de matéria-prima para a produção de biodiesel (Pereira et al., 2008). Portanto a inserção da cultura do girassol pode ser uma boa opção para a agricultura familiar regional ajudando no processo de inclusão social dos pequenos agricultores, propiciando fonte de renda, gerando mão-de-obra e matéria prima para inúmeras aplicações industriais, tornando-se uma excelente alternativa para a região, se fortalecer no programa do biodiesel brasileiro.

De acordo com a Conab (2017), a produtividade média nacional de girassol, prevista para a safra 2016/17 deverá ser da ordem de 1.419 kg ha⁻¹ significando aumento de 14,9%, em relação à safra 2015/16. A melhor média de produtividade das regiões produtoras, segundo o último levantamento de safra, deverá ser obtida no Sul, em torno de 1.626 kg ha⁻¹. Espera-se para o estado do Rio grande do Sul a maior produtividade de girassol do Brasil, significando um aumento de 21,4%, em comparação à safra passada. As estimativas de produção nacional de girassol, para a safra 2016/17, devem girar em torno de 72,5 mil toneladas, aumento em torno de 14,9%, se comparadas com a safra anterior.

De acordo com informações do setor produtivo, as condições climáticas e preços recebidos pelos produtores na época da pesquisa estavam estáveis no momento do plantio, considerando, ainda, que os insumos, principalmente os fertilizantes e os agrotóxicos, tiveram substancial aumento dada à elevação na cotação do dólar, e assim, aumentando, também, o custo de produção nos demais estados de maior produção (Conab, 2017)

Os estados de Mato Grosso do Sul, Goiás e Minas Gerais, foram os que menos sofreram com a estiagem, vez que obtiveram bons aumentos em suas produtividades, fato ocorrido face às boas condições climáticas nas regiões produtoras, propiciando boa produtividade em todos os estados pesquisados. Não houve aumento de área e sim aumento de produtividade que propiciou acréscimo na produção, em torno de 14,9%, se comparada com a safra passada (Conab, 2017)

A cultura do girassol vem apresentando um bom desempenho na região Nordeste, fazendo com que a mesma seja vista como mais uma alternativa de exploração comercial, principalmente para a agricultura familiar (Lira et al., 2011), porém, a área colhida,

produtividade e produção de girassol das regiões Norte e Nordeste encontram-se consideravelmente baixas quando comparadas com as demais regiões (Conab, 2014).

Nos últimos anos vem sendo cultivada pelos produtores do Rio Grande do Norte, no período chuvoso, em rotação com o melão irrigado, como também, sob irrigação no período seco, após a demanda devido ao programa do biodiesel (Cavalcante Júnior et al., 2011)

Ainda com relação ao Estado do Rio Grande do Norte, constata-se que as primeiras pesquisas desenvolvidas com o girassol foram iniciadas no ano de 2006, em diferentes mesorregiões do Estado, onde alguns resultados obtidos demonstram o alto potencial produtivo desta cultura para rendimentos de grãos e óleo, com valores superiores a 2.700 kg ha⁻¹ e a 44 %, respectivamente (Lira et al., 2011).

2.7 Fitoextração

Fitoextração é um ramo conceitual da fitorremediação e baseia-se na habilidade das plantas em absorver e concentrar espécies químicas de interesse em seus tecidos, sendo considerada a técnica mais efetiva da fitorremediação. De modo geral, o protocolo de fitoextração consiste no cultivo de uma ou mais espécies vegetais no solo contaminado; remoção/colheita da biomassa rica na espécie química extraída do solo; tratamento da biomassa removida/colhida e disposição segura (temporária ou final) desta; e eventual recuperação do metal a partir do material resultante da etapa anterior (Blaylock et al., 2000).

Ainda, de acordo com Pilon-Smits (2005), pode ser definida como uma técnica que emprega sistemas vegetais fotossintetizantes e sua microbiota associada, como agentes remediadores de ambientes contaminados com diferentes agentes orgânicos, como pesticidas, hidrocarbonetos de petróleo e inorgânicos, tais como metais pesados e radionucléicos. As plantas agem removendo, armazenando, transferindo, estabilizando e tornando inofensivos os metais pesados presentes no solo.

O sucesso da fitoextração é dependente de alguns fatores (Ernest, 1996): grau de contaminação do metal no solo; biodisponibilidade do metal; e capacidade das plantas em acumularem o metal na parte aérea. Além da quantidade total ou do grau da contaminação do elemento tóxico (fator quantidade), a atividade do elemento na solução do solo (fator intensidade) e o percentual de transferência do elemento da fase sólida para líquida e para as raízes das plantas (cinética da reação) são fatores importantes (Schimidt, 2003).

O emprego de plantas hiperacumuladoras se dá para remover os metais do solo pela absorção e pelo acúmulo nas raízes e na parte aérea, podendo ser, posteriormente, dispostas em aterros para resíduos especiais ou recicladas para a recuperação do metal. Essas plantas

são capazes de tolerar, absorver e translocar altos níveis de metais pesados que fossem tóxicos a qualquer outro organismo (Khan et al., 2000).

A planta ideal para fitoextração de metais pesados deve ser tolerante aos seus altos níveis, acumular grandes quantidades na parte aérea, ter alta taxa de crescimento, produzir muita biomassa e ter sistema radicular abundante (Garbisu et al., 2001). Outra maneira de se avaliar o potencial fitoextrator da espécie vegetal é o fator de transferência (t), definido como a razão entre a concentração total do contaminante na planta e a concentração total do contaminante no solo, proposta por Lubben et al. (1991). Valores elevados de t são desejáveis para fitoextração e quanto maior este fator, maior a absorção do contaminante (Henry, 2000).

As plantas hiperacumuladoras são altamente especializadas em acumular ou tolerar altíssimas concentrações elevadas de metais como: $> 10.000 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn e Mn; $> 1.000 \text{ mg kg}^{-1}$ de Pb, Ni e Cu; $>100 \text{ mg kg}^{-1}$ de Cd (Raskin et al., 1994). Até o momento, foram identificadas 400 plantas hiperacumuladoras, sendo a maioria originária de áreas contaminadas da Europa, Estados Unidos, Nova Zelândia e Austrália (Khan et al., 2000).

Estas plantas pertencem às famílias *Brassicaceae*, *Fabaceae*, *Euphorbiaceae*, *Asteraceae*, *Lamiaceae* e *Scrophulariaceae* (Garbisu et al., 2001). Algumas plantas possuem potencial para extrair vários metais do solo, outras são mais específicas. A *Brassica juncea* possui potencial para remediar solos com altos teores de Pb, Cr, Cd, Cu, Ni, Zn, Sr, B e Se; *Thlaspi caerulescens* para fitorremediar Cd, Ni e Zn; *Helianthus annuus*, *Nicotiana tabacum* e *Alyssum wulfenianum* para extrair Ni (Usepa, 2000).

Os mecanismos envolvidos na tolerância das plantas a altas concentrações de metais no solo são vários e, ainda, não muito bem definidos. Estes estão relacionados às diferenças na estrutura e no funcionamento das membranas celulares, na remoção de íons do metabolismo por armazenamento em formas fixas e/ou insolúveis em vários órgãos e organelas, alteração em padrões metabólicos, dentre outros (Mohr et al., 1995). De acordo com esses autores, a formação de fitoquelatinas foi a principal razão da tolerância de algumas espécies aos altos teores de Zn e Cd no solo.

Em plantas que acumulam substâncias tóxicas, a biomassa da planta contendo contaminante extraído pode ser um recurso que agrega valor. Por exemplo, biomassa contendo selênio (Se), um nutriente essencial, tem sido transportada para áreas deficientes em selênio e usada para complementar à alimentação animal (Pletsch et al., 1999). Como benefício indireto pode ser citada a melhoria da qualidade do solo com aumento da porosidade, maior infiltração de água, fornecimento de nutrientes através da ciclagem de nutrientes, aumentando a quantidade de carbono orgânico. Também estabiliza o solo, prevenindo contra processos erosivos (eólico e hídrico) e exposição direta do contaminante

aos humanos. Além do mais, podem-se adicionar grandes quantidades de nitrogênio atmosférico no solo, quando se utilizam, nos programas de remediação do solo, espécies que realizem simbiose eficiente com bactérias fixadoras de nitrogênio (Andrade et al., 2007).

Uma das limitações da fitoextração para remediar áreas contaminadas por metais pesados deve-se à baixa disponibilidade destes elementos no solo. Alguns autores têm sugerido a utilização de agentes quelantes que, segundo Shen et al. (2002), podem desorver o metal da matriz do solo para formar complexo solúvel, na solução do solo. A formação do complexo metálico é muito estável e, normalmente, não libera o íon metálico para a forma livre, a menos que haja uma queda significativa no pH do solo (Khan et al., 2000). Por isso, a formação do complexo quelato/ metal previne a precipitação e a sorção do metal e mantém sua disponibilidade para as plantas (Garbisu et al., 2001).

Estudos visando o estabelecimento da vegetação para minimizar o efeito de metais pesados no solo já foram realizados em regiões temperadas com vários tipos de plantas, entretanto, no Brasil ainda são incipientes. Geralmente, as pesquisas desenvolvidas relacionam espécies vegetais e o acúmulo de metais pesados visando estabelecer quais são as que possuem maior poder de fitoextração.

As plantas de girassol (*Helianthus annuus L.*) podem ser utilizadas para remediação de solos contaminados com metais pesados, sendo plantas capazes de remover grandes quantidades de chumbo, cobre e zinco (Yeh et al., 2015), além de tolerar altas concentrações de metais no solo (Zalewska et al., 2014; Herzig et al., 2014). Adicionalmente, o girassol é sabidamente uma planta produtora de óleo, o qual pode ser utilizado para a produção de biocombustível, permitindo, desta forma, melhorar o balanço econômico do processo de fitorremediação (Nehnevajova et al., 2005; Yeh et al., 2015).

Schimidt (2003) relata que, apesar do girassol (*Helianthus annuus*) apresentar baixa produção de biomassa, pode acumular mais de 5 g kg⁻¹ de Pb na matéria seca, demonstrando boas perspectivas para fitoextração. De maneira geral, as monocotiledôneas são menos eficientes na fitoextração de metais pesados quando comparadas às dicotiledôneas (Huang et al., 1996).

Considera-se ainda como umas das principais vantagens do uso de girassol nos processos de fitorremediação o fato da planta apresentar ciclo vegetativo curto, aproximadamente 110 dias entre plantio e colheita (Lima, 2010) e poder ser cultivada em diferentes tipos de solo, variações de temperatura e pH. Com grande importância econômica, o girassol apresenta baixa incidência de doenças e pragas, contribuindo para o aumento da eficiência da fitorremediação e facilitando os trabalhos de manejo (Lima, 2010; Mariano et al., 2012).

Resultados obtidos por Abreu (2014) mostraram que o girassol é tolerante à concentração de até 0,6 mM Pb no meio de cultivo e ainda que os teores de N, P e K não apresentaram relação com a toxidez de Pb.

2.8 Efeitos da água produzida no solo e no girassol

No estado da Califórnia, nos Estados Unidos da América (EUA), mais especificamente no distrito de Cawelo, o uso da água produzida tratada na irrigação é realizado em cultivos como: amêndoas, pistácio, cenoura, batata, tomate e outras culturas. Sendo um processo que ocorre a mais de 20 anos devido à grande seca que este estado sofre todos os anos (Grossman, 2016).

A empresa Chevron, dona dos campos de petróleo da região, é a responsável por tratar a água produzida e distribuí-la para os agricultores. Esta água, após tratada, é misturada com águas de outras fontes para diminuir a salinidade e assim ficar adequada para utilizar na irrigação. Por dia são produzidos cerca de 760 mil barris, sendo metade deste montante enviado para o distrito aquático de Cawelo (Norimitsu et al., 2014).

No Texas a A&M University, criou um projeto para desenvolver um sistema para tratamento de água produzida, que pode ser transportado para campos de petróleo, permitindo transformar água produzida em água potável ou de irrigação. O objetivo é produzir água adequada para utilizar na agricultura (com menos de 0,05 mg L⁻¹ de hidrocarbonetos e menos de 500 mg L⁻¹ de sólidos totais dissolvidos). Permitindo o aumento do abastecimento de água em regiões secas e proporcionando um retorno econômico para as empresas (Veil et al., 2004).

No Campo da Fazenda Belém que pertence a Bacia Potiguar foi desenvolvido um projeto que visa estudar a possibilidade de reuso da água produzida para fins de irrigação, avaliando os seus efeitos no solo e na água subterrânea bem como na germinação, crescimento e produção de oleaginosas e flores ornamentais. O projeto objetivou que a água produzida passasse por vários tratamentos na planta, incluindo processos avançados de filtração e dessalinização, para viabilizar seu reuso (Pinheiro et al., 2014).

Meneses et al. (2017) estudaram os atributos microbiológicos do solo cultivado com mamona cv. BRS Energia, e girassol cv. BRS 321 por dois e três ciclos consecutivos, respectivamente, no município de Aracati-CE. As culturas foram submetidas à irrigação com água produzida filtrada e tratada pelo método da osmose inversa. Verificou-se que a irrigação com água produzida afeta a atividade microbiológica e o carbono orgânico do solo quando cultivado com girassol. Já o cultivo com mamona afetou negativamente a respiração do solo.

Weber et al. (2017) pesquisaram os efeitos da irrigação com água produzida de campos de petróleo sobre a concentração de alguns nutrientes do solo, assim a produção e a concentração de nutrientes nas raízes e nas partes aéreas do girassol ornamental por três ciclos de produção sucessivos. As plantas de girassol foram cultivadas em um Neossolo Quartzarênico no Estado do Ceará, e irrigadas por gotejamento, com água produzida de petróleo tratada por filtração e por osmose inversa, além disso, para efeito comparativo, plantas de girassol também foram irrigadas por gotejamento, com água do poço do aquífero Açu. A irrigação com água produzida tratada por filtração modificou a concentração de sais trocáveis no solo, ao aumentar o sódio nas camadas superficiais, o que afetou o crescimento vegetativo e o acúmulo de nutrientes nas raízes e nas partes aéreas das plantas, já a água tratada por osmose reversa tem um efeito menor nos nutrientes do solo e não foi capaz de modificar o desempenho agrônômico do girassol ornamental, em comparação à irrigação com a água de poço.

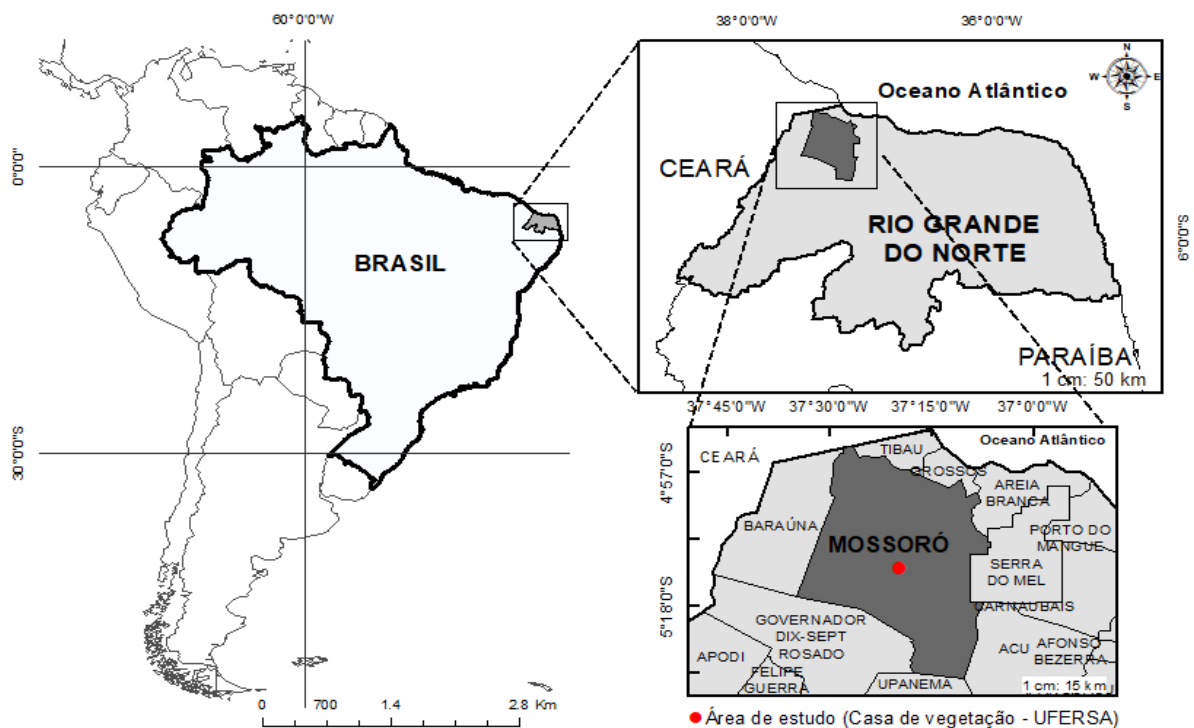
Sousa et al. (2016) em experimento na Fazenda Belém avaliaram as mudanças nutricionais em girassol depois de serem irrigadas com água produzida e os seus efeitos na biomassa vegetal e na produção de sementes. Ao final do ciclo, raízes, parte aérea e grãos foram coletados para determinar as concentrações de nutrientes. Constatou-se que a irrigação com água produzida afetou o acúmulo de nutrientes nas plantas de girassol. Irrigação com tratamento por osmose reversa promoveu acúmulo de Ca, Na, N, P e Mg. Plantas irrigadas com água produzida filtrada acumularam maiores teores de Na em raízes e na parte aérea, e afetou negativamente a produção de biomassa e de grãos de girassol. Os níveis de sódio na parte aérea de plantas irrigadas com água produzida filtrada aumentaram, ao longo do ciclo de cultivo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização da área experimental

O trabalho foi conduzido em casa de vegetação (Figura 1), no Departamento de Ciências Agrônômicas e Florestais do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, Mossoró, RN, Brasil (05 12' 03,9" LS; -37 19' 37,98" LO). A casa de vegetação possui cobertura de polietileno de baixa densidade transparente, com 0,10 mm de espessura, tratada contra a ação de raios ultravioleta e em formato tipo arco, com 7,0 m de largura e 21 m de comprimento. As paredes laterais e frontais são confeccionadas com telas antiafídeos e rodapé de 0,30 m em concreto armado.

Figura 1. Localização da casa de vegetação na UFERSA, campus Mossoró-RN.



Fonte: Arquivo da pesquisadora (2018).

O clima da região, segundo a classificação de Köppen-Geiger, é do tipo BSw^h (quente e seco), com precipitação pluviométrica bastante irregular, com média anual de 673,9 mm; temperatura média de 27,4 °C, umidade relativa do ar média de 68,9%, insolação média diária de 7,83 horas e anual de 2771,27 horas de brilho solar e velocidade média do vento de 0,84 m s⁻¹, durante um período histórico de 30 anos (Alvares et al., 2013).

3.2 Origem do efluente e da água de abastecimento utilizadas nos ensaios experimentais

A água produzida utilizada no experimento foi fornecida por em uma empresa independente produtora de petróleo na região da Bacia Potiguar. Foram realizadas três coletas de água em caixas com capacidade para 1.000 L.

Após a coleta a água produzida foi tratada no local do experimento com o AGEFLOC DW-3753 que é um polímero orgânico, fortemente catiônico sendo um polieletrólito para floculação de matéria suspensa em campos de petróleo e água em geral. Em solução aquosa este produto apresenta alta concentração de carga catiônica, elevado poder coagulante, acelerando a velocidade na formação de flocos em relação aos poliméricos ainda, atua removendo matérias orgânicas e inorgânicas. Aplicou-se 40 ml do polímero para cada 1.000 L de água produzida. Esperou-se um período de dois dias para que houvesse a decantação do material suspenso e separação da água do óleo para sua utilização.

A água de abastecimento utilizada para a diluição da água produzida tratada foi oriunda de poço tubular gerenciado pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN).

3.2 Caracterização das diluições da água produzida tratada em água de abastecimento

Durante o período experimental foi realizado a caracterização físico-química da água produzida e da água de abastecimento, mensalmente, por meio da coleta de três amostras no período de setembro a dezembro de 2017. Após a coleta, as amostras foram preservadas em caixas isotérmicas com gelo à temperatura de 4° C até a entrada das mesmas no laboratório.

As amostras compostas foram encaminhadas para o Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP) pertencente à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), onde determinaram-se, seguindo as recomendações da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa (Silva, 2009): o potencial hidrogeniônico (pH) medido com o pHmetro; a condutividade elétrica medida por condutivímetro; as concentrações de cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), cloreto (Cl^-), carbonato (CO_3^{2-}) e bicarbonato (HCO_3^-) por método titulométrico, expressos em $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; sódio (Na^+) e potássio (K^+) por fotômetro de chama, também expressos em $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; as concentrações de cobre (Cu), zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn), níquel (Ni), cádmio (Cd) e chumbo (Pb) por espectrofotometria de absorção atômica, expressas em mg L^{-1} . Com os valores de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} determinou-se a relação de adsorção de sódio (RAS) por meio da metodologia de Richards (1954), conforme equação 1:

$$RAS = \frac{Na^+}{\left(\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}} \right)} \quad (1)$$

Em que:

RAS - Razão de adsorção de sódio, $mmol_c L^{-1}$;

Na^+ - Concentração de sódio, $mmol_c L^{-1}$;

Ca^{2+} - Concentração de cálcio, $mmol_c L^{-1}$ e;

Mg^{2+} - Concentração de magnésio, $mmol_c L^{-1}$.

3.2 Caracterização do solo da área experimental

O solo utilizado no preenchimento dos vasos foi oriundo da Fazenda Experimental Rafael Fernandes na comunidade de Alagoinha sendo classificado como Argissolo Vermelho Distrófico Típico (Rego et al., 2016).

Foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0 a 0,10 m e de 0,10 a 0,20 para a caracterização inicial do solo. Para a realização de análises químicas e físicas no Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP) da UFERSA, seguindo a metodologia de Teixeira et al. (2017) (Tabelas 4 e 5):

Tabela 4. Características químicas iniciais do solo

Prof. (m)	pH	CE _{es} dSm ⁻¹	MO g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	Pmg dm ⁻³	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺ Cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺	Femg dm ⁻³	Mn	Zn	Cu
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	1,0	1,95	0,55	0,2	0,02
Prof. (m)	Al ³⁺cmol _c dm ⁻³	H+Al	SB	T	CTC	V	M	PST					
0,00 a 0,10	0,0	1,49	1,89	1,89	3,37	56	0	1,00					
0,10 a 0,20	0,15	1,97	1,49	1,64	3,47	43	9	1,00					

Fonte: Arquivo da pesquisadora (2018).

Tabela 5. Características físicas iniciais do solo

Prof.(m)	Densidade do solo	Massa Específica de partículas	Areia	Silte	Argila	Classe Textural	Relação Silte/Argila
	g cm ⁻³	g cm ⁻³ kg kg ⁻¹				
0,00 a 0,10	1,78	2,78	0,9	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: Arquivo da pesquisadora (2018).

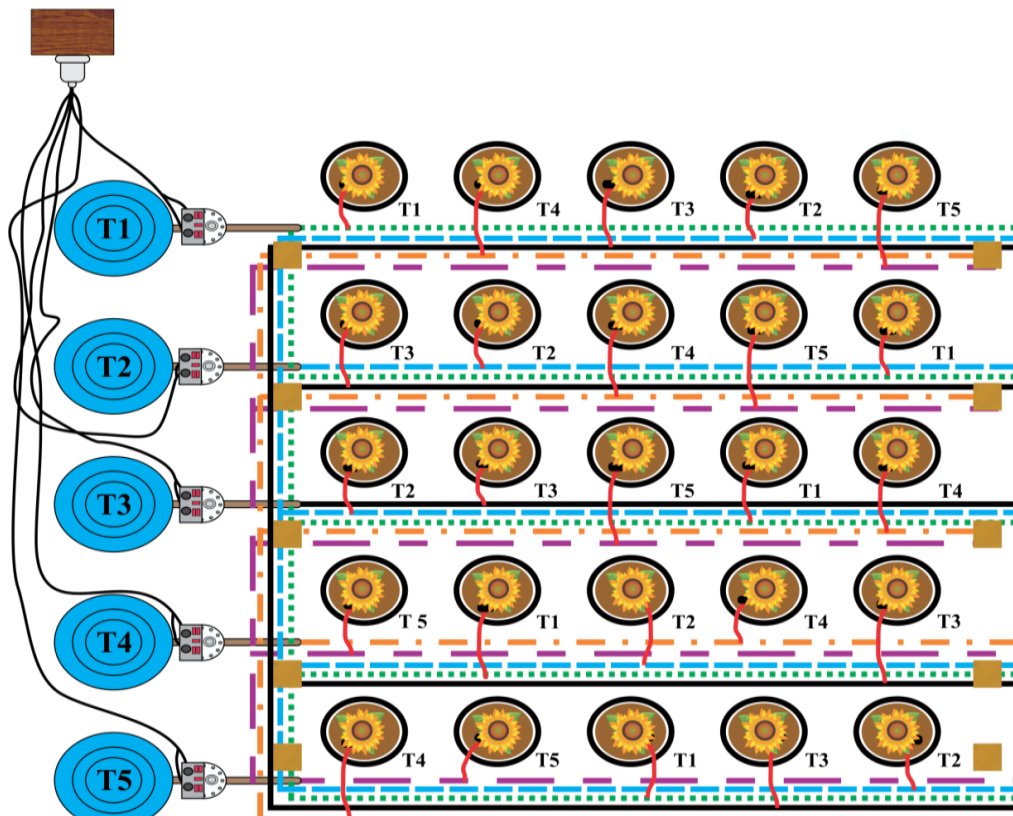
A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (análise granulométrica (areia, silte e argila) determinada conforme o método da pipeta; pH em água (relação 1 : 2,5); CE 1 : 2,5 - condutividade elétrica do solo na relação 1 : 2,5; MO - matéria orgânica determinada pelo método Walkley-Black; P, K e Na - fósforo disponível, potássio e sódio trocável, extraídos com Melich, Ca, Mg, e Al - cálcio, magnésio e alumínio trocáveis, extraídos com KCl 1 mol L⁻¹. As concentrações de Ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), níquel (Ni), chumbo (Pb) e cádmio (Cd) foram extraídos com Mehlich e determinados por espectrofotometria de absorção atômica, todas essas análises seguiram a metodologia de Teixeira et al. (2017).

3.3 Instalação e condução do experimento

3.3.1 Parcelas experimentais e tratamentos

O experimento foi montado no delineamento em blocos casualizados com cinco tratamentos e cinco repetições (Figuras 2 e 3).

Figura 2. Croqui da área experimental



Fonte: Arquivo da pesquisadora (2018).

Figura 3. Girassol irrigado com proporções de água produzida tratada e água de abastecimento



Fonte: Arquivo da pesquisadora (2018).

Os tratamentos seguiram as recomendações de diluição da água residuária em água de abastecimento propostas por Costa et al. (2018), com o intuito de minimizar os riscos de salinização e sodificação do solo. Os tratamentos utilizados foram os seguintes:

- T1 - 100% de água de abastecimento e 0% de água produzida tratada;
- T2 - 75% de água de abastecimento e 25% de água produzida tratada;
- T3 - 50% de água de abastecimento e 50% de água produzida tratada;
- T4 - 25% de água de abastecimento e 75% de água produzida tratada; e
- T5 - 0% de água de abastecimento e 100% de água produzida tratada.

Para a aplicação dos tratamentos, o sistema de irrigação foi montado com os seguintes componentes:

- Cinco reservatórios de PVC (60 L);
- Cinco eletrobombas de circulação Metalcorte/Eberle, autoventilada, modelo EBD250076;
- Linhas laterais de 16 mm; e
- Emissores do tipo microtubos, com vazão média de $1,5 \text{ L h}^{-1}$.

As diluições foram realizadas com baldes graduados e em seguida armazenadas dentro de cada reservatório correspondente ao seu respectivo tratamento.

A cultura utilizada no experimento foi o girassol (*Heliantus annus*), cultivar H-360 da Embrapa Semiárido. O espaçamento utilizado no experimento foi de 1,0 m entre fileiras de plantas por 0,60 m entre plantas (Figuras 2 e 3).

3.3.2 Implantação do experimento e cultura utilizada

A cultura utilizada no experimento foi o girassol (*Heliantus annus*), cultivar H-360 da Embrapa Semiárido. As mudas de girassol foram transplantadas para o campo 12 dias após a sementeira. Para isso, houve o semeio em bandejas de polietileno de 200 cédulas, preenchidas com substrato comercial GOLDEN MIX a base de fibra de coco, seguindo as recomendações de Costa et al. (2018).

O transplante aconteceu no dia 14 de setembro de 2017 para 25 vasos acomodados dentro de uma casa de vegetação no campo oeste da UFRSA Mossoró-RN. Os vasos de 32L foram preenchidos com brita (nº zero) cobrindo a sua base e o Argissolo Vermelho Distrófico Típico proveniente da Fazenda Experimental Rafael Fernandes. Para garantir o pegamento das mudas, a irrigação foi realizada somente com água de abastecimento de maneira uniforme em toda a área experimental, durante os primeiros 20 dias de cultivo do girassol. Após esse período, aos 20 dias após o transplante (DAT) foi realizada primeira irrigação com as diluições de água produzida tratada.

Todas as parcelas receberam adubação de fundação com uma única aplicação de uréia, MAP, cloreto de potássio e ácido bórico seguindo as recomendações de Cfseng et al. (1999) e Raij et al. (1996). Ainda, foi realizado controle químico para pragas e doenças.

Determinou-se a demanda hídrica do girassol utilizando-se coeficientes de ajuste sobre a evapotranspiração de referência (ET₀). A lâmina bruta de irrigação foi calculada por meio de um balanço hídrico, em que a entrada de água foi a irrigação e a saída, a evapotranspiração da cultura (ET_c). Empregou-se a Equação 2, proposta por Doorenbos e Pruitt (1977), modificada por Mantovani e Costa (1998), para se estimar a ET_c:

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (2)$$

Em que:

ET_c - evapotranspiração da cultura, em mm d⁻¹;

ET₀ - evapotranspiração de referência, em mm d⁻¹; e

K_c - coeficiente de cultura, adimensional.

A necessidade hídrica foi estimada com base na evapotranspiração de referência, empregando a equação de Penman-Monteith (Allen et al., 2006), descrita na Equação 3.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (3)$$

Em que:

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

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

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

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

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 $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$; e

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

Os dados meteorológicos que foram utilizados na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) foram: velocidade do vento, umidade relativa do ar, insolação, radiação solar e temperatura, obtidos de uma estação meteorológica instalada dentro da casa de vegetação.

Para estimar a evapotranspiração da cultura (ET_c) utilizaram-se os valores de coeficiente de cultura (K_c) obtidos por Cavalcante Júnior (2011) no município de Apodi-RN. Segundo o referido autor, os valores de K_c obtidos para os diferentes estádios de desenvolvimento do girassol foram de 0,52; 0,70; 0,98 e 0,81 para as respectivas fases I, II, III e IV. Estes valores de K_c ficaram próximos aos aconselhados pela FAO, no seu manual 56, para a cultura do girassol (Allen et al., 2006).

Durante o ciclo do girassol em campo (90 dias após o transplante - DAT) foi aplicada uma lâmina bruta de irrigação de 435,35 mm divididas em cinco diluições de água produzida tratada (AP) em água de abastecimento (AA), como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Lâminas brutas acumuladas no período de 90 dias de aplicação de água produzida tratada (AP) e água de abastecimento (AA).

Tratamentos	Lâminas de AP (mm)	Lâminas de AA (mm)	Lâminas totais (mm)
T1	0	435,35	435,35
T2	108,84	326,51	435,35
T3	217,67	217,67	435,35
T4	326,51	108,84	435,35
T5	435,35	0	435,35

Fonte: Arquivo da pesquisadora (2018).

3.4 Características avaliadas

3.4.1 Monitoramento do solo após aplicação de água produzida tratada

Para avaliação da qualidade do solo foram coletadas amostras nas camadas de 0 a 0,10 m; 0,10 a 0,20 m; de cada vaso com auxílio de trado tipo holandês, após a colheita do girassol.

No Laboratório de Análises de Água, Solo e Planta (LASAP) da UFERSA foram determinadas as seguintes características químicas do solo: potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K^+), sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), cádmio (Cd) e chumbo (Pb), segundo as recomendações técnicas da segunda metodologia de Teixeira et al. (2017).

3.4.2 Determinação de características produtivas e agrônômicas do girassol irrigado com proporções de água produzida e água de abastecimento

A colheita foi realizada manualmente, 90 dias após do plantio (DAT). Para a análise de desenvolvimento da planta foram determinadas as características altura de planta (AP), número de folhas (NF), diâmetro de caule (DC) e diâmetro do capítulo (DCA) e produtividade (PROD).

3.4.2.1 Altura de planta

A determinação da altura de plantas ocorreu aos 90 DAT, com o auxílio de uma trena métrica graduada em centímetros, foi mensurada a altura das plantas, sendo considerada como altura da planta a distância vertical do nível do solo até a altura da inserção do capítulo.

3.4.2.2 Número de folhas

Foi avaliado o número de folhas totalmente abertas por plantas emitidas aos 90 DAT, por meio da contagem direta das folhas.

3.4.2.3 Diâmetro do caule

Com o auxílio de um paquímetro, foi mensurado o diâmetro basal do caule, a uma altura de aproximadamente 5 cm da superfície do solo. As coletas foram realizadas aos 90 DAT.

3.4.2.4 Diâmetro do capítulo

Aos 90 DAT, com auxílio de uma fita métrica mensurou-se a distância de uma extremidade à outra do capítulo.

3.4.2.5 Produtividade

O girassol atingiu o ponto de colheita 90 DAT, no dia 08 de dezembro de 2017. Os capítulos foram colhidos em cada parcela e em seguida os grãos foram separados manualmente e pesados, obtendo-se a produtividade do girassol.

3.4.3 Determinação do estado nutricional das plantas de girassol irrigadas com água produzida tratada e água de abastecimento

Após a colheita do girassol, aos 90 DAT, foram coletadas as plantas de girassol onde realizou-se a separação de capítulo, caule, raiz, folhas. Foi realizada análise da composição química do tecido vegetal, do girassol no LASAP/UFERSA, de acordo com os procedimentos analíticos recomendados por Carmo et al. (2000) e Bataglia et al. (1983). As mesmas foram

identificadas e acondicionadas em sacos de papel para secagem em estufa de circulação forçada de ar com temperatura de 65°C, onde o material permaneceu por 72 h. Após a secagem do material vegetal, maceraram-se as partes vegetais com o auxílio de um cadinho de porcelana.

Após o material vegetal macerado foi realizada a digestão sulfúrica. Transferiu-se 0,4 g de matéria seca para um tubo digestor de 100 mL e adicionou-se 2 mL de H₂O₂ 30% P.A. , 4 mL de H₂SO₄ 98% P.A. e 0,7 g de mistura de três reagentes: 100 g de K₂SO₄, 10 g de CuSO₄.5H₂O e 1 g de Se, separadamente (Ferreira, 2014).

Nas amostras secas e trituradas, da parte aérea e do sistema radicular do girassol foram determinados os teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu), níquel (Ni), cádmio (Cd) e chumbo (Pb). As determinações foram obtidas por fotometria de chama para potássio e sódio, e em espectrofotômetro de absorção atômica para os demais elementos.

3.4.4 Determinação do Fator de Translocação (FT) e Fator de Bioacumulação (FB)

O Fator de Translocação e Bioacumulação são parâmetros utilizados para identificar a capacidade hiperacumuladora das plantas em relação a diversos elementos que podem ser absorvidos pelas mesmas. Para isto, o Fator de Translocação e o Fator de Bioacumulação, descritos por Ma et al. (2001), Fayiga et al. (2006) e Yoon et al. (2006), foram calculados através das Equações 4 e 5:

$$FT = \frac{CF}{CR} \quad (4)$$

Em que:

FT = Fator de translocação;

CF = Concentração dos elementos nas folhas; e

CR = Concentração dos elementos nas raízes.

$$FB = \frac{CT}{CS} \quad (5)$$

Em que:

FB = Fator de bioacumulação;

CT = Concentração dos elementos na planta (folha + raízes); e

CS = Concentração dos elementos no solo.

De acordo com os valores do fator de transferência calculado, as plantas podem ser classificadas como: a) Eficientes em translocar elementos quando o fator de translocação de elemento testado da raiz para parte aérea – $FT > 1$; e b) ineficientes quando o $FT < 1$. De acordo com o fator de bioacumulação, as plantas também podem ser classificadas como: a) Acumuladoras quando o fator de bioacumulação – $FB > 1$; b) Indicadoras, $FB = 1$, e c) excludoras $FB < 1$ (Ma et al., 2001; Fayiga, et al., 2006; Yoon et al., 2006).

3.5 Experimentação e análises estatísticas

Os dados das características químicas da água produzida tratada e água de abastecimento foram submetidos à análise estatística descritiva, por meio da determinação da média e desvio padrão.

Para análise estatística dos dados referentes ao solo, o experimento foi montado no esquema de parcelas subdivididas tendo nas parcelas os tratamentos, nas subparcelas as profundidades de amostragem (0 a 0,10 m, 0,10 a 0,20 m. O delineamento utilizado foi em blocos casualizados com cinco repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância utilizando-se o teste F a 5% de probabilidade.

Para análise estatística dos dados referentes à planta o delineamento utilizado foi em blocos casualizados com cinco repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância utilizando-se o teste F a 5% de probabilidade.

Os dados referentes às características do solo e as características agronômicas e químicas do girassol foram submetidos à análise de variância pelo programa computacional SISVAR (Sistemas para Análises de Variância) desenvolvido por Ferreira (2011), realizando teste de Tukey e contrastes ortogonais para comparação múltipla das médias.

Os contrastes foram: 1) tratamento T5 versus demais tratamentos (T1, T2, T3 e T4); 2) tratamento 4 versus tratamentos T1, T2 e T3); 3) tratamento T3 versus tratamentos T1 e T2 e 4) tratamento T2 versus tratamento T1. A combinação dos contrastes com as médias dos tratamentos foi expressa da seguinte forma, conforme proposto por Costa et al. (2018):

$$C1 = 12 m_1 + 12 m_2 + 8 m_3 + 10 m_4 - 42 m_5$$

$$C2 = 30 m_1 + 30 m_2 + 20 m_3 - 80 m_4$$

$$C3 = 6 m_1 + 6 m_2 - 12 m_3$$

$$C4 = 6 m_1 - 6 m_2$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Características químicas da água produzida e de abastecimento

A Tabela 7 apresenta as características químicas da água produzida tratada e da água de abastecimento utilizados na irrigação do girassol, durante 90 dias após o transplante.

Tabela 7. Valores médios das características físico-químicas das diluições da água produzida tratada em água de abastecimento, resultantes de quatro amostragens realizadas de setembro a dezembro de 2017.

Características	Tratamentos				
	T1	T2	T3	T4	T5
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)	0,07	0,08	0,09	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
Cr (mg L ⁻¹)	0,011	0,022	0,043	0,056	0,055
Al (mg L ⁻¹)	0,076	0,029	0,131	0,036	0,005
As (mg L ⁻¹)	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000
Ba (mg L ⁻¹)	0,619	2,673	3,191	3,903	5,219

Fonte: Arquivo da pesquisadora (2018).

As análises químicas da água (Tabela 7) demonstram que a formação geológica e a localização geográfica ditam as características químicas da água produzida de modo que, a água produzida analisadas apresentam resultados semelhantes a água de abastecimento. As formações geológicas presentes na área de estudos são os calcários da Formação Jandaíra, que compreendem calcarenitos e calcilutitos bioclásticos e os arenitos da Formação Açu, de granulação média a grosseira, com intercalação de argilitos no sentido do topo. Ambas as formações estão reunidas no Grupo Apodi (Angelim et al., 2006).

Os valores médios de pH das diluições de água produzida tratada oscilaram de 8,46 a 8,73; com exceção de T4, os demais tratamentos apresentaram valores de pH acima do limite superior da faixa de 6,0 a 8,50 estabelecida pela Resolução COEMA nº 2/2017 (Ceará, 2017) para reúso da água em atividades agrícolas e florestais. Segundo Bucks et al. (1979), os valores médios de pH de todos os tratamentos foram superiores ao limite superior de 7,50, indicando risco severo de obstrução de gotejadores, devido à possibilidade de precipitação de sais.

A condutividade elétrica média das diluições de água produzida tratada variaram de 0,56 a 0,71 dS m⁻¹, valores esse inferiores ao limite de 3,0 dS m⁻¹ proposto pela Resolução COEMA nº 2/2017 (Ceará, 2017) para reúso da água em atividades agrícolas e florestais. Além disso, todos os valores de condutividade elétrica dos tratamentos ensaios foram inferiores ao limite de 1,0 dS m⁻¹ apresentado por Capra & Scicolone (1998), indicando baixo risco de obstrução de gotejadores com relação a essa característica.

Para os cátions cálcio e magnésio, os valores médios oscilaram de 1,00 a 2,00 mmol_c L⁻¹ e de 0,11 a 0,80 mmol_c L⁻¹, respectivamente, em relação os tratamentos estudados. Segundo Capra e Scicolone (1998), as concentrações médias do cálcio e magnésio presentes nas diluições de água produzida tratada representam baixo risco de obstrução de gotejadores (cálcio < 12,5 mmol_c L⁻¹ e magnésio < 2,0 mmol_c L⁻¹). Almeida (2010) apresenta as faixas de 0 a 20 mmol_c L⁻¹ para o cálcio e de 0 a 5 mmol_c L⁻¹ para o magnésio, no que se refere a qualidade da água para fins de irrigação. Assim os teores destes elementos nas diluições da água produzida tratada não apresentam problemas para seu uso na irrigação.

O teor médio de sódio das diluições de água produzida tratada variou de 2,30 a 4,00 mmol_c L⁻¹ nos tratamentos ensaiados, entretanto observou-se nos tratamentos T2 a T5 valores médios de sódio superiores ao limite de 3,00 mmol_c L⁻¹ estabelecido por Ayers & Westcot (1999), no que se refere à toxicidade desse íon para as plantas. Ainda, segundo Ayers & Westcot (1999), o excesso de sódio pode dificultar o atendimento à demanda hídrica da cultura e gerar problemas tais como encrostamento na superfície do solo, redução na emergência de plântulas, falta de aeração, doenças de plantas, problemas de controle de ervas daninhas e

mosquitos causados pela baixa taxa de infiltração podem complicar ainda mais o manejo da cultura.

Verificou-se que a relação sódio/cálcio foi de 1,65, 2,71, 2,75, 3,00 e 2,00 para os tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente, e que em nenhum dos tratamentos a relação sódio/cálcio foi superior ao limite (3:1) estabelecido por Ayers & Westcot (1999), indicando pouco risco de redução na infiltração de água no solo, devido à dispersão das argilas e entupimento dos poros da superfície do solo.

Todos os valores médios da razão de adsorção de sódio (RAS) dos tratamentos foram inferiores ao limite de $15 \text{ (mmol}_c\text{L}^{-1})^{0,5}$ estabelecida pela Resolução COEMA nº 2/2017 (Ceará, 2017) para reúso da água em atividades agrícolas e florestais. Analisando conjuntamente os valores médios de RAS e da condutividade elétrica, verificou-se que nenhuma das diluições da água produzida tratada gera risco de redução da infiltração de água no solo, conforme evidenciado na classificação proposta por Ayers & Westcot (1999).

Os valores médios de potássio variaram de 0,30 a 0,40 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, estando os valores de todos os tratamentos acima do limite superior da faixa de 0 a 0,05 $\text{mmol}_c\text{L}^{-1}$ proposta por Almeida (2010), em relação a qualidade da água para fins de irrigação.

As concentrações médias de cloreto presentes nas diluições de água produzida tratada oscilaram de 2,40 a 3,80 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, indicando que os teores de cloreto dos tratamentos T2 a T5 são superiores ao limite de 3,00 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ que pode resultar em toxicidade de plantas irrigadas por aspersão (Ayers & Westcot, 1999). No entanto, os referidos autores afirmaram, também, que no caso da irrigação por superfície esse limite é de 4,00 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ e nessa situação nenhuma das diluições de água produzida tratada apresenta restrição de uso.

Os teores de carbonato e bicarbonato das diluições de água produzida tratada variaram de 0,50 a 0,70 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ e de 2,00 a 4,00 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, respectivamente. Os teores de carbonato encontram-se dentro da faixa estabelecida por Almeida (2010) para águas destinada a irrigação de cultivos agrícolas. Já os teores de bicarbonatos estão dentro da faixa de 1,50 a 8,50 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ apresentada por Ayers & Westcot (1999), que classifica o risco do uso dessas águas para fins de irrigação como leve a moderado, no que se refere a formação de depósitos brancos nos frutos, folhas e flores das culturas irrigadas por aspersão.

Elevadas concentrações de bicarbonato no efluente podem favorecer a concentração de bicarbonato na água do solo, concentrando-se devido à evapotranspiração, ocorrendo um aumento nas concentrações de cálcio e magnésio, precipitando os sais insolúveis (NSW, 2004).

O cobre e o zinco apresentaram faixas de variação de 0,070 a 0,085 mg L^{-1} e de 0,019 a 0,054 mg L^{-1} nas diluições de água produzida tratada, respectivamente. Léon Suematsu &

Cavallini (1999) apresentam os limites de 0,20 e 2,00 mg L⁻¹ para o cobre e zinco, em relação a fitotoxicidade da água de irrigação para as plantas. Evidenciou-se que todos os teores de cobre e zinco estão dentro dos limites propostos por León Suematsu & Cavallini (1999).

Os teores de manganês e ferro oscilaram de 0,007 a 0,069 mg L⁻¹ e de 0,008 a 0,038 mg L⁻¹ nas diluições de água produzida tratada, respectivamente. Valores esses inferiores aos limites de 0,20 e 5,00 mg L⁻¹ estabelecidos por León Suematsu & Cavallini (1999) para o manganês e ferro, quanto a fitotoxicidade das plantas em relação a qualidade da água de irrigação. Os referidos autores afirmaram que o excesso de manganês causa maior fitotoxicidade às plantas em solos mais ácidos e que teores elevados de ferro podem acidificar o solo e reduzir a disponibilidade de fósforo e molibdênio. O risco de obstrução de gotejadores precipitado pelo manganês (manganês < 0,10 mg L⁻¹) e ferro (ferro < 0,20 mg L⁻¹) é baixo em todas as diluições de água produzida tratada, conforme critérios de Bucks et al. (1979).

As concentrações de níquel, nas diluições de água produzida tratada, variaram de 0,007 a 0,017 mg L⁻¹ todas inferiores ao limite de 0,20 mg L⁻¹ apresentado por León Suematsu & Cavallini (1999) quando a fitotoxicidade de plantas à água de irrigação. Os referidos afirmaram também que essa fitotoxicidade às plantas é reduzida em solos com pH neutro ou alcalino.

Os teores de cádmio, nos tratamentos T2 e T5, ultrapassaram o limite de 0,01 mg L⁻¹ proposto por León Suematsu & Cavallini (1999) mesmo com o tratamento da água produzida do petróleo. Os referidos autores alertaram sobre o risco ambiental do cádmio em função do seu potencial de acumulação no tecido vegetal e no solo.

Nas diluições de água produzida tratada, as concentrações de chumbo oscilaram de 0,11 a 0,28 mg L⁻¹, valores esses inferiores ao limite de fitotoxicidade de plantas de 5,0 mg L⁻¹ apresentado por León Suematsu & Cavallini (1999). Estes autores relataram que o chumbo pode inibir o crescimento de certas plantas em concentrações elevadas.

Os teores de cromo, nas diluições de água produzida tratada, variaram de 0,011 a 0,056 mg L⁻¹ e foram inferiores ao limite de fitotoxicidade às plantas de 0,10 mg L⁻¹ apresentado por León Suematsu & Cavallini (1999). Os referidos autores informaram que o cromo não é um elemento essencial ao crescimento de plantas.

As concentrações de alumínio e de arsênio, nas diluições de água produzida tratada, foram inferiores aos limites de fitotoxicidade às plantas de 5,00 e 0,10 mg L⁻¹ (León Suematsu & Cavallini, 1999), respectivamente. Estes autores afirmaram que o excesso de alumínio acarreta perda de produtividade das culturas em solos ácidos, mas em solos alcalinos poderá ocorrer a precipitação, o que elimina o seu risco de toxicidade.

Os teores de bário, nas diluições de água produzida tratada, oscilaram de 0,619 e 5,219 mg L⁻¹, notou-se que o teor de bário nas diluições com menos ou nenhuma quantidade de água de abastecimento, o aparecimento do bário na água produzida pode está associado ao tipo de fluído (Barita) empregado na perfuração do poço de petróleo em solo. Segundo Biondi et al. (2011), o bário pode causar toxidez a diversos organismos vivos, quando disponível em elevados teores no solo.

4.2 Atributos físico-químicos do solo após irrigação com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento

A Tabela 8 apresenta os valores médios, coeficiente de variação (%), erro-padrão e probabilidade, obtidos com o Teste de Tukey, ainda, apresenta os contrastes de médias dos tratamentos aplicados de acordo com variáveis: potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CE_{es}), matéria orgânica (MO), potássio (K⁺), sódio (Na⁺); cálcio (Ca²⁺) e magnésio (Mg²⁺) aos 90 DAT.

De acordo com a Tabela 8, observou-se que estatisticamente não houve efeito significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey para os atributos estudados, exceto para o magnésio (Mg²⁺) e o potássio (K⁺) que apresentaram ambos, efeito significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Para os valores de pH, ocorreram variações entre 7,49 e 7,70 obtendo-se uma média entre os tratamentos de 7,60, coeficiente de variação de 4,35% e erro padrão de 0,104. Para os contrastes ortogonais não houve diferença estatística.

De maneira especial, a disponibilidade de nutrientes contidos no solo, ou a ele adicionado por meio das adubações, é bastante variável em função do pH do solo (Malavolta et al., 1997). De acordo com NSW (2004), a maioria das plantas se adaptam a solos com pH entre 6 e 7,5, porquanto os valores nessa faixa maximiza a disponibilidade de nutrientes, potencializando o desenvolvimento das culturas.

Estatisticamente não houve efeito significativo pelo teste de Tukey para a CE_{es}. Notou-se um incremento entre os tratamentos obtendo-se média de 0,50 dS m⁻¹. Ainda, não se verificou diferença estatística entre os contrastes ortogonais.

Tabela 8. Características químicas do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento

Tratamentos	Características físico-químicas do solo							
	pH	CE _{es} dS m ⁻¹	MO g kg ⁻¹	Pmg dm ⁻³	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺cmol _c dm ⁻³	Mg ²⁺
T1	7,49	0,47	14,13	15,76	108,61a	259,56	1,01	0,58a
T2	7,54	0,50	11,89	55,69	130,36a	307,44	1,08	0,74ab
T3	7,73	0,51	11,74	43,44	115,08ab	279,17	1,19	0,85ab
T4	7,70	0,45	6,85	46,83	135,03ab	332,95	1,25	0,95ab
T5	7,57	0,59	10,17	75,27	193,97b	310,83	1,12	1,05b
Média	7,60	0,50	10,96	47,40	136,61	297,99	1,13	0,838
CV 1 (%)	4,35	29,46	73,56	116,77	38,75	50,49	21,94	32,81
CV 2 (%)	5,54	19,12	81,05	78,96	51,04	42,35	25,0	34,47
Erro-padrão	0,104	0,047	2,549	17,503	13,946	47,57	0,078	0,087
Probabilidade	0,451 ^{NS}	0,338 ^{NS}	0,382 ^{NS}	0,243 ^{NS}	0,018 [*]	0,829 ^{NS}	0,257 ^{NS}	0,013 [*]
Probabilidade dos contrastes (decimal)								
Contraste C ₁ : T5 Vs (T1 + T2 + T3 + T4)	0,790 ^{NS}	0,056 ^{NS}	0,696 ^{NS}	0,089 ^{NS}	0,001 ^{**}	0,762 ^{NS}	0,181 ^{NS}	0,009 ^{**}
Contraste C ₂ : T4 Vs (T1 + T2 + T3)	0,303 ^{NS}	0,299 ^{NS}	0,065 ^{NS}	0,657 ^{NS}	0,403 ^{NS}	0,373 ^{NS}	0,347 ^{NS}	0,002 ^{**}
Contraste C ₃ : T3 Vs (T1 + T2)	0,117 ^{NS}	0,608 ^{NS}	0,689 ^{NS}	0,723 ^{NS}	0,832 ^{NS}	0,941 ^{NS}	0,155 ^{NS}	0,101 ^{NS}
Contraste C ₄ : T2 Vs T1	0,719 ^{NS}	0,147 ^{NS}	0,543 ^{NS}	0,126 ^{NS}	0,372 ^{NS}	0,486 ^{NS}	0,015 ^{NS}	0,203 ^{NS}

Nota: T1 – Somente água de abastecimento (AA), T2 – 75% de AA e 25% de água produzida tratada (AP), T3 - 50% de AA e 50% de AP, T4 – 25% de AA e 75% de AP, e T5 –somente AP; pH – Potencial hidrogeniônico; CE_{es} – Condutividade elétrica do extrato de saturação do solo; MO – Matéria orgânica; P – Fósforo; K⁺ – Potássio; Na⁺ – Sódio; Ca²⁺ – Cálcio; Mg²⁺ – Magnésio. 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 ^{*} Significativos a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

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

Fonte: Arquivo da pesquisadora (2018).

De acordo com NSW (2010), o excesso de sais pode restringir o crescimento das plantas, classificando a salinidade da água como muito baixa para valores menores que $0,65 \text{ dS m}^{-1}$. Os níveis de salinidade no solo precisam ser avaliados e controlados, visando à redução de impactos potenciais sobre sua estrutura e superfície.

Para os valores de MO obteve-se média, CV e erro padrão de $10,96 \text{ g kg}^{-1}$, $73,56\%$ e $2,549$, respectivamente. Estatisticamente não houve efeito significativo tendo o tratamento T1 apresentado maiores valores deste atributo. Esse fato ocorreu provavelmente ao menor aporte de matéria orgânica na água produzida.

O maior aporte de P ocorreu no tratamento T5, porém, não houve efeito significativo pelo teste de Tukey e comparação entre os contrastes ortogonais. Para CFSEMG (1999), na interpretação da disponibilidade de P, devem ser utilizadas medidas relacionadas com a capacidade tampão, como o teor de argila ou o valor de fósforo remanescente dos solos. O valor médio de argila no solo foi em torno de 13% classificando assim o teor de P como muito bom.

Para os teores de K^+ houve significância a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. O tratamento T5 apresentou $193,97 \text{ mg dm}^{-3}$ sendo a maior média entre os tratamentos. Ainda, houve efeito significativo no contraste C1 a um nível de 1% de probabilidade, indicando que o K^+ do tratamento que recebeu somente água produzida tratada, T5, difere estatisticamente dos demais tratamentos.

Houve um incremento nas concentrações de Na^+ tendo o tratamento T5 obtido os maiores valores na ordem de $297,99 \text{ mg dm}^{-3}$. Não houve diferença estatística entre os tratamentos e os contrastes ortogonais para este elemento.

Os teores de Ca^{2+} no solo apresentaram média de $1,13 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, com CV de $21,94\%$ e erro-padrão equivalente a $0,078$. Com relação aos contrastes, não houve significância estatística para nenhum contraste ortogonal.

Para o Mg^{2+} houve significância estatística ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey, com média de $0,838 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Analisando os contrastes, pode-se observar que houve significância ao nível de 1% de probabilidade para os contrastes ortogonais C1 e C2. Indicando que o teor de Mg^{2+} do tratamento T5 difere dos demais e que, também, o teor de Mg^{2+} do tratamento T4 difere de T1, T2 e T3.

De acordo com os resultados obtidos, evidenciou-se que deve haver um monitoramento com relação à aplicação de água produzida visto que, todos os atributos estudados, exceto a matéria orgânica, tendem a aumentar, especialmente o Na^+ .

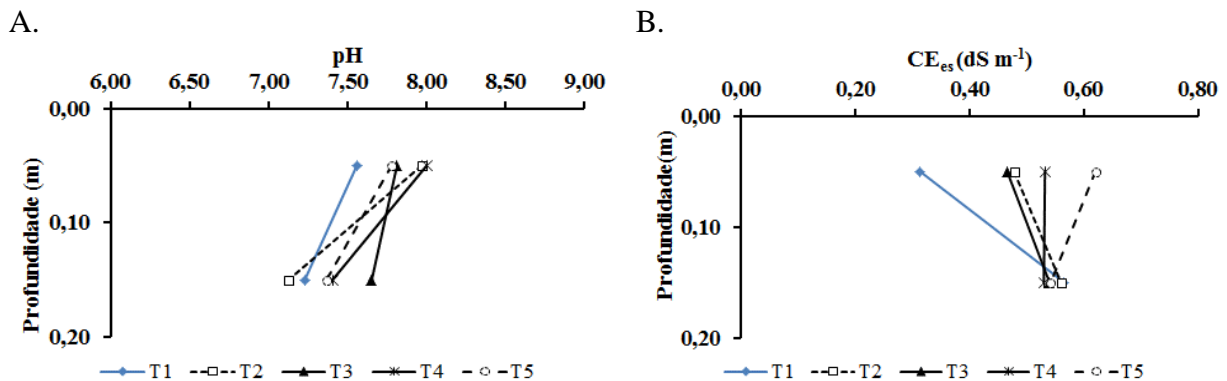
Os baixos valores de Ca^{2+} podem ser atribuídos à sua substituição pelo Na^+ , abundante na água utilizada. A predominância de cátions monovalentes, principalmente o Na^+ , promove

aumento na espessura da dupla camada iônica difusa, aumentando consideravelmente a expansão das partículas de argila (Fassbender et al., 1987), acarretando em dispersão das mesmas, formando camadas impermeáveis, dificultando o movimento de ar e de água no solo, acarretando assim, danos de ordem físicos e químicos do solo.

4.2.1 Potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento

A Figura 4 apresenta os valores de pH e CE_{es} ao final do experimento nas profundidades de 0-0,10 e 0,1-0,2 m. Os valores de pH do solo sob os tratamentos T1 a T5 encontram-se na faixa entre 7,5 e 8,0 sendo classificados agronomicamente pela CFSEMG (1999) como muito alto. O tratamento que recebeu somente água de abastecimento, T1, apresentou menor valor de pH na camada mais superficial tendo um ligeiro decréscimo ao longo do perfil. Os valores de pH dos tratamentos que receberam água produzida tratada apresentaram valores mais elevados, acima dos valores ideais para a maioria das culturas.

Figura 4. Valores de pH e CE_{es} (dS m⁻¹) do solo sob aplicação de água produzida tratada em função da profundidade de cada tratamento.



Fonte: Arquivo da pesquisadora (2018).

O pH do solo é um dos fatores que mais influencia a disponibilidade de nutrientes às plantas; valores ótimos de pH variam entre 6,0 e 6,5, nesta faixa ocorre a disponibilidade máxima de macronutrientes (Malavolta et al., 2007).

Crisostomo et al, (2016) observaram após o primeiro ciclo de cultivo de girassol irrigado com água produzida, aumento no pH do extrato saturado no solo, em relação ao tratamento

testemunha irrigado com água de poço, mantendo-se este atributo acima de 7,5 nas camadas analisadas.

Miranda et al. (2016) estudaram os efeitos da salinidade do solo e produtividade da mamoneira irrigada com água produzida e verificaram ao segundo ciclo de cultivo que, houve diferenças significativas no pH do solo entre os tratamentos. O solo irrigado com água produzida filtrada apresentou redução significativa do pH em todas as camadas em relação ao primeiro ciclo. Por outro lado, no solo irrigado com água produzida tratada por osmose reversa acarretou aumento do pH em todas as camadas, quando comparado ao primeiro ciclo.

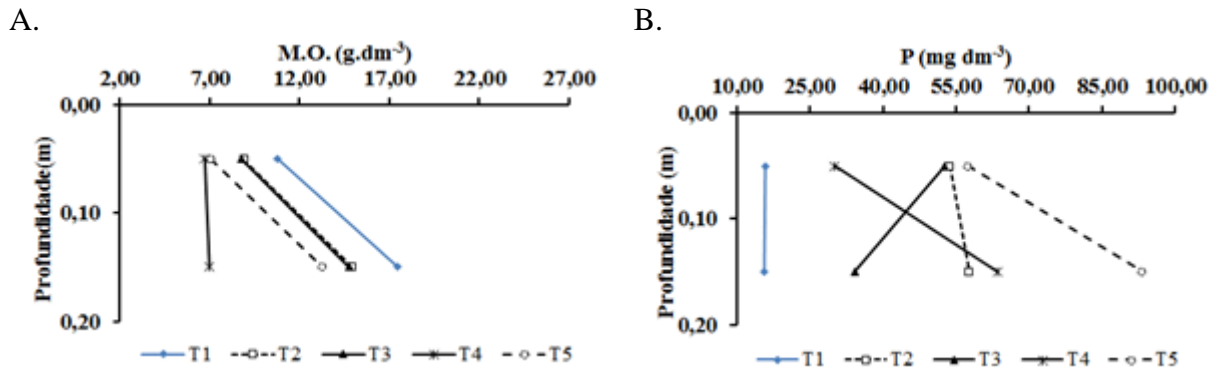
Com relação à CE_{es} do solo observou-se um acréscimo da camada mais superficial para a camada mais profunda no tratamento T1, para os demais tratamentos ocorreu um ligeiro decréscimo (Figura 4B). Na profundidade de 0,1 m, os tratamentos que receberam a água produzida tratada, apresentaram os maiores valores de CE_{es}. Esse aumento de salinidade mais evidente na camada superficial do solo pode ser devido a dois fatores: a) evaporação na superfície do solo, levando ao acúmulo de sais; e b) exposição do subsolo à contínua lixiviação e substituição dos sais na periferia da zona úmida, a qual normalmente tem apresentado aumento na concentração de sais (Ayers & Westcot, 1999)).

Este resultado corrobora com o de Miranda et al. (2016), que ao estudarem a irrigação com água produzida filtrada, constataram valores de CE_{es} mais elevados que os do tratamento testemunha, em todas as camadas de solo analisadas.

4.2.2 Matéria orgânica (MO) e fósforo (P) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento

Para a MO ocorreram comportamentos distintos dos teores, ao longo do perfil do solo, sob aos tratamentos T1 a T5 (Figura 5A). Constatou-se aumento nos valores da MO, ao longo do perfil do solo, em todos os tratamentos, com exceção de T4, que apresentou praticamente os mesmos valores. O tratamento que recebeu somente água de abastecimento apresentou maior teor de MO, devido provavelmente ao menor aporte de MO na água produzida tratada.

Figura 5. Valores de MO (g dm^{-3}) e P (mg dm^{-3}) do solo sob aplicação de água produzida tratada em função da profundidade de cada tratamento



Fonte: Arquivo da pesquisadora (2018).

Silva et al. (2001) destacaram que o aumento deste atributo pode ocorrer de forma mais pronunciada alguns anos após o início do manejo, além do que pode ser um efeito de curta duração, o que dependerá da quantidade e da qualidade dos resíduos adicionados ao solo.

Os teores de P nos tratamentos T1 a T5 apresentaram comportamentos distintos onde o tratamento T5 apresentou maiores teores do elemento nas duas profundidades. Apenas o tratamento T4 apresentou diminuição de P em profundidade.

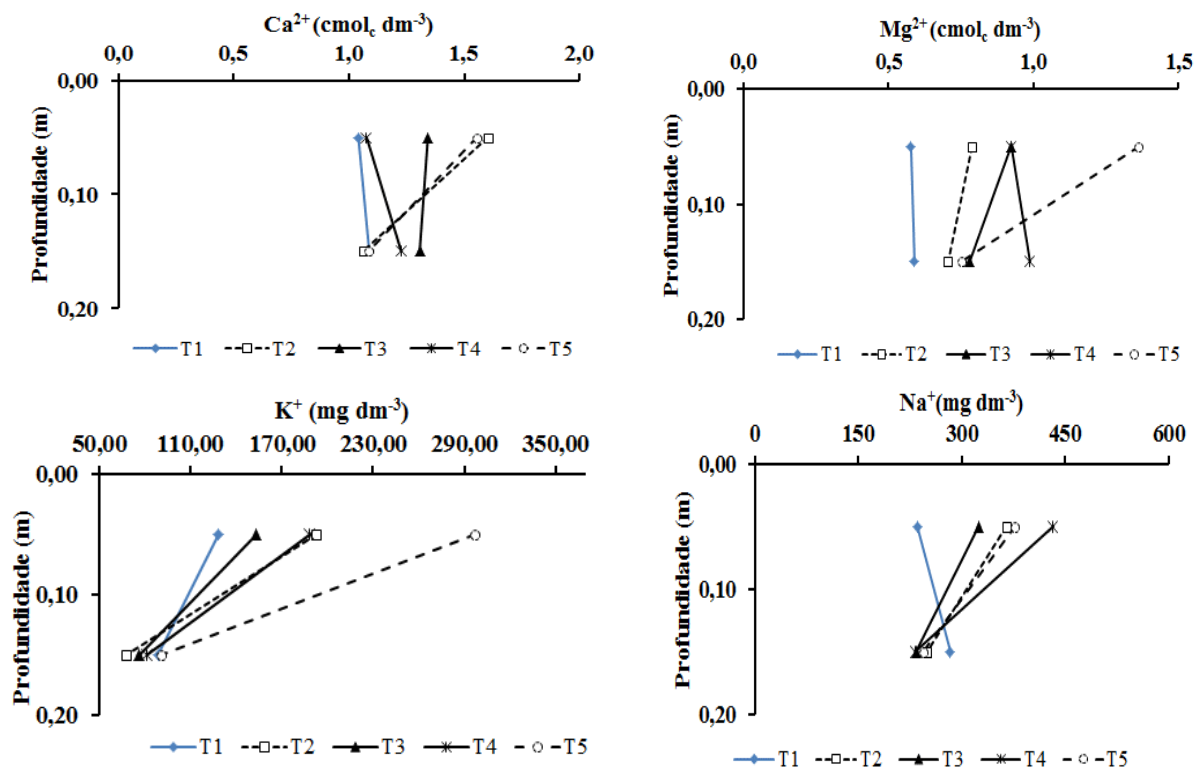
De acordo com a CFSEMG (1999), na profundidade de 0,10 m com 13% de argila, o P recebe a classificação agrônômica muito bom ($> 45 \text{ mg dm}^{-3}$) para dos tratamentos T2, T3 e T5, médio para o tratamento T4 (entre $20\text{-}30 \text{ mg dm}^{-3}$) e baixo para o tratamento T1 ($10,1\text{-}20 \text{ mg dm}^{-3}$).

A adsorção e a disponibilidade de P às plantas, além do teor de cátions, está correlacionada com a MO, pH e grau de intemperização dos solos (Trindade et al., 2010). Assim, a disponibilidade de P ocorreu provavelmente pelo aumento do pH do solo em função das doses de água produzida tratada aplicadas.

4.2.3 Cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e sódio (Na) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento

Os teores de Ca^{2+} permitem classificar agronomicamente o solo dos distintos tratamentos como baixo ($0,41$ a $1,20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) para os tratamentos T1, T4 e T3 e médio ($1,21$ a $2,40 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) para os tratamentos T2 e T5, conforme as recomendações da CFSEMG (1999). O tratamento que recebeu água de abastecimento obteve os menores valores de Ca^{2+} evidenciando um incremento pela água produzida tratada para este elemento.

Figura 6. Valores de Ca^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), Mg^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), K^+ (mg dm^{-3}) e Na^+ (mg dm^{-3}) do solo sob aplicação de água produzida tratada em função da profundidade de cada tratamento.



Fonte: Arquivo da pesquisadora (2018).

Segundo Medeiros (2005), o acréscimo ou decréscimo deste elemento está, diretamente, relacionado à concentração do efluente aplicado, à concentração absorvida pelas plantas e à lixiviação através do perfil do solo.

O tratamento que recebeu somente água produzida apresentou os maiores valores de Mg^{2+} em relação aos demais tratamentos. A menor concentração ocorreu no tratamento T1. Com relação à concentração, ao longo do perfil, não ocorreram importantes oscilações, exceto no tratamento T5 que apresentou redução considerável (Figura 6).

Verificou-se, ainda, que os teores de Mg^{2+} dos tratamentos permitiram classificar agronomicamente o solo como médio ($0,46$ a $0,90 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) para todos os tratamentos exceto para o tratamento T5 que apresentou de $1,36 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ sendo classificado como bom ($0,91$ a $1,50 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), conforme as recomendações da CFSEMG (1999).

As maiores concentrações de K^+ foram observadas na camada mais superficial em ambos os tratamentos. O tratamento T5 apresentou maiores concentrações deste elemento ao passo que o tratamento T1 apresentou a menor concentração.

Agronomicamente a concentração de K^+ no solo dos distintos tratamentos é considerado como bom (71 a 120 mg dm^{-3}) para os tratamentos T1, T2, T3 e T4 e muito bom (superior 120 mg dm^{-3}) para o tratamento T5, conforme as recomendações da CFSEMG (1999).

Segundo Feigin et al. (1991), mesmo que ocorra aumento na concentração de K^+ disponível no solo mediante a disposição de efluentes, a quantidade desse nutriente exigido pelas plantas é tão elevada que dificilmente apenas a irrigação com efluente poderia suprir adequadamente as necessidades das plantas.

Embora tenham apresentado aumento no teor de Ca^{2+} e Mg^{2+} a concentração destes elementos foram menores que a de K^+ , assim, não houve processo de troca no complexo sortivo do solo destes elementos, fazendo com que não houvesse lixiviação de K^+ .

Os maiores valores de Na^+ foram encontrados no tratamento T4 e o menor valor no tratamento que recebeu somente água de abastecimento, T1. A concentração deste atributo tendenciou a diminuir ao longo do perfil do solo, exceto o tratamento T1 que apresentou ligeiro acréscimo (Figura 6).

O acúmulo de Na^+ na camada mais superficial, observados nos tratamentos que receberam água produzida tratada, acarretou concentração de sais na zona do bulbo molhado, onde houve evaporação da água no solo, promovendo assim, o acúmulo desses, também, na zona radicular das plantas.

Miranda et al. (2016) observaram que após o primeiro e o segundo ciclos de cultivo da mamoneira, o teor trocável de Na^+ foi mais elevado no solo irrigado com água produzida filtrada, em relação ao solo do tratamento testemunha e do solo irrigado com água produzida tratada por osmose reversa.

Segundo Almeida (2010), a elevada concentração de Na^+ , em relação à concentração de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , pode acarretar trocas destes dois últimos cátions pelo íon Na^+ no solo, contribuindo para a degradação do mesmo. As águas geradas a partir da exploração do petróleo possuem elevada concentração de Na^+ e quando este elemento domina o complexo sortivo do solo em relação ao Ca^{2+} , o solo pode apresentar dispersão de colóides, que conduz a degradação de suas propriedades físicas (Freire et al., 2003).

4.3 Micronutrientes no solo após irrigação com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento

A Tabela 9 apresenta os valores médios, coeficiente de variação (%), erro-padrão e probabilidade, obtidos através do Teste de Tukey, ainda, apresenta os contrastes de médias dos tratamentos aplicados de acordo com variáveis: Cu (cobre), Mn (manganês), Fe (ferro), Zn (zinco), Ni (Níquel) e Pb (chumbo) aos 90 DAT.

Os teores de Cu foram 0,030, 0,032 e 0,031 mg dm⁻³, respectivamente, para os tratamentos T1, T4 e T5 enquanto para os tratamentos T2 e T3 foram de 0,039 e 0,040 mg dm⁻³ (Tabela 9), não apresentando diferença significativa a 5% de probabilidade, entre os tratamentos. Não houve significância para os contrastes ortogonais estudados.

Observou-se que os níveis de manganês apresentaram variações entre os tratamentos, sendo que o máximo obtido foi no tratamento T4, com 1,45 mg dm⁻³, e o mínimo no tratamento T2, com 1,00 mg.dm⁻³, porém, de acordo com a análise de variância, não houve diferença significativa entre os tratamentos. Para os contrastes ortogonais, houve efeito significativo a um nível de 5% de probabilidade apenas no contraste C4.

Considerando a análise de variância, não houve efeito significativo entre os tratamentos para o ferro. No entanto, considerando os valores absolutos, observa-se que os teores deste elemento foram maiores nos tratamentos T2 e T4 com teores de 3,48 e 3,84 mg dm⁻³, respectivamente. Embora o Fe tenha sido o metal que se apresentou em maiores concentrações não houve influência da aplicação de água produzida sobre os teores do elemento no solo. Notou-se que não houve significância entre os contrastes ortogonais.

Preston et al. (2014) estudaram os solos do Estado do Rio Grande do Norte e relataram que os teores de Fe é geralmente maiores que os observados em outros estudos, indicando que os materiais de origem dos solos em estudo, possuem um elevado teor desse elemento em seus minerais constituintes.

Estatisticamente, não houve efeito significativo dos tratamentos pelo teste de Tukey e nem ao compararem-se os contrastes ortogonais para o zinco embora verifique-se aumento de sua concentração nos tratamentos que receberam água produzida tratada em relação ao tratamento testemunha, T1.

Tabela 9. Características químicas do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento.

Tratamentos	Características químicas do solo (Micronutrientes)					
	Cu	Mn	Fe	Zn	Ni	Pb
T1	0,030	1,41	2,79	0,278	0,025	0,137
T2	0,039	1,00	3,48	0,308	0,026	0,111
T3	0,040	1,31	2,55	0,324	0,014	0,209
T4	0,032	1,45	3,84	0,358	0,028	0,181
T5	0,031	1,15	2,69	0,318	0,024	0,146
Média	0,034	1,26	3,07	0,317	0,023	0,156
CV 1(%)	47,45	34,67	65,05	24,36	38,49	71,47
CV 2 (%)	59,02	28,84	61,41	22,20	27,78	91,83
Erro-padrão	0,005	0,139	0,63	0,024	0,002	0,035
Probabilidade	0,502 ^{NS}	0,165 ^{NS}	0,550 ^{NS}	0,288 ^{NS}	0,04*	0,357 ^{NS}
Probabilidade dos contrastes (decimal)						
Contraste C ₁ : T5 Vs (T1 + T2 + T3 + T4)	0,546 ^{NS}	0,411 ^{NS}	0,486 ^{NS}	0,889 ^{NS}	0,839 ^{NS}	0,847 ^{NS}
Contraste C ₂ : T4 Vs (T1 + T2 + T3)	0,511 ^{NS}	0,189 ^{NS}	0,264 ^{NS}	0,062 ^{NS}	0,160 ^{NS}	0,397 ^{NS}
Contraste C ₃ : T3 Vs (T1 + T2)	0,344 ^{NS}	0,561 ^{NS}	0,459 ^{NS}	0,320 ^{NS}	0,007 ^{**}	0,067 ^{NS}
Contraste C ₄ : T2 Vs T1	0,238 ^{NS}	0,048*	0,449 ^{NS}	0,399 ^{NS}	0,773 ^{NS}	0,611 ^{NS}

Nota: T1 – Somente água de abastecimento (AA), T2 – 75% de AA e 25% de água produzida tratada (AP), T3 - 50% de AA e 50% de AP, T4 – 25% de AA e 75% de AP, e T5 –somente AP; Cu - Cobre; Mn - Manganês; Fe - Ferro; Zn - Zinco; Ni - Níquel; Pb - Chumbo; 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 * Significativos a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

^{NS} - não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Arquivo da pesquisadora (2018).

Para o elemento níquel, houve efeito significativo a um nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey. Além disso o contraste C3 foi significativo, indicando que o tratamento T3 difere de T1 e T2. Evidenciou-se no tratamento T1, maior concentração desse elemento, o que pode ser associado aos valores de pH do solo.

Em $\text{pH} < 6,5$, a maioria dos compostos de Ni são solúveis e em $\text{pH} > 6,7$, o metal existe predominantemente na forma insolúvel como hidróxido de níquel (Kabata et al., 2001).

Não houve efeito significativo para o Pb e nem ao comparar-se os contrastes ortogonais, apresentando maiores médias no tratamento T3, $0,209 \text{ mg dm}^{-3}$.

Ao entrar em contato com as plantas, o Pb pode alterar a germinação e processos vitais da planta, como a fotossíntese, a mitose, a absorção de água, os distúrbios nutricionais, a permeabilidade das membranas celulares, além da inibição da respiração (Paiva, 2000; Soares et al., 2001).

Embora não tenha sido quantificado no solo, é importante ressaltar a presença de Ba nas diluições da água produzida tratada. Uma série de estudos apontam a ausência de efeitos tóxicos em plantas cultivadas em solos contaminados ou adubadas com resíduos ricos em Ba (Coscione et al., 2009; Merlino et al., 2010; Nogueira et al., 2010; Abreu et al., 2012). No entanto, outros pesquisadores afirmaram que este elemento interfere negativamente no crescimento de plantas, na produção de matéria seca e na absorção de nutrientes como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ (Llugany et al., 2000; Suwa et al., 2008; Monteiro et al., 2011; Melo et al., 2011).

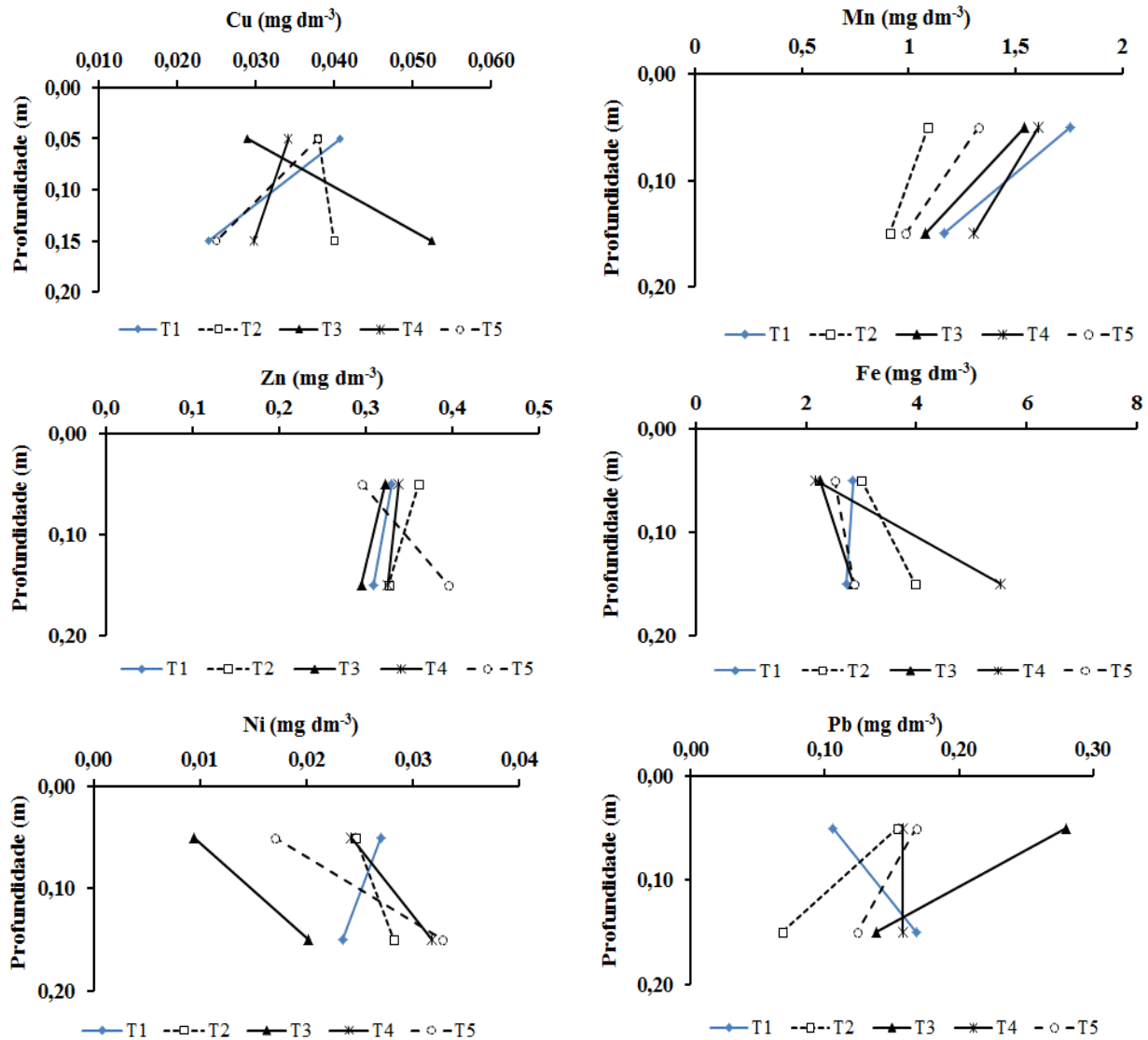
4.3.1 Cobre (Cu), manganês (Mn), ferro (Fe), zinco (Zn), níquel (Ni), chumbo e (Pb) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento

Os teores de Cu nas profundidades de 0,10, 0,30 e 0,50 m encontram-se na faixa de 0,3 a $0,4 \text{ mg dm}^{-3}$, indicando variações quando os tratamentos T1 a T5 são comparados (Figura 7). A CFSEMG (1999) classifica agronomicamente o teor de Cu como baixo ($0,3 \text{ mg dm}^{-3}$) no solo dos tratamentos. Averiguou-se maior concentração deste elemento na camada mais superficial de ambos os tratamentos, tendo o T1 apresentado maiores valores. Este fato está relacionado ao pH do extrato de saturação do solo, que quando apresentam valores elevados indisponibilizam este nutriente no complexo sortivo do solo.

Crisóstomo et al. (2018) estudaram os efeitos da água produzida em abacaxi e observaram que os valores de Cu foram ínfimos e sem ligação com os tratamentos, deixando de ser quantificado no estudo. Este fato foi atribuído à baixa capacidade de extração da solução

Mehlich, corroborando, desse modo, os achados de Abreu et al. (1997) e de Pereira et al. (2001).

Figura 7. Valores de Cu (mg dm^{-3}), Mn (mg dm^{-3}), Zn (mg dm^{-3}), Fe (mg dm^{-3}), Ni (mg dm^{-3}), Pb (mg dm^{-3}) do solo sob aplicação de água produzida tratada em função da profundidade de cada tratamento



Fonte: Arquivo da pesquisadora (2018).

Os teores de Mn decrescem com a profundidade, sendo os maiores valores encontrados na profundidade de 0,10 m, devido à baixa mobilidade deste elemento no solo. Observou-se a maior concentração no tratamento T1. A disponibilidade do Mn no solo depende, sobretudo do pH, do potencial de oxi-redução, do teor de MO e do equilíbrio com outros cátions como o Fe, Ca^{2+} e Mg^{2+} . Segundo Borkert et al. (2001), fatores ambientais (umidade e temperatura), também exercem grande influência na solubilidade do Mn. De acordo com a CFSEMG

(1999), os teores de Mn são classificados agronomicamente como baixos, pois são inferiores a $2,0 \text{ mg dm}^{-3}$.

Houveram pequenas variações nos teores de Zn, ao longo da profundidade do solo, exceto tratamento T5 que apresentou menor valor na camada superficial e maior valor na camada mais profunda. Segundo CFSEMG (1999), os teores de Zn são classificados agronomicamente como muito baixos (inferior a $0,4 \text{ mg dm}^{-3}$).

Segundo Novais et al. (2007), aos valores de pH superiores a 7,0, possibilita mínima disponibilidade de Zn na solução do solo e, conseqüentemente, para as plantas.

As concentrações de Fe aumentaram com a profundidade do solo, apresentando valores máximos na profundidade de 0,20 m, devido principalmente ao tipo de solo que apresenta alta concentração do elemento. A aplicação da água produzida tratada não incrementou os teores de Fe nas profundidades do solo. Os teores de Fe são classificados agronomicamente como muito baixo (inferior a $8,0 \text{ mg dm}^{-3}$), conforme apresentado na CFSEMG (1999).

Em estudo realizado por Crisóstomo et al. (2018), antes e após o período de irrigação com água produzida, constataram-se aumentos nos conteúdos de Fe, Mn e Zn em todas as camadas de solo analisadas, isso devido à irrigação e à adubação.

O tratamento T1 apresentou maior concentração de Ni na camada superficial de acordo com a Figura 7. Apesar de não apresentar maiores concentrações deste elemento na camada superficial, os tratamentos que receberam água produzida tratada apresentaram maiores valores na camada de 0,20 m, assim, é necessário o monitoramento deste, visto que, pode ocasionar poluição de águas subterrâneas.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 420/2009 (Brasil, 2009), verificou-se que os valores de Ni foram inferiores ao limite de 30 mg dm^{-3} estabelecidos para prevenção de toxicidade.

Já em relação à concentração de Pb, observou-se maiores concentrações nos tratamentos que receberam água produzida tratada e que este tende a diminuir, ao longo do perfil do solo. Já o tratamento T1 apresentou comportamento contrário tendo maior concentração na camada mais profunda.

Pela Resolução do CONAMA nº 420/2009 (Brasil, 2009), as concentrações de Pb encontradas não são considerados impróprias para agricultura, pois são bastante inferiores ao limite de 72 mg dm^{-3} estabelecido para prevenção de toxicidade.

A disponibilidade dos micronutrientes do solo diminuíram com a aplicação das diluições da água produzida tratada, isso pode estar relacionado a um aumento de pH onde, a maioria dos micronutrientes pode tornar-se indisponível a medida que há um aumento deste atributo no solo.

4.4 Características agronômicas do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento

Na Tabela 10 estão apresentados os valores médios, coeficiente de variação (%), erro-padrão e probabilidade, obtidos através do Teste de Tukey, ainda, apresenta os contrastes de médias dos tratamentos aplicados de acordo com as seguintes variáveis agronômicas do girassol: produtividade (PROD), altura de plantas (ALT), número de folhas (NF), diâmetro de caule (DC) e diâmetro do capítulo (DCA) aos 90 DAT.

Tabela 10. Características agronômicas do girassol irrigado com diluições de água produzida em água de abastecimento.

Tratamentos	Características agronômicas				
	PROD (kg ha ⁻¹)	ALT (cm)	NF (uni)	DC (cm)	DCA (cm)
T1	348,73	54,30	14,60	0,54	3,98 ^a
T2	527,60	63,70	15,40	0,68	6,64 ^b
T3	429,85	61,60	14,00	0,66	5,68 ^{ab}
T4	392,67	65,10	14,20	0,58	5,24 ^{ab}
T5	565,35	67,00	14,40	0,64	5,38 ^{ab}
Média	452,84	62,34	14,68	0,62	5,38
CV (%)	56,39	16,64	8,02	18,74	20,86
Erro-padrão	114,203	4,63	0,526	0,051	0,502
Probabilidade	0,643 ^{NS}	0,381 ^{NS}	0,563 ^{NS}	0,326 ^{NS}	0,027 [*]
Probabilidade dos contrastes (decimal)					
Contraste C ₁ : T5 Vs (T1 + T2 + T3 + T4)	0,291 ^{NS}	0,2615 ^{NS}	0,5378 ^{NS}	0,6417 ^{NS}	0,9774 ^{NS}
Contraste C ₂ : T4 Vs (T1 + T2 + T3)	0,747 ^{NS}	0,3260 ^{NS}	0,2367 ^{NS}	0,4906 ^{NS}	0,7837 ^{NS}
Contraste C ₃ : T3 Vs (T1 + T2)	0,953 ^{NS}	0,6534 ^{NS}	0,7604 ^{NS}	0,4435 ^{NS}	0,5559 ^{NS}
Contraste C ₄ : T2 Vs T1	0,284 ^{NS}	0,1712 ^{NS}	0,2984 ^{NS}	0,0749 ^{NS}	0,001 ^{**}

Nota: T1 – Somente água de abastecimento (AA), T2 – 75% de AA e 25% de água produzida tratada (AP), T3 - 50% de AA e 50% de AP, T4 – 25% de AA e 75% de AP, e T5 –somente AP; 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 ^{*} Significativos a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

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

Fonte: Arquivo da pesquisadora (2018).

De acordo com a análise de variância, os efeitos significativos dos fatores individuais indicam que as diluições de água produzida tratada ao final do experimento (90 DAT) influenciaram apenas a variável diâmetro do capítulo (DCA) (p <0,05), embora todos os tratamentos tenham incremento maior que a testemunha (Tabela 10). Os valores médios de

DC foram maiores nos tratamentos que receberam água produzida tratada, sendo os menores valores encontrados no tratamento com água de abastecimento. Observou-se, que o tratamento T2 possibilitou o máximo valor de DCA (6,64 cm), 90 DAT, enquanto no tratamento que recebeu água de abastecimento o valor do diâmetro de capítulo foi de 3,98 cm. Em relação a DCA somente o contraste C4 foi significativo, indicando que a aplicação de água produzida tratada interferiu positivamente nesta variável.

Evidenciou-se, pelo teste de comparação de médias, que não houve diferença estatística entre os tratamentos com relação à produtividade (PROD). O tratamento T5 (100% de AP) obteve a maior PROD com valor médio de 565,35 kg ha⁻¹. Este resultado é bem inferior à produtividade média nacional de girassol da safra 2016/17 que é da ordem de 1419 kg ha⁻¹ (CONAB, 2017).

Segundo Gulzar et al. (2003), os estresses provocados pelo excesso de íons, em geral, diminuem a assimilação de CO₂, condutância estomática, transpiração e fotossíntese das plantas e, por conseguinte, acabam prejudicando a produção e a produtividade das culturas.

A característica altura de plantas (ALT) apresentou média superior no tratamento T5 ao passo que a menor média foi obtida no tratamento T1, porém, ao analisar a probabilidade dos contrastes ortogonais verificou-se que não houve diferença estatística entre os tratamentos.

Não houve efeito significativo da característica número de folhas (NF) pelo teste F a 5% de probabilidade e nem diferença entre os contrastes ortogonais. Os tratamentos apresentaram médias semelhantes, porém o tratamento que recebeu somente água de abastecimento teve a maior média.

Silva et al. (2013) relataram que a medida em que se aumentou a dose de Pb em solução, houve um decréscimo na quantidade de folhas emitidas em cada planta de girassol.

Com relação ao diâmetro do caule (DC), não houve diferença estatística entre os tratamentos, observando-se maior média para o tratamento T2 (0,68 cm) e o tratamento T1 menor média (0,54 cm). Segundo Curti (2010), é desejável que o DC seja resistente para possibilitar a sustentação da inflorescência do girassol, que geralmente tem maior massa se considerar outras espécies de flor de corte, como a rosa, a gérbera, entre outras.

De acordo com Silva et al. (2013) na ausência de Pb as plantas apresentaram um DC médio estimado de 3,9 cm. A cada 1 mg L⁻¹ de Pb aplicado houve uma redução no DC de aproximadamente 0,06 mm.

Estes resultados indicaram que não houve problemas de desenvolvimento das plantas, devido às diluições de água produzida usados na irrigação do girassol. O tratamento T5 (100% água produzida tratada) acarretou valores de ALT, superior aos dos demais tratamentos. Enquanto, os maiores valores de NF, DC e DCA ocorreram no tratamento T2

(75% de água de abastecimento e 25% de água produzida tratada). Em relação à PROD não houve diferença estatística entre os tratamentos, entretanto o tratamento T5 proporcionou a maior produtividade. Enfim, a aplicação da água produzida tratada diluída ou não, não comprometeu nem o desenvolvimento e nem a produtividade do girassol, em relação aos tratamentos testemunha com água de abastecimento.

4.5 Composição mineral do tecido foliar de girassol irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento

A Tabela 11 apresenta os valores médios da composição mineral das folhas de girassol aos 90 DAT. Evidenciou-se que não houve efeito significativo pelo teste de Tukey para nenhum dos elementos analisados.

Para as médias de cálcio (Ca), houve maior acúmulo no tratamento T5 e menor acúmulo no tratamento que recebeu somente água de abastecimento. Apesar de não haver diferença estatística pelo teste de Tukey entre os tratamentos, houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade para o contrastaste ortogonal C1 indicando assim, diferença entre o tratamento que recebeu somente água produzida tratada e os demais tratamentos.

Tabela 11. Características químicas das folhas de girassol irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento.

Tratamentos	Características químicas das folhas de girassol								
	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Zn	Ni	Cd	Pb
g kg ⁻¹mg kg ⁻¹					
T1	13,27	1,01	11,23	20,70	4,30	27,0	10,30	8,42	108,25
T2	14,57	1,98	23,00	86,62	11,4	31,44	5,90	7,10	84,0
T3	18,80	1,88	29,30	220,12	9,15	37,16	8,27	6,87	96,5
T4	17,97	1,86	55,16	171,42	8,05	41,46	9,02	7,50	80,5
T5	24,36	3,31	38,03	306,52	13,7	43,75	16,10	8,55	107,2
Média	17,80	2,01	31,34	161,08	9,32	36,16	9,92	7,69	95,3
CV (%)	38,34	110,78	111,48	121,80	112,54	30,77	55,17	31,91	30,77
Erro-padrão	3,051	0,996	15,627	87,743	4,694	13,113	2,448	1,097	13,113
Probabilidade	0,141 ^{NS}	0,612 ^{NS}	0,383 ^{NS}	0,216 ^{NS}	0,685 ^{NS}	0,457 ^{NS}	0,09 ^{NS}	0,748 ^{NS}	0,457 ^{NS}
Probabilidade dos contrastes (decimal)									
Contraste C ₁ : T5 Vs (T1 + T2 + T3 + T4)	0,023 [*]	0,158 ^{NS}	0,593 ^{NS}	0,06 ^{NS}	0,304 ^{NS}	0,300 ^{NS}	0,012 [*]	0,420 ^{NS}	0,329 ^{NS}
Contraste C ₂ : T4 Vs (T1 + T2 + T3)	0,435 ^{NS}	0,818 ^{NS}	0,071 ^{NS}	0,464 ^{NS}	0,982 ^{NS}	0,309 ^{NS}	0,760 ^{NS}	0,974 ^{NS}	0,316 ^{NS}
Contraste C ₃ : T3 Vs (T1 + T2)	0,210 ^{NS}	0,755 ^{NS}	0,533 ^{NS}	0,140 ^{NS}	0,824 ^{NS}	0,453 ^{NS}	0,953 ^{NS}	0,518 ^{NS}	0,981 ^{NS}
Contraste C ₄ : T2 Vs T1	0,767 ^{NS}	0,501 ^{NS}	0,601 ^{NS}	0,602 ^{NS}	0,300 ^{NS}	0,714 ^{NS}	0,221 ^{NS}	0,406 ^{NS}	0,209 ^{NS}

Nota: T1 – Somente água de abastecimento (AA), T2 – 75% de AA e 25% de água produzida tratada (AP), T3 - 50% de AA e 50% de AP, T4 – 25% de AA e 75% de AP, e T5 –somente AP; 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 ^{*} Significativos a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

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

Fonte: Arquivo da pesquisadora (2018).

O Ca é essencial para o desenvolvimento das raízes, resistência da cultura a pragas e no auxílio à fixação simbiótica de nitrogênio. O teor adequado deste macronutriente para o desenvolvimento da cultura do girassol é entre 17 e 22 g kg⁻¹ (Malavolta et al., 1997). De acordo com a CFSEMG (1999), a faixa de suficiência de Ca para girassol encontra-se na faixa de 17 a 20 g kg⁻¹, portanto, verifica-se que os tratamentos T3, T4 e T5, que receberam maiores diluições de AP, encontram-se dentro da faixa estabelecida considerando a planta bem nutrida em relação a este nutriente ao passo que, os tratamentos T1 e T2 apresentaram resultados abaixo da faixa sendo considerado insuficiente para este nutriente.

Da mesma forma, o tratamento T5 obteve as maiores médias para o teor de Mg. Não houve efeito significativo entre os tratamentos e os contrastes ortogonais estudados. Os valores de referência para o Mg encontra-se na faixa de 9 a 11 g kg⁻¹ de acordo com a CFSEMG (1999), observa-se assim, que para todos os tratamentos avaliados o teor de Mg está abaixo do valor recomendado para o girassol.

Não houve diferença estatística pelo teste de Tukey e nem para os contrastes ortogonais em relação aos teores de Na. Mesmo assim, verificou-se incremento deste elemento quando os tratamentos são comparados. A testemunha apresentou média de 11,23 g kg⁻¹ e o tratamento T4 apresentou maior concentração de 55,16 g kg⁻¹.

As maiores concentrações de Na encontrados nas folhas de girassol dos tratamentos que receberam água produzida tratada, pode estar associado à alta incidência desse íon na água que, associado a um possível maior fluxo hídrico (solo-planta-atmosfera) proporcionado pela maior disponibilidade hídrica no solo, pode ter auxiliado no transporte desse componente às folhas (Blumwald et al., 2000).

Crisóstomo et al. (2018), observaram que o Na teve incremento de 64% nas raízes de abacaxizeiro irrigado com água produzida tratada. Resultados semelhantes foram obtidos por Sousa et al. (2016) trabalhando com a cultura do girassol por três ciclos sucessivos.

Não houve diferença estatística entre os tratamentos com relação ao teor de Fe pelo teste de Tukey e nem efeito significativo para os contrastes ortogonais. Porém, analisando as médias dos tratamentos, averiguou-se aumento do teor deste elemento com a presença da água produzida tratada. Os valores de referência para o teor de Fe na cultura do girassol segundo a CFSEMG (1999), encontra-se na faixa de 150-200 mg kg⁻¹. Os tratamentos T1 e T2, que não recebeu em sua composição AP e a menor diluição de AP em AA, respectivamente, apresentaram valores inferiores ao recomendado, ao passo que, os tratamentos que receberam maiores diluições de AP em AA (T3, T4 e T5), apresentaram teores de Fe acima dos valores recomendados.

Não houve significância estatística para o Mn, apresentando valor médio de 9,32 mg kg⁻¹. O CV para a referida característica foi de 112,54 % e o erro padrão de 4,694. Do mesmo modo, não houve significância para os contrastes ortogonais testados a 5% de probabilidade. De acordo com a CFSEMG (1999), os valores de referência para o teor de Mn nos tecidos de girassol se encontra na faixa de 300-600 mg kg⁻¹, assim, os resultados obtidos estão bem abaixo dos valores recomendados.

Não houve significância para o teor de Zn, com valor médio de 36,16 mg kg⁻¹, tendo os tratamentos T4 e T5 apresentado as maiores médias (41,43 e 46,75 mg kg⁻¹, respectivamente). Embora os tratamentos que receberam maiores diluições de AP tenham apresentado maiores médias em comparação aos demais tratamentos, de acordo com de acordo com a CFSEMG (1999) os resultados encontram-se abaixo da recomendação estabelecida para a cultura do girassol (70-140 mg kg⁻¹).

De acordo com Galvão (2004), os teores de Zn no solo para o cultivo do girassol deve-se aplicar 6 kg ha⁻¹ para correção da deficiência do elemento no solo.

Weber et al. (2017) relataram que independentemente dos tipos de tratamentos aplicados a água produzida, houve diminuição do teor de Zn na parte aérea acumulado nas plantas durante três ciclos de produção, e atribui este fato ao aumento da competição por nutrientes entre girassóis ornamentais plantados em espaçamento menor (três plantas por metro linear), comparado a uma planta em metro linear usada anteriormente.

Os teores de Ni na folha de girassol foram influenciados pela aplicação de água produzida tratada não apresentando diferença estatística entre os tratamentos (Tabela 11). Ao verificar-se a comparação entre os contrastes ortogonais as médias apresentam diferença estatística a 5% de probabilidade para o contrastes C1, ou seja, houve incremento deste elemento ao aplicar-se somente água produzida tratada.

O teor normal de Ni na matéria seca de plantas varia de 0,1 a 5 mg kg⁻¹, dependendo da espécie, parte da planta, estágio de maturidade na época de amostragem, teor no solo, acidez do solo entre outros fatores. Em geral, a toxidez de Ni se expressa quando a sua concentração na matéria seca das plantas acumuladoras e hiperacumuladoras (González et al., 2008). Uma vez que o Ni é absorvido na forma Ni⁺² sua absorção, em altas concentrações, diminuiu significativamente a absorção de outros cátions tais como Mg, Fe, Mn, Cu, e Zn (Paiva et al., 2003; Syam et al., 2016).

A literatura apresenta trabalhos em que o Ni exerce influência de uma forma negativa na absorção de alguns macronutrientes como, por exemplo, o Mg (Malavolta, 1992).

Apesar de não detectado no solo pelo método analítico, o metal pesado Cd foi detectado nas folhas de girassol, mas, o teor desse elemento, assim como dos demais metais pesados, não variou em razão da adubação química ou da aplicação de água produzida produzida.

A concentração de Pb nas folhas de girassol não foi influenciada pela aplicação da água produzida tratada, não apresentando diferença estatística entre as médias, nem com relação a comparação entre os contrastes ortogonais; assim, plantas cultivadas em parcelas que receberam a maior dose de água produzida tratada apresentaram concentração de Pb na folha semelhante àquelas irrigadas somente com água produzida tratada.

Sousa et al. (2016) observaram que a composição química do girassol é alterada pela irrigação com água produzida, mas o efeito sobre a concentração de nutrientes na cultura depende do tratamento da água. O uso de água produzida tratada por osmose reversa favorece a cultura melhorando o estado nutricional das plantas (Ca, N, P e Mg); enquanto o uso de água produzida filtrada reduz o acúmulo destes nutrientes nas plantas. Além disso, a água produzida filtrada induz o acúmulo de Na nas plantas de girassol.

Evidenciou-se que a aplicação de água produzida tratada promoveu aumento dos teores de Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Zn, Ni e Cd no tecido vegetal do girassol ao passo que houve um maior acúmulo de Pb no tratamento T1 (100% de água de abastecimento). O trabalho de Preston et al. (2014), comprova que os solos do Estado do Rio Grande Norte apresentam naturalmente a presença de metais pesados, incluindo o Pb. Como em Mossoró a maior parte da água de poço é oriunda de poço, as águas subterrâneas também podem apresentar teores de Pb, oriundos das rochas e solos.

4.6 Capacidade fitoextratora do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento

4.6.1 Fator de translocação do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento

Na Tabela 12, encontra-se os valores do fator de translocação do girassol aos 90 DAT. Essa tabela apresenta os valores médios dos elementos Mn, Fe, Zn, Cr, Ni, Pb e Na, bem como CV (%), erro padrão, probabilidade pelo teste F e comparação dos tratamentos pelos contrastes ortogonais.

Tabela 12. Fator de translocação (FT) do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento

Tratamentos	Fator de translocação						
	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Pb	Na
T1	0,218	0,026a	0,212	0,904	0,334	0,590	1,178
T2	0,288	0,167ab	0,311	3,668	0,286	0,486	2,356
T3	0,152	0,536b	0,465	1,064	0,240	0,491	10,714
T4	0,202	0,222ab	0,382	0,642	0,248	0,395	3,478
T5	0,392	0,290ab	0,458	1,030	0,440	0,505	7,762
Média	0,394	0,248	0,366	1,462	0,309	0,494	5,097
CV (%)	229,69	78,89	62,14	170,48	68,45	37,60	163,06
Erro-padrão	0,405	0,087	0,101	1,114	0,094	0,083	3,717
Probabilidade	0,562 ^{NS}	0,011 [*]	0,392 ^{NS}	0,330 ^{NS}	0,574 ^{NS}	0,604 ^{NS}	0,364 ^{N_s}
Probabilidade dos contrastes (decimal)							
Contraste C ₁ : T5 Vs (T1 + T2 + T3 + T4)	0,619 ^{NS}	0,428 ^{NS}	0,274 ^{NS}	0,619 ^{NS}	0,156 ^{NS}	0,913 ^{NS}	0,365 ^{N_s}
Contraste C ₂ : T4 Vs (T1 + T2 + T3)	0,315 ^{NS}	0,881 ^{NS}	0,560 ^{NS}	0,315 ^{NS}	0,690 ^{NS}	0,192 ^{NS}	0,904 ^{N_s}
Contraste C ₃ : T3 Vs (T1 + T2)	0,383 ^{NS}	0,009 [*]	0,121 ^{NS}	0,383 ^{NS}	0,554 ^{NS}	0,646 ^{NS}	0,067 ^{N_s}
Contraste C ₄ : T2 Vs T1	0,098 ^{NS}	0,270 ^{NS}	0,500 ^{NS}	0,098 ^{NS}	0,724 ^{NS}	0,387 ^{NS}	0,825 ^{N_s}

Nota: T1 – Somente água de abastecimento (AA), T2 – 75% de AA e 25% de água produzida tratada (AP), T3 – 50% de AA e 50% de AP, T4 – 25% de AA e 75% de AP, e T5 – somente AP; 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 * Significativos a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

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

Fonte: Arquivo da pesquisadora (2018).

O teor de Mn apresentou menor média no tratamento T3 e maior média no tratamento T5. Não houve efeito significativo pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para o FT deste elemento. Ainda, notou-se que não houve diferença estatística ao estudar os contrastes ortogonais. Assim, verificou-se que o FT para todos os tratamentos apresentaram médias inferiores a 1 (Ma et al., 2001; Fayiga, et al., 2006) evidenciando que não ocorreu a translocação das raízes até as folhas.

Para o elemento Fe, houve diferença estatística a um nível de 1% de probabilidade pelo teste F, embora apenas o contraste C3 tenha sido significativo, indicando que FT do Fe em T3 difere de T1 e T2. Porém observou-se que não ocorreu a translocação deste elemento das raízes até as folhas pois, suas médias apresentam-se menor que 1.

Para o elemento Cr não houve efeito significativo pelo teste de Tukey entre os tratamentos. Para este elemento averiguou-se um CV (%) de 170,48 e que não diferença estatística entre os contrastes ortogonais. Verificou-se que os tratamentos T2, T3 e T5 apresentaram médias de FT maiores que 1, indicando assim a característica fitoextratora dessa espécie ao metal pesado.

Não houve efeito significativo a um nível de 5% de probabilidade com relação ao Ni assim como para os contrastes ortogonais. O elemento apresentou maior média para tratamento T5. As médias dos tratamentos apresentaram FT inferior a 1, evidenciando maior acúmulo do elemento nas raízes.

Para o teor de Pb o tratamento T1 apresentou maior média de FT embora não haja diferença estatística entre os tratamentos e os contrastes ortogonais. Esse elemento apresentou ainda CV(%) de 37,60, erro padrão de 0,083 e probabilidade pelo teste F de 0,604. As médias foram menores que 1 sendo assim, o girassol acumulou mais Pb nas raízes que nas folhas.

Verifica-se que com relação ao Na, as médias do fator de translocação foram maior que 1, indicando a eficiência do girassol em transportar o elemento das raízes até a parte aérea da planta. Não houve efeito significativo entre os tratamentos e nem para os contrastes ortogonais.

O Na pode substituir parcialmente o K atuando na ativação enzimática da ATPase, na osmorregulação, na absorção de macronutrientes, na permeabilidade das células, na síntese de carboidratos, na conversão da frutose em glicose, na abertura e fechamento estomático, no vigor de plantas e no transporte de gás carbônico (CO₂) para as células das plantas C4 (Korndorfer, 2006).

Os fatores de translocação solo-planta relacionam a quantidade total ou parcial de um elemento químico presente na espécie vegetal analisada ou parte dela com seu respectivo conteúdo total no solo (Orihuela et al., 2008).

Segundo Orihuela et al., (2008), a anterior definição assume que a relação entre ambas variáveis é linear e constante. Porém, esta relação não tem porque ser linear, podendo ser pontual no tempo e espaço. Por outro lado, segundo Kachenko et al. (2006), um fator de transferência elevado expõe retenção dos contaminantes no solo e a capacidade de absorção dos metais pela espécie vegetal analisada.

O girassol (*Helianthus annuus* L.) é uma das plantas capazes em absorver seletivamente metais pesados (Tan, 2000), por isso, vem sendo utilizado por pesquisadores em trabalhos de fitorremediação em solos.

Na prática de fitoextração, a alta translocação do contaminante para a parte aérea da planta é preferível devido às facilidades de manejo após o processo de remediação. No entanto, existe grande vantagem quando o contaminante fica retido em maior concentração no sistema radicular da planta, reduzindo a possibilidade de contaminação, ao longo da cadeia trófica (Nascimento et al., 2006).

4.6.2 Fator de bioacumulação do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada em água de abastecimento

Na Tabela 13 estão apresentados os valores do fator de bioacumulação do girassol aos 90 DAT. Essa tabela apresenta os valores médios dos elementos Mn, Fe, Zn, Cr, Ni, Pb e Na, bem como CV (%), erro padrão, probabilidade pelo teste F e comparação dos tratamentos pelos contrastes ortogonais.

O Fator de Bioacumulação (FB) evidencia a capacidade das plantas em absorver o metal disponível no solo. Branzini et al. (2012) enfatiza que o FB é um índice chave para avaliar a eficiência de acumulação de metais em plantas e que a absorção e acumulação de metais pesados nas plantas dependem de vários fatores, dentre eles, a disponibilidade de metais no solo e necessidade fisiológica das plantas pelos metais.

Tabela 13. Fator de bioacumulação (FB) do girassol irrigado com diluição de água produzida tratada em água de abastecimento

Tratamentos	Fator de bioacumulação						
	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Pb	Na
T1	12,062	0,218	448,47	249,39	1666,51ab	2240,52	0,152
T2	54,578	0,908	418,31	689,62	1467,22a	1353,74	0,094
T3	53,352	0,152	517,05	213,25	7079,78b	904,16	0,124
T4	31,592	0,202	454,59	200,63	2183,97ab	1514,58	0,102
T5	36,974	0,392	650,63	315,22	4295,40ab	2548,54	0,108
Média	37,711	0,394	497,81	333,62	3338,58	1712,30	0,130
CV (%)	53,18	229,69	56,70	130,98	84,83	68,48	88,79
Erro-padrão	0,405	0,405	126,22	195,43	1266,54	524,39	0,051
Probabilidade	0,562 ^{NS}	0,562 ^{NS}	0,709 ^{NS}	0,395 ^{NS}	0,030 ^{**}	0,214 ^{NS}	0,753 ^{NS}
Probabilidade dos contrastes (decimal)							
Contraste C ₁ : T5 Vs (T1 + T2 + T3 + T4)	0,994 ^{NS}	0,489 ^{NS}	0,184 ^{NS}	0,852 ^{NS}	0,296 ^{NS}	0,111 ^{NS}	0,302 ^{NS}
Contraste C ₂ : T4 Vs (T1 + T2 + T3)	0,525 ^{NS}	0,330 ^{NS}	0,998 ^{NS}	0,379 ^{NS}	0,611 ^{NS}	0,923 ^{NS}	0,727 ^{NS}
Contraste C ₃ : T3 Vs (T1 + T2)	0,086 ^{NS}	0,822 ^{NS}	0,595 ^{NS}	0,300 ^{NS}	0,002 ^{**}	0,183 ^{NS}	0,987 ^{NS}
Contraste C ₄ : T2 Vs T1	0,004 ^{**}	0,827 ^{NS}	0,868 ^{NS}	0,130 ^{NS}	0,912 ^{NS}	0,249 ^{NS}	0,439 ^{NS}

Nota: T1 – Somente água de abastecimento (AA), T2 – 75% de AA e 25% de água produzida tratada (AP), T3 – 50% de AA e 50% de AP, T4 – 25% de AA e 75% de AP, e T5 – somente AP; 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 ^{*} Significativos a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

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

Fonte: Arquivo da pesquisadora (2018).

O FB com valores acima de 1,0 demonstra uma maior capacidade das plantas em absorver e acumular maiores concentrações de metais pesados, evidenciando potencial bioacumulador das culturas.

Para todos os elementos estudados, o girassol apresentou FB maior que 1, exceto para o Fe e para o Na, assim, esta planta tem a capacidade de extrair o elemento do solo e armazenar em seus tecidos vegetais com mostra a Tabela 13.

Para todos os tratamentos as médias de FB do Mn, foram superiores a 1, apresentado maior média no tratamento T2 com 54,578. Não houve diferença estatística entre as médias pelo teste F e nem quando se verifica os contrastes ortogonais. O Mn é de extrema importância em processos enzimáticos e no processo de fotossíntese, dessa forma, sua deficiência pode causar manchas nas folhas das plantas (Faquin, 2005).

O Fe foi o único elemento a apresentar FB menor que 1 em todos os tratamentos. Não houve diferença estatística entre as médias pelo teste F, e nenhum dos contrastes ortogonais

foi significativo. Quando em excesso, um possível mecanismo para a destoxificação de ferro em plantas tolerantes é sua compartimentalização em vacúolos, onde não reage com substâncias metabolicamente ativas na célula (Kim et al., 2007).

Conforme descrito por Tavares (2009), esse fato ocorre devido na maioria das vezes à absorção dos metais pelas plantas ser limitada pela baixa solubilidade e difusão destes no solo e para a superfície das raízes. Portanto, torna-se importante neste contexto, o uso de agentes complexantes, a fim de aumentar a absorção dos metais pelas plantas e facilitar o processo de fitorremediação.

Para o teor de Zn, não houve efeito significativo para as médias estudadas e nem para os contrastes ortogonais. Notou-se que o FB em todas as médias apresenta-se acima de 1, evidenciando a bioacumulação deste na planta. O Zn é um micronutriente que faz parte da estrutura de compostos e ativadores enzimáticos (Pilon et al., 2006; Kabata-Pendias, 2011), ainda, está associado com o metabolismo de carboidratos, regulação da expressão de genes, integridade estrutural do ribossomo e metabolismo de fosfato, além da síntese de enzimas como as desidrogenases, proteinases e peptidases (Cherif et al., 2011; Kabata-Pendias, 2011). Todavia, plantas que crescem em solos que apresentam altas concentrações Zn na solução do solo podem acumular elevada quantidade deste elemento em seus tecidos (Kabata-Pendias, 2011).

Estatisticamente não houve significância para o elemento Cr, apesar de apresentarem médias maiores que 1,0 evidenciando a bioacumulação do elemento nas plantas de girassol. Nas plantas, a absorção e translocação de Cr variam de acordo com a espécie. Devido a sua afinidade por cargas negativas, ele é imobilizado, principalmente, nas raízes e não na superfície radicular. Os sintomas de toxicidade manifestam-se como inibição do crescimento, clorose nas folhas jovens, folhas pequenas de coloração vermelho-amarronzada ou púrpura, lesões necróticas e injúrias nas raízes (Bergmann, 1992; Kabata-Pendias et al. 1992).

Houve efeito significativo a um nível de 1% de probabilidade pelo Teste de Tukey para o fator de bioacumulação de Ni. Verificou-se maior média no tratamento T3 e menor média no tratamento T2 conforme Tabela 13. Ainda, verificou-se diferença estatística a um nível de 1% de probabilidade para o contraste C3. O elemento Ni apresentou médias maiores que 1, assim, apresenta bioacumulação deste elemento em plantas de girassol. Tavares, et al. (2013) avaliando plantas de girassol na fitorremediação de solos contaminados por metais pesados verificaram que, essa espécie foi eficiente em capturar os elementos Cr e Ni, tendo como base os níveis desses metais biodisponíveis no solo após o plantio das espécies vegetais.

Não houve significância pelo Teste F e nem para os contrastes ortogonais para o elemento Pb, porém, observa-se a capacidade da planta de girassol bioacumular este elemento. O Pb

presente no solo pode causar efeitos diretos no desenvolvimento dos vegetais, comprometendo a germinação de sementes e o crescimento da planta, reduzindo a transpiração e a pressão osmótica da seiva celular, o potencial de água no xilema, o conteúdo de água, a absorção e transporte de nutrientes minerais, e, além disso, tem sido reportado evidências de que prejudica o desenvolvimento radicular (Almeida et al., 2007).

Andrade et al. (2009), também, observaram aumento dos teores de Pb, Cd, Cu, Ni e Zn nas plantas de girassol, grama batatais e aveia preta com aumento do nível de contaminação do solo, sendo a raiz, a parte da planta com o maior teor de metais.

Para o elemento Na não houve diferença estatística entre os tratamentos e nem ao verificar-se os contrastes ortogonais. Ainda, o FB para este, foi menor que 1,0 em todos dos tratamentos, denotando a não eficiência da planta em acumular esse metal alcalino em relação a sua concentração no solo.

Para contornar o problema de acúmulo de Na, as plantas desenvolveram vários mecanismos para garantir a sua sobrevivência em ambientes estressantes. Estas estratégias incluem o acúmulo seletivo ou a exclusão de íons, o controle na absorção dos íons e seu transporte para as folhas, a compartimentalização dos íons nas células ou na planta como um todo, síntese de solutos compatíveis (ajustamento osmótico), mudanças na rota fotossintética, alteração na estrutura das membranas, indução de enzimas antioxidantes e hormônios vegetais, aumento no crescimento da raiz, folhas menores em tamanho e quantidade, dentre outros (Parida et al., 2005; Lei et al., 2006).

Ainda, estudos realizados afirmam que o acúmulo de aminoácidos, em especial a prolina, pode contribuir para o ajuste osmótico, de forma a minimizar os impactos prejudiciais da desidratação causada tanto pelo déficit hídrico como pela salinidade (Costa, 1999; Taiz et al., 2009).

Sabe-se que o uso de ácidos orgânicos ou quelantes sintéticos, pode acelerar a translocação de metais para a parte aérea, como afirma Nascimento et al, (2006). Ácidos orgânicos de baixo peso molecular são provavelmente os mais utilizados em sistemas de fitoextração, pois influenciam a aquisição de metais pela formação de complexos com íons metálicos, ou através da diminuição do pH em torno das raízes, alterando as características do solo. Ainda, segundo o autor, o ácido etilenodiaminotetracético (EDTA) tem sido utilizado com sucesso como quelantes de chumbo e outros metais de solos contaminados.

As resistências das plantas aos íons de metais pesados podem ser obtidas por um mecanismo em que a mesma o evita, o que inclui a imobilização do metal nas raízes e na parede celular. A tolerância aos metais pesados está baseada no sequestro dos íons dos metais nos vacúolos, sua ligação com ligantes apropriados como os ácidos orgânicos, proteínas e

peptídeos, e na presença de enzimas que podem funcionar a altos níveis de íons metálicos (Garbisu et al., 2001).

O girassol apresentou eficiência na translocação apenas para o Na, já para o fator de bioacumulação a cultura apresentou eficiência para todas as variáveis estudadas, exceto para Na. Esses fatores permitem avaliar a proporção do conteúdo dos contaminantes presentes no solo que é transferido para as plantas.

5 CONCLUSÕES

Entre os atributos físico-químicos monitorado no solo, apenas os teores de Mg^{2+} aumentaram, significativamente, com as diluições de água produzida tratada, porém, deve enfatizar o relevante conteúdo de Na^+ e Cl^- na água produzida tratada que pode limitar a utilização desta água para irrigação, devido aos riscos de sodificação do solo e de fitotoxicidades à cultura, principalmente se for aplicada via sistema de irrigação por aspersão.

Os efeitos da água produzida tratada no solo após o cultivo do girassol foram favoráveis quanto ao fornecimento e à disponibilidade de nutrientes. Além disso valores de pH superiores a 7,50 na água produzida tratada e de 8,0 no solo, minimizam os riscos ambientais dos metais pesados.

Não houve efeito negativo causado pela água produzida tratada nas características agronômicas do girassol. Inclusive o diâmetro de capítulo do girassol apresentou aumento significativo com o uso das diluições de água produzida tratada.

O girassol apresentou eficiência na translocação de Na e bioacumulação de Mn, Zn, Cr, Ni e Pb.

Para aprimorar os conhecimentos sobre o uso sustentável da água produzida para fins agrícolas, recomenda-se a realização de estudos complementares sobre os efeitos dos hidrocarbonetos, fenóis e outros metais pesados no sistema solo-planta.

REFERÊNCIAS

- Abreu, C. A.; Cantoni, M.; Coscione, A. R.; Paz-Ferreiro, J. Organic matter and barium absorption by plant species grown in an area polluted with scrap metal residue. *Applied and Environmental Soil Science*, v. 2012, p. 1-7, 2012.
- Abreu, C. A.; Lopes, A. S.; Raij, B. van. Análise de micronutrientes em solos brasileiros: situação atual e perspectiva. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 26, 1997, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. CD Rom.
- Abreu, C. A.; Mota, K. N. A. B.; Sacramento, B. L.; Azevedo Neto, A. D. Teores de pigmentos em girassol sob doses de chumbo em solução nutritiva. *Enciclopédia Biosfera*, v. 10 p. 1078-1087, 2014.
- Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2017. Rio de Janeiro: ANP, 2017. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/anuario-estatistico/3819-anuario-estatistico-2017>>. Acesso em: 20 out. 2017.
- Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP. Décima terceira rodada de licitações, 2015. Rio de Janeiro: ANP, 2015. Disponível em: <http://rodadas.anp.gov.br/arquivos/Round_13/areas_oferecidas_r13/Sumarios_Geologicos/Sumario_Geologico_Bacia_Potiguar_R13.pdf>. Acesso em: 20 Out. 2017.
- Ahmadun, F.; Pendashteh, A.; Abdullah, L. C.; Biak, D. R. A.; Madaeni, S. S.; Abidin, Z. Z. Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, v. 170, p. 530-551, 2009.
- 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.
- Almeida A. A. F; Valle R. R.; Mielke M. S; Gomes F. P. Tolerance and prospection of phytoremediator woody species of Cd, Pb, Cu and Cr. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v. 19, p. 83–98, 2007.
- Almeida, O. A. Qualidade da água de irrigação. Cruz das Almas: EMBRAPA, 2010. 234 p.
- 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.
- Amini, S.; Mowla, D.; Golkar, M.; Esmailzadeh, F. Mathematical modelling of a hydrocyclone for the down-hole oil-water separation (DOWS). *Chemical Engineering Research and Design*, v. 90, p. 2186-2195, 2012.
- Andrade, J. C. M; Tavares, S. R. L; Mahler, C. F. O uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 175 p.
- Andrade, M. G.; Melo, V. F.; Gabardo, J.; Souza, L. C. P.; Reissmann, C. B. Metais pesados em solos de área de mineração e metalurgia de chumbo. I – Fitoextração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 1879-1888, 2009.

- Angelim, L. A. A.; Nesi, J. R.; Torres, H. H. F.; Medeiros, V. C.; Santos, C. A.; Veiga Junior, J. P.; Mendes, V. A. Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Norte - Escala 1:500.000. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2006. 119p.
- Ayers, R. S.; Westcot, D. W. A qualidade da água na agricultura. 2.ed. Campina Grande: UFPB, 1999. 218p. (Estudos da FAO: Irrigação e Drenagem, 29 Revisado).
- 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 Agrônomo, 1983. 48p. (Boletim Técnico, 78).
- Benko, K. L.; Drewes, J. E. Produced water in the United States: geographical distribution, occurrence and composition. *Environmental Engineering Science*, v. 25, p. 239-246, 2008.
- Bensadok, K.; Belkacem, M.; Nezzal, G. Treatment of cutting oil/water emulsion by coupling coagulation and dissolved air flotation. *Desalination*, v. 206, p. 440-448, 2007.
- Bergmann, W. Nutritional disorders of plants: developments, visual and analytical diagnosis. New York: Gustav Fischer Verlag Jena, 1992. 741 p.
- Biondi, C. M.; Nascimento, C. W. A.; Fabricio Neta, A. B. Teores naturais de bário em solos de referência do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 1819-1826, 2011.
- Blaylock, M. J.; Huang, J. W. Phytoextraction of metals. In Raskin, I.; Ensley, B. D. *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean up the environment*. New York: Wiley, p.53-70. 2000.
- Blumwald, E.; Sodium transport and salt tolerance in plant cells. *Current Opinion of Cell Biology*, v. 12, p. 76-112, 2000.
- Borkert, C. M.; Pavan, M. A.; Bataglia, O. C. Disponibilidade e avaliação de elementos catiônicos: ferro e manganês. In: Pereira, M. E.; Cruz, M. C. P.; Raij, B. van; Abreu, C. A. *Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura*. Anais... Jaboticabal: CNPq/FAPESP/POTAFOS, 2001. CD Rom.
- Branzini, A.; González, R.S.; Zubillaga, M. Absorption and translocation of copper, zinc and chromium by *Sesbania virgata*. *Journal of Environmental Management*, v.102 p.50-54, 2012.
- 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, 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. 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.
- 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. Nota sobre o pré-sal e o campo de Libra. Ministério de Minas e Energia. 2013. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/noticias/lista_destaque/destaque_999034.html>. Acesso em: 01 jun. 2018.
- Bucks, D. A.; Nakayama, F. S.; Gilbert, R. G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. *Agricultural Water Management*, v. 2, p. 149-162, 1979.
- Capps, R. W.; Metelli, G. N.; Bradford, M. L. Reduce oil and grease content in wastewater, *Hydrocarbon Processing*, v.1, p. 102-110, 1993.
- Capra, A.; Scicolone, B. Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 70, p. 355-365, 1998.
- 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).
- Castro, C.; Castiglioni, V. B. R.; Balla, A. A cultura do girassol: tecnologia de produção. Londrina: Embrapa-CNPSO, 1996. 20 p.
- 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.
- Cavalcante Júnior, E. G. Produção e necessidade hídrica da cultura do girassol irrigado na chapada do Apodi. Mossoró: UFRS. 2011. 61f. 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.
- CFSEMG - Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais -. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação. Viçosa-MG: 1999. 359p.
- Cherif, J., Mediouni, C., Ammar, W.B., Jemal, F. Interactions of zinc and cadmium toxicity in their effects on growth and in antioxidative systems in tomato plants (*Solanum lycopersicum*). Journal of Environmental Sciences, v. 23, p. 837-844, 2011.
- Clark, C. E.; Veil. J. A. Produced Water volumes and management practices in the United States, Environmental Science Division, Argonne National Laboratory for the U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, 2009. 59p.
- Coday, B. D.; Xu, P.; Beaudry, E. G.; Herron, J.; Lampi, K.; Hancock, N. T.; Cath, T. Y. The sweet spot of forward osmosis: Treatment of produced water, drilling wastewater and other complex and difficult liquid streams. Desalination, v. 333, p. 23-35, 2014.
- Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. Comparativo de área, produtividade e produção safras 2016/17. Disponível em: <www.conab.gov.br> Acesso em: 15 jul. 2018.
- Coscione, A. R.; Berton, R. S. Barium extraction potential by mustard, sunflower and castor bean. Scientia Agricola, v. 66, p. 59-63, 2009.
- Costa, F. G. B.; Batista, R.O.; Pereira, J. O.; Ferreira Neto, M.; Alves, S. M. C.; Simoes, W. L.; Souza, L.; 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.
- Costa, R. C. L. Assimilação de nitrogênio e ajustamento osmótico em plantas noduladas de feijão-de-corda, submetidas ao estresse hídrico. Fortaleza: UFC, 1999. 187p. Tese Doutorado.
- Crisóstomo, L. A.; Weber, O. B.; Miranda, F. R.; Aragão, F. A. S.; Barros, M. E. S. , F. C. Irrigação com água produzida: efeitos sobre as características do solo e a produção de girassol. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2016. 35 p.
- 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. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2018. 27 p.
- Curbelo, F. D. S. Estudo da Remoção de Óleo em Águas Produzidas na Indústria de Petróleo por adsorção em coluna utilizando a Vermiculita Expandida e Hidrofobizada, Natal: UFRN, 2002. 93p . Dissertação Mestrado.
- Curti, G. L. Caracterização de cultivares de girassol ornamental semeados em diferentes épocas no Oeste Catarinense. Pato Branco: UTFPR, 2010. 76p. Dissertação Mestrado:

- Doorenbos, J.; Pruitt, J. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome: FAO, p 179. 1977. (FAO Irrigation and Drainage, 24).
- Ernest, W. H. O.; Bioavailability of heavy metals and descontamination of soils by plants. *Applied Geochemistry*, v.11, p.163-167, 1996.
- Fagundes, M. H. Sementes de Girassol: alguns comentários. FGV. Preços agropecuários. Disponível em: <<http://www.fgvdados.fgv.br/>>. Acesso em: 18 jun. 2018.
- Fakhru'l-razi, A.; Alireza, P.; Luqman, C. A.; Dayang, R. A. B; Sayed, S. M.; Zurina, Z. A. Review of Technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, v. 170, p. 530-551, 2009.
- Faquin, V.; Nutrição mineral de plantas, 1. ed. Lavras: UFLA, 2005. 175p.
- Farag, A. M.; Harper, D. D. A review of environmental impacts of salts from produced water on aquatic resources. *International Journal of Coal Geology*, v. 126, p. 157-161, 2014.
- Fassbender, H. W.; Bornemisza, E. Química dos suelos com énfasis em suelos de América Latina. 2 ed., San José: IICA, 1987. 420p.
- Fayiga, A. O.; Ma, L. Q. Using phosphate rock to immobilize metals in soil and increase arsenic uptake by hyperaccumulator *Pteris vittata*. *Science of The Total Environment*, v. 359, p. 17-25, 2006.
- Feigin, A.; Ravina, I.; Shalhevet, J. Irrigation with treated sewage effluent: management for environmental protection. Springer-Verlag, 1991. 233 p.
- 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, p.1039-1042, 2011.
- Figueredo, K. S. L. Estudo da água produzida em diferentes zonas de produção de petróleo, utilizando a hidroquímica e a análise estatística de parâmetros químicos. Natal: UFRN, 2010. 123p. Dissertação Mestrado.
- Gabardo, I. T. Caracterização química e toxicológica da água produzida descartada em plataformas de óleo e gás na costa brasileira e seu comportamento dispersivo no mar. Natal: UFRN, 2007. 250p. Tese Doutorado.
- Galvão, E. Z. Micronutrientes. In: Souza, D. M. G.; Lobado, E. Cerrado: Correção do solo e adubação. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, Cap.8, 2004. p.185-226.
- Garbisu, C.; Alkorta, I. Phytoextraction: a cost effective plant-based technology for the removal of metals from the environment. *Bio resource Technology*, v.77, p. 229-236, 2001.

- Gazzoni, D. L. Óleo de girassol como matéria-prima para biocombustíveis. In: LEITE, R.M.V.B.C. et al. (Ed.). *Girassol no Brasil*. Londrina: Embrapa. p.145-161, 2005.
- Goldemberg, J.; Schaeffer, R.; Szklo, A.; Lucchesi, R. Oil and natural gas prospects in South America: can the petroleum industry pave the way for renewable in Brazil. *Energy Policy*, v. 64, p. 58-70, 2014.
- González, I.; Muená, V.; Cisternas, M.; Neaman, A. Acumulación de cobre en una comunidad vegetal afectada por contaminación minera en el valle de Puchuncaví, Chile central. *Revista chilena de historia natural*, v. 81, p. 279-291, 2008.
- Grossman, E. Are you eating food that was irrigated with oilfield wastewater. 2016. Disponível em: <<http://civileats.com/2016/08/17/are-you-eating-food-that-was-irrigated-with-oil-wastewater/>>. Acesso em: 01 jun. 2018.
- Gulzar, S.; Khan, M.A.; Ungar, I.A. Salt tolerance of a coastal salt marsh grass. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.34, p. 2595-2605, 2003.
- Hansen, B. R.; Davies, S. R. H. Review of potential technologies for the removal of dissolved components from produced water. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, v. 72, p. 176-188, 1994.
- Henry, J.R..An overview of the phytoremediation of lead and mercury. National Network of Environmental Management Studies (NNEMS). Washington, D. C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2000. p.51.
- Herzig, R.; Nehnevajova, E.; Pfister, C.; Schwitzguebel, P.; Ricci, A.; Keller, C. Feasibility of Labile Zn Phytoextraction Using Enhanced Tobacco and Sunflower: Results of Five and One-Year Field-Scale Experiments in Switzerland. *International Journal of Phytoremediation*. v. 16, p. 735-754, 2014.
- Hong, A.; Fane, A. G.; Burford, R. Factors affecting membrane coalescence of stable oil-in-water emulsions. *Journal of Membrane Science*, v. 222, p. 19-39, 2002.
- Hosseini I, A. Brown, J.E.; Gwinn, J.P.; Dowdall, M. Review of research on impacts to biota of discharges of naturally occurring radionuclides in produced water to the marine environment. *Science of the Total Environment*, n. 438, p. 325-333, 2012.
- Huang, J. W.; Chen, J.; Berti, W. R.; Cunningham, S.D. Phytoremediation of lead-contaminated soils: role of synthetic chelates in lead phytoextraction. *Environmental Science Technology*, v.31, p.800-805, 1996.
- Iwaki, G. P.; *Sistemas de Tratamento de Água Produzida em Plataformas Off-Shore*, Portal tratamento de água,. 2015. 6p.
- Kabata-Pendias, A.; Pendias, H. Trace elements in soils and plants. Boca Raton, CRC Press LLC, 413 p. 2011.
- Kabata-Pendias, A.; Pendias, H. Trace elements in soil and plants. 2.ed. Florida: CRC Press, 1992. 365p.

- Kabata-Pendias, A.; Pendias, H. Trace Elements in Soils and Plants. 3.ed. Florida: CRC press, 2001. 432 p.
- Kachenko, A.G; Sing, B. Heavy Metals Contamination in Vegetables Grow in Urban and Metal Smelter Contaminated Sites in Austrália. *Water, Air, and Soils*, v. 169, p. 101-123, 2006.
- Khan, A. G.; Kuek, C, Chaudhry, T. M.; Khoo, C. S; Hayes, W. J. Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated land remediation. *Chemosphere*, v.41, p.197-207, 2000.
- Kim, S. A.; Guerinot, M. L. Mining iron: Iron uptake and transport in plants. *FEBS Letters*, v. 581, p. 2273–2280, 2007.
- Korndorfer, G. H. Elementos benéficos. In: FERNANDES, M. S. (Ed.) *Nutrição mineral de plantas*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 355-374. 2006.
- Léon Suematsu, G.; Cavallini, J. M. Tratamento e uso de águas residuárias. Tradução de Gheyi, H. R.; König, A.; Ceballos, B. S. O.; Damasceno, F. A. V. Campina Grande: UFPB, 1999. 109p.
- Li, N. N.; Fane, A. G.; Winston Ho, W. S.; Matsuura, T. *Advanced membrane technology and applications*. Wiley: New Jersey, 2008. 989p.
- Lei, Y.B.; Yin, C.Y.; Li, C.Y. Differences in some morphological, physiological and biochemical responses to drought stress in two contrasting populations of *Populus przewalskii*. *Physiologia Plantarum*, v.127, p.182–191, 2006.
- Lima, A. M. Avaliação do potencial fitorremediador da mamona (*Ricinus communis* L.) e girassol (*Helianthus annuus* L.) quanto à remoção de chumbo e tolueno em efluentes sintéticos. Natal: UFRN. 2010. 110p. Tese Doutorado.
- Lira, M. A.; Carvalho, H. W. L.; Chagas, M. C. M.; Bristot, G.; Dantas, J. A.; Lima, J. M. P. Avaliação das potencialidades da cultura do girassol, como alternativa de cultivo no semiárido nordestino. Natal: EMPARN. 2011. 40p. (Documentos, 40).
- Llugany, M.; Poschenrieder, C.; Barceló, J. Assessment of barium toxicity in bush beans. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 39, p. 440–444, 2000.
- Lubben, S.; Sauerbeck, D. The uptake and distribution of heavy-metals by spring wheat. *Water Air and Soil Pollution*, v.57, p.239-247, 1991.
- Ma, L. Q.; Komar, K. M.; Tu, C.; Zhang, W.; Cai, Y.; Kenelley, E. D. A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, v. 409, p. 579-, 2001.
- Malavolta, E. ABC da análise de solos e folhas. São Paulo: Agronômica Ceres, 1992. 124p.
- Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- Mantovani, E. C.; Costa, L.C. Manejo integrado das culturas e dos recursos hídricos. Brasília: SRH/MMA-DEA-UFV, 1998. 154 p.

- Mariano, D. C.; Okumura, R. S. Aspectos agronômicos, usos pelo homem e mecanismos da fitorremediação: uma revisão. *Revista em agronegócios e Meio Ambiente*, v. 5, p. 85-101, 2012.
- Medeiros, S. S.; Soares, A. A.; Ferreira, P. A.; Matos, A. T.; Souza, J. A. A. Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: Estudo das alterações químicas do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, p.603- 612, 2005.
- Melo, L. C. A; Alleoni, L. R. R.; Carvalho, G.; Azevedo, R. A. Cadmium and barium toxicity effects on growth and antioxidant capacity of soybean (*Glycine max L.*) plants, grown in two soil types with different physicochemical properties. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, v. 174, p. 847-859, 2011.
- Meneses, A. C. M. Azevedo de; Weber, O. B.; Crisostomo, L. A.; Andrade, D. J. Biological soil attributes in oilseed crops irrigated with oilfield produced water in the semi-arid region. *Revista Ciência Agronômica*, v.48, p. 231-241. 2017.
- Merlino, L. C. S. Bário, cádmio, cromo e chumbo em plantas de milho e em Latossolo que recebeu lodo de esgoto por onze anos consecutivos. Jaboticabal: UNESP. 2010. 92p. Dissertação de Mestrado.
- Miranda, F. R. de; Crisostomo L. A.; Weber, O. B.; Barbosa, F. L.; Aragao, F. A. S. de; Oliveira, M. E. B. de. Irrigação com água produzida na extração de petróleo: efeitos sobre a salinidade do solo e a produtividade da mamoneira. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2016. 29p.
- Mohr, H.; Schopfer, R. *Plant Physiology*. Berlin: Springer-Verlog, 1995. 629p.
- Monteiro, F. A.; Nogueiro, R. C.; Melo, L. C. A.; Artur, A. G.; Rocha, F. Effect of barium on growth and macronutrient nutrition in *Tanzania guineagrass* grown in nutrient solution. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 42, p. 1510–1521, 2011.
- Morais, J. M. *Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore*. Brasília: IPEA/Petrobras, 2013. 424p.
- Nascimento, C. W. A.; Xing, B. Phytoextraction: A review on enhanced metal availability and accumulation. *Scientia Agricola*, v. 63, p. 299-311, 2006.
- Nascimento, M. L. O princípio constitucional da eficiência aplicado à outorga e à cobrança da água produzida na exploração petrolífera. Natal: UFRN. 2009. 216f. Dissertação Mestrado.
- Neff, J.; Lee, K.; Deblois, E. M. Produced water: Overview of composition, fates and effects. Cap. 1 In: *Produced water, environmental risks and advances in mitigation technologies*. Lee, K.; Neff, J. (eds.). Springer Science, 2011.608p.
- Nehnevajova, E. H., Federer, R., Erismann, G., Schwitzguebel, K. H., Paul, J. Screening of sunflower cultivars for metal phytoextraction in a contaminated field prior to mutagenesis *International Journal of Phytoremediation*. v. 7, p. 337-349, 2005.

- Nogueira, T. A. R.; Melo, W. J.; Fonseca, I. M.; Marques, M. O.; HE, Z. Barium uptake by maize plants as affected by sewage sludge in a long-term field study. *Journal of Hazardous Materials*, v.181, p. 1148–1157, 2010.
- Norimitsu Onishi, A California Oil Field Yields Another Prized Commodity. Disponível em: <https://www.nytimes.com/2014/07/08/us/california-drought-chevron-oil-field-water-irrigation.html?_r=0> Acesso em 05 de setembro de 2017.
- Novais, R. F.; Neves, J. C. L.; Barros, N. F.; Sedyama, T. Deficiência de manganês em plantas de soja cultivadas em solos de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 13, p.:199-204, 2007.
- NSW – New South Wales Government. Use of effluent by irrigation. Austrália: Department of Environment and Climate Change and Water NSW, 2004. 135 p.
- NSW – Effluent reuse management. Austrália: Department of Environment and Climate Change and Water NSW, 2010. 65 p.
- Nunes, S. K. S. Tratamento de Água de Produção de Petróleo visando o Aproveitamento na Obtenção de Barrilha. Natal: UFRN. 2013 234 p. Tese Doutorado.
- O’rourke, D.; Connolly, S. Just oil The distribution of environmental and social impacts of oil production and consumption. *Annual Reviews Environmental Resources*, n. 28: p. 567-617, 2005.
- Ogp. Fates and effects of naturally occurring substances in produced water on the marine environment. International Association of Oil and Gas Producers, Report n. 364, 2005. 42p.
- Ogp, Offshore environmental monitoring for the oil and gas industry. International Association of Oil and Gas Producers, Report n. 457, 2012. 32p.
- Oliveira, M. F.; Castiglioni, V. B. R.; Carvalho, C. G. P. Melhoramento do Girassol. In: Leite, R. M. V. B. C.; Brighenti, A. M.; Castro, C. (Ed.). *Girassol no Brasil*. Londrina: EMBRAPA, cap. 11, p. 269-297. 2005.
- Oliveira, R. C. G, Oliveira, M.C.K Remoção de Contaminantes tóxicos dos efluentes líquidos oriundos da atividade de produção de petróleo no mar, *Bol. Téc. PETROBRAS*, Rio de Janeiro, v. 43, p. 129-136, 2000.
- Orihuela, D, L; Hernandez, J, C; Weiland, C, M; Moreno, C, M. Factores de transferencia suelos-hojas del Ni en melocotones. Posibles Alteraciones por la Bajada de pH del Suelo. *Agricola Vergel*, v.313, p. 35-40, 2008.
- Paiva, H. N.; Carvalho, J.; Siqueira, J. O.; Fernandes, A. R.; Miranda, J. Efeito da aplicação de doses crescentes de níquel sobre o teor e o conteúdo de nutrientes em mudas de ipê-roxo (*Tabebuia impetiginosa* (Mart.) Standley). *Scientia Forestalis*, n. 63, p. 158-166, 2000.
- Parida, A. K.; Das, A. B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 60. p. 324-349, 2005.

- Pereira, M. G.; Pérez, D. V.; Valladares, G. S. Comparação de métodos de extração de cobre, zinco, ferro e manganês em solos do Estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p. 655-660, 2001.
- Pereira, V. C.; Amabile, R. F.; Carvalho, C. G. P. de; Barbosa, F. de S.; Ribeiro Júnior, W. Q. Girassol em safrinha no Cerrado do Distrito Federal: desempenho de genótipos em 2006. In: simpósio nacional cerrado, 9.; Simpósio Internacional Savanas Tropicais, 2., 2008, Brasília, DF. Desafios e estratégias para o equilíbrio entre sociedade, agronegócio e recursos naturais: Anais... Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008. 1 CD-ROM.
- Pilon-Smits, E. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*. v. 56, p. 15–39. 2005.
- Pinheiro, R.; Travalloni, A. M.; Júnior, G. M.; Crisóstomo, L. A.; Aquino, O.; Orlando, A. E. IBP 1010/14 Projeto Piloto de Irrigação com Água Produzida no Campo de Fazenda Belém. In: Rio Oil & Gas Expo and Conference, Anais... Rio de Janeiro, 2014. CD Rom.
- Pletsch, M.; Charlwood, B. V.; Araujo, B. S. Fitorremediação de águas e solos poluídos. *Biociências & Desenvolvimento*, v. 2, p. 26-29, 1999.
- Preston, W.; Nascimento, C. W. A.; Biondi, C. M.; Souza Junior, V. S.; Silva, W. R.; Ferreira, H. A. Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos do Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 1028-1037, 2014.
- Raij, B. Van.; Andrade, H. C.; Quaggio, J. A.; Furlani, A. M. C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundação IAC, 1996. 285p.
- Raskin, I.; Kumar, P. B. A.; Dushenkov, S.; Salt, D. E. Bioconcentration of heavy metals by plants. *Current opinions in Biotechnology*, v.5, p.285-290, 1994.
- Rêgo, L. G. S.; Martins, C. M.; SILVA, E. F.; SILVA, Jéssia Juliana Alves; LIMA, R. N. S. Pedogenesis and soil classification of an experimental farm in mossoró, state of rio grande do norte, brazil. *Revista Caatinga*, n. 29, p. 1036-1042, 2016.
- Richards, L. A. Diagnosis and improvement of saline and álcali soils. Washington, US Department of Agriculture, 1954. 160p. (USDA Agricultural Handbook, 60).
- Richter, C. A., Água: métodos e tecnologia de tratamento. 1º Ed.. São Paulo: 2009. 340 p.
- Rocha, J. H. B.; Gomes, M. M. S.; Fernandes, N. S.; Silva, D. R.; Martinezhuitle, C. A. Application of electrochemical oxidation as alternative treatment of produced water generated by Brazilian petrochemical industry. *Fuel Processing Technology*, v. 96. p. 80 – 87. 2012.
- Santos, A. O. Estudo da Resistência a Corrosão em Aço e revestimento visando a aplicação em hastes de bombeio de petróleo. Aracaju: UNIT. 2008. 125p. Dissertação de Mestrado.
- Schmidt, U. Enhancing phytoextraction: the effect of chemical soil manipulation on mobility, plant accumulation, and leaching of heavy metals. *Journal of Environmental Quality*, v. 32, p.1939-1954, 2003.

- Segui, P. N. Bioatenuação da geração de sulfeto, por meio da utilização de nitrato, em água produzida proveniente da extração de petróleo. Vitória: UFES. 2009. 101p. Dissertação Mestrado.
- Shen, Z. G.; Li, X. D.; Wang, C. C.; Chen, H. M.; Chua, H. Lead phytoextraction from contaminated soil with high-biomass plant species. *Journal of Environmental Quality*, v. 31, p. 1893-1900, 2002.
- Silva, C. R. R. Água produzida na extração de petróleo. Salvador: UFBA. 2000. 27 f. Monografia.
- Silva, F. C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627p.
- Silva, F. C.; Boaretto, A. E.; Berton, R. S.; Zotelli, H. B.; Bernardes, C. A. Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.36, p.831-840, 2001.
- Silva, P. C. C; Jesus, F. N. ; Alves, C. A.; Jesus, C. A. S. ; Santos, A. R. Crescimento de plantas de girassol cultivadas em ambiente contaminado por chumbo. *Bioscience Journal*, v. 29, p. 1576-1586, 2013.
- Soares, C. R. F.S.; Accioly, A. M. A; Marques, T. C. L. L. S. M ; Siqueira, J. O. ; Moreira, F. M. S. Acúmulo e distribuição de metais pesados nas raízes, caule e folhas de mudas de árvores em solo contaminado por rejeitos de indústria de zinco. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, v.13, p. 302-315, 2001.
- 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. *Revista Caatinga*, v. 29, p. 94 - 100, 2016.
- Stewart, M.; Arnold, K. Produced water treatment field manual. Part 1 - Produced Water Treating Systems, p. 1-134. 2011.
- Stromgren, T.; Sørstrøm, S. E.; Schoub, L.; Kaarstad, I.; Aunaas, T.; Brakstad, O.G.; Johansen, O. Acute toxic effects of produced water in relation to chemical composition and dispersion. *Marine Environmental Research*, v. 40, p. 147-169, 1995.
- Suwa, R.; Jayachandran, K.; Nguyen, N. T.; Boulenouar, A.; Fujita, K.; Saneoka, H. Barium toxicity effects in soybean plants. *Archives of environmental contamination and toxicology*, v. 55, p. 397-403, 2008.
- Syam, N.; Wardiyati, T.; Maghfoer, M. D.; Handayanto, E.; Ibrahim, B.; Muchdar, A. Effect of accumulator plants on growth and nickel accumulation of soybean on metal-contaminated soil. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, v. 9, p. 13-19, 2016.
- Taiz, L.; Zeiger, E. *Plant physiology*. 4nd ed. Sunderland: Sinauer Associates, Inc. Publishers, 2009. 848p.
- Tan, K.H. *Environmental soil science*. 2.ed. New York: Marcel Dekker Inc., 2000. 452p.

- Tavares, S. R. L. Fitorremediação em solo e água de áreas contaminadas por metais pesados provenientes da disposição de resíduos perigosos. Rio de Janeiro : UFRJ, 2009. 371 p. Tese Doutorado.
- Tavares, S. R. L.; Oliveira, S. A. de; Salgado, C. M.. Avaliação de espécies vegetais na fitorremediação de solos contaminados por metais pesados. *Holos*, v. 5, p. 80-97, 2013.
- 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.
- Thomas, J. E. Fundamentos da engenharia do petróleo. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. 271 p.
- Trindade, R.S.; Araújo, A.P.; Teixeira, M.G. Leaf área of common bean genotypes during early pod filling as related to plant adaptation to limited phosphorus supply. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v.34, p.115-124, 2010.
- United States Environmental Protection Agency (US-EPA). Introduction to phytoremediation: EPA/600/R-99/107. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, 2000.
- Veil, J.; Puder, M. G.; Elcock, D.; Redweik, R. J. J. A white paper describing produced water from production of crude oil, natural gas, and coal bed methane. Pittsburgh: Argonne National Laboratory for US Department of Energy, 2004. 87 p.
- Vieira, V. M. Água produzida no segmento onshore de petróleo – caracterização de cenários na Bahia e prospecção de soluções para gerenciamento. Salvador: UFBA. 2011, 70p. Dissertação de Mestrado.
- Wang, X.; Goual, L.; Colberg, P. J. S. Characterization and treatment of dissolved organic matter from oilfield produced waters. *Journal of Hazardous Materials*, v. 30, p. 164-170. 2012.
- Weber, O. B.; Crisostomo, L. A.; Miranda, F. R.; Sousa, A. F.; Mesquita, A. L. M.; Cabral, J. E. O. Production of ornamental sunflower irrigated with oilfield produced water in the Brazilian semiarid region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 52, p.443-454, 2017.
- Xavier, Y. M. de A.; Guimarães, P. B. V.; Silva, M. dos R. F. Recursos hídricos e atividade econômica na perspectiva jurídica do desenvolvimento sustentável. Fortaleza: Ed. Anja Czymmeck, 2010. 231 p.
- Yeh, T. Y.; Lin, C. L.; Lin, C. F.; Chen, C. C. Chelator-enhanced phytoextraction of copper and zinc by sunflower, Chinese cabbage, cattails and reeds. *International Journal of Environmental Science and Technology*. v. 12, p. 327–340, 2015.
- Yoon, J.; Cao, X ; Zhou Q. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the Total Environment.*, v. 368, p. 456–464, 2006.

Zalewska, M.;Nogalska, A. Phytoextraction potential of sunflower and white mustard plants in zinc-contaminated soil. *Chilean Journal of Agricultural Research*,v. 74, p. 485-489, 2014.