



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

VICTOR JUNIOR LIMA FELIX

**RECUPERAÇÃO DE SOLO DEGRADADO UTILIZANDO ÁGUA RESIDUÁRIA
TRATADA EM SISTEMA AGROFLORESTAL NO SEMIÁRIDO**

AREIA
2023

VICTOR JUNIOR LIMA FELIX

**RECUPERAÇÃO DE SOLO DEGRADADO UTILIZANDO ÁGUA RESIDUÁRIA
TRATADA EM SISTEMA AGROFLORESTAL NO SEMIÁRIDO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo. Área de concentração: Ciclos Biogeoquímicos em Agroecossistemas Familiares.

Orientadora: Prof^ª Dr^a Vânia da Silva Fraga

**AREIA
2023**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F316r Felix, Victor Junior Lima.

Recuperação de solo degradado utilizando água
residuária tratada em sistema agroflorestal no
Semiárido / Victor Junior Lima Felix. - Areia:UFPB/CCA,
2023.

87 f. : il.

Orientação: Vânia da Silva Fraga.
Tese (Doutorado) - UFPB/CCA.

1. Ciência do Solo. 2. Água residuária. 3.
Fertilidade. 4. Degradação ambiental. 5. Agrofloresta.
I. Fraga, Vânia da Silva. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

CDU 631.4(043.2)

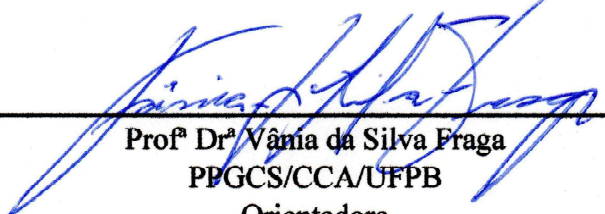
VICTOR JUNIOR LIMA FELIX

**RECUPERAÇÃO DE SOLO DEGRADADO UTILIZANDO ÁGUA
RESIDUÁRIA TRATADA EM SISTEMA AGROFLORESTAL NO SEMIÁRIDO**

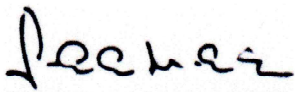
Aprovada em: 23/02/2021

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Ciência do Solo da Universidade Federal da
Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título
de Doutor em Ciência do Solo

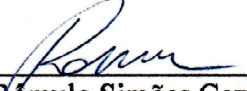
BANCA EXAMINADORA



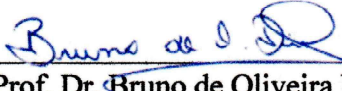
Prof. Dr. Vânia da Silva Fraga
PPGCS/CCA/UFPB
Orientadora



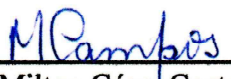
Dr. Salomão de Sousa Medeiros
MCTIC/INSA
Examinador externo



Prof. Dr. Rômulo Simões Cezar Menezes
DEN/UFPE
Examinador externo



Prof. Dr. Bruno de Oliveira Dias
PPGCS/CCA/UFPB
Examinador interno



Prof. Dr. Milton César Costa Campos
PPGCS/CCA/UFPB
Examinador interno

A minha família

Ao Povo Potiguara

Ao Prof. Ignacio Hernán Salcedo (*In memoriam*)

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus e todos os encantados por guiar meus caminhos.

As pessoas mais importantes da minha vida, minha família. Minha mãe, rainha, guerreira, dona do meu amor, Nilma de Lima Cruz. Ao meu irmão, Valberlan de Lima Felix, verdadeiro guerreiro, talento e personalidade, não sei como seria existir sem sua presença. Ao meu pai, Junior de Moraes Felix, pela confiança e aposta, fundamental no início dos meus estudos. A pequena Elayne da Conceição Silva.

Ao meu sobrinho, Lucas Valentim Terto Felix, que é fonte inesgotável de alegria e esperança para mim. A minha sobrinha que ainda está vindo, Lua, para trazer mais luz e beleza para este mundo.

Aos meus avós, Terezinha Ana de Lima (Vozinha), que é minha referência maior de força, garra e leveza para estar nesse mundo e meu avô materno (João) que infelizmente não conheci. Meu avô, Antônio Manoel Felix, figura paterna importantíssima na minha vida e minha maior referência no quesito “ser humano” no seu sentido mais nobre. A minha avó, Emília de Moraes Felix, pela dedicação de sempre. A toda minha família, tios, primos, por sempre se mostrarem entusiasmados com minha caminhada acadêmica. A Queline Terto e toda sua família.

A Vanderléia Fernanda dos Santos Araújo, por ter me acompanhado por todo esse trajeto acadêmico, por nunca ter soltado minha mão e por todo amor. Durante o doutorado e Tese, esteve ao meu lado e foi ajuda indispensável, desde o trabalho de campo à discussão dos resultados, além de ser ouvidos para meus desabafos e apoio nos momentos difíceis. Estendo meus agradecimentos a toda sua família, Josefa Vanessa dos Santos Araújo, Marinalva Alice dos Santos, Wanderley Fernandes Araújo, não tenho palavras para descrever meu apreço e gratidão por todos.

O doutorado foi para mim uma busca por maturidade como pesquisador. Essa busca se iniciou sob a inesquecível orientação do meu amigo, professor Ignacio Hernán Salcedo. As pessoas mais próximas a mim, mesmo sem conhecê-lo, sabiam da admiração que tinha pelo professor. Nem acho que eu era seu orientando mais genial, mas nossa relação orientador-orientado acontecia de forma inexplicavelmente natural. Sobre isso, conheci uma frase que fez todo sentido para mim: “porque era ele, porque era eu” (Montaigne), usada para definir a amizade, e creio que de fato representa a amizade que tivemos.

Um ano depois ele nos deixava e ainda em sua despedida, desolado pela perda, recebi o abraço reconfortante e acolhedor que me disse “não se preocupe, eu estou aqui”. Assim a professora assumiu a missão de dar continuidade ao que o professor Salcedo havia começado.

Só tenho a agradecer por tudo, a “mãe científica” que elogiou e motivou, mas que também cobrou, como deve ser. Minha gratidão aos dois!

Nessa caminhada em busca de maturidade construí laços importantes e que me ajudaram demais nessa missão e levarei para vida. O amigo e colega Renato Francisco da Silva Souza, foi crucial, sempre uma referência para mim. “Didática é uma generosidade”, agradeço dessa forma a Rodrigo Santana de Macedo, que sempre enriqueceu nossas discussões sobre nossas pesquisas, pela amizade, por toda ajuda nas pesquisas, pelas conversas sobre as experiências e sobre a vida, regadas a cerveja sempre que foi possível. A minha grande amiga, Júlia Tavares, não canso de falar, eximia profissional, uma referência para mim, agradeço toda ajuda e por tudo. A Cristiano Souza pela amizade e todo apoio principalmente no laboratório.

A todos amigos e colegas do PPGCS na pessoa de Bruno Soares, grande João Belarmino, Marco Antônio e os demais. Aos amigos do mestrado na pessoa de Vanessa Gomes, Jhony Vendruscolo e Robério.

Agradeço às instituições, UFPB e ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo. A todos os professores do programa na pessoa de prof. Dr. Bruno Oliveira Dias e Raphael Moreira Beirigo. Ao Instituto Nacional do Semiárido (INSA) na pessoa de Dr. Salomão de Sousa Medeiros, pela estrutura e suporte.

Minha trajetória acadêmica teve início em 2010, e hoje, tenho a impressão de que aquele era um outro país, pujante, com incentivo a ciência e educação, diferente do que estamos passando no momento, que insiste em desvalorizar o que lutei tanto para me tornar. Por isso agradeço as políticas, principalmente no campo da educação, dos governos do PT.

Minhas raízes Potiguara, forjadas na luta, na fé e esperança são minhas fontes de energia para persistir sempre.

Agradeço a todos que fizeram parte dessa minha trajetória!

O sertanejo é, antes de tudo, um indígena.
(Carlos Estevão de Oliveira)

“(...) Pra tirar das cacimbas da ciência água doce que regue a plantação”
(Francisco Flávio Leandro Furtado)

RESUMO

A segurança alimentar e a qualidade do ambiente dependem, primordialmente, de dois recursos básicos, o solo e a água. A expansão da degradação dos solos, aliada às mudanças climáticas, representa grande desafio global para a sustentabilidade das sociedades atuais e futuras. Assim, a reutilização de águas residuais na agricultura vem sendo apontada como alternativa para o setor que mais consome água disponível e de boa qualidade. Dessa forma, o objetivo da presente pesquisa foi avaliar o efeito da irrigação deficitária com efluente de esgoto tratado nos atributos químicos e mineralógicos do solo, produção de biomassa e eficiência no uso da água pela palma forrageira, crescimento e características energéticas da madeira em um sistema agroflorestal em área degradada no semiárido brasileiro. Para tanto, foi realizado um experimento em campo, em um solo degradado pela retirada das camadas superficiais, sob sistema agroflorestal com consórcio de duas espécies florestais, Sabiá (*Mimosa ceasalpinifolia*) e Aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão), com palma forrageira (*Opuntia stricta*). O experimento teve duração de quatro anos, sendo os dois primeiros anos irrigados e os dois últimos anos com a interrupção da irrigação. Os tratamentos foram dispostos em blocos casualizados com 10 repetições em três etapas de acordo com o ciclo anual de produção da palma. Etapa 1 (1º ciclo): AB_{0,5} - água de abastecimento 0,5 L/planta/semana; ET_{0,5} - efluente tratado 0,5 L/planta/semana; ET₁ - efluente tratado 1 L/planta/semana. Etapa 2 (2º ciclo) todos os tratamentos foram nivelados no volume de 0,5 L/planta/semana, e na etapa 3 (3º e 4º ciclos) os tratamentos foram interrompidos. Amostras de solo foram coletadas na condição inicial (antes do início do experimento), ao final de dois anos da irrigação e, ao final de dois anos da interrupção dos tratamentos de irrigação, nas quais foram realizadas análises químicas (pH, COT, P, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Al³⁺, H+Al e índices de fertilidade), geoquímicas (Teores totais dos elementos maiores) e mineralógicas. A palma forrageira foi coletada anualmente e realizado os cálculos de produtividade. Nas espécies arbóreas foram realizadas medidas de crescimento (Altura, DAP e DBC) e ao final do experimento realizado o corte para os cálculos de produtividade e análises energéticas da madeira. A fertilidade do solo melhorou principalmente no tratamento de maior volume de efluente tratado. Dois anos após a suspensão da irrigação o efeito residual do período irrigado manteve o status da fertilidade significativamente maior comparado a condição inicial. Ao final do experimento foi observado incipiente processo de solodização e alteração na geoquímica das frações silte e argila, com evidências de formação de ilita na argila com aplicação do efluente. A maior produtividade, em massa fresca e seca da palma forrageira, foi obtida no ET₁. O efeito residual do efluente tratado aplicado no 1º ciclo promoveu aumentos na produtividade até o 4º ciclo de cultivo, além de maior eficiência no uso da água pela palma forrageira. Quanto as arbóreas, os sais presentes na água residuária aplicada nos dois primeiros anos, diminuiu o crescimento e produção de madeira do Sabiá e aumentou na Aroeira. O Efluente Tratado no volume de 1 L/planta/semana aumentou o Rendimento em Líquido Condensado e diminuiu os Materiais Voláteis (MV) do sabiá, enquanto na aroeira aumentou a Densidade Básica e MV, com diminuição do Rendimento Gravimétrico. A aplicação de água residuária melhorou a fertilidade do solo degradado o que se refletiu na produção de biomassa e pode contribuir para sustentabilidade e segurança alimentar dos sistemas agrícolas familiares no semiárido brasileiro.

Palavras-chave: água residuária; fertilidade; degradação ambiental; reuso; agrofloresta.

ABSTRACT

Food security and environmental quality depend primarily on two basic resources, soil and water. The expansion of soil degradation, coupled with climate change, represents a major global challenge for the sustainability of current and future societies. The reuse of wastewater in agriculture has been pointed out as a viable alternative since it is the sector that consumes the most available and good quality water. Thus, the objective of this research was to evaluate the effect of deficient irrigation with effluent treated on soil chemistry and mineralogy, biomass production and efficiency in the use of forage palm water, growth and energy characteristics of wood in an agroforestry system in a degraded area in the Brazilian semi-arid region. For this, a field experiment was carried out in a soil degraded by the removal of the surface layers, under agroforestry system with consortium of two forest species, Sabiá (*Mimosa ceasalpinifolia*) and Aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão) and the forage palm (*Opuntia stricta*). The experiment lasted four years, with the first two years irrigated and the last two years with the interruption of irrigation. The treatments were arranged in randomized blocks with 10 replicates in three stages according to the annual palm production cycle. Stage 1 (1st cycle): AB_{0.5} - water supply 0.5 L/plant/week; ET_{0.5} - treated effluent 0.5 L/plant/week; ET₁ - treated effluent 1 L/plant/week. Stage 2 (2nd cycle) all treatments were leveled at a volume of 0.5 L/plant/week, and in stage 3 (3rd and 4th cycles) the treatments were interrupted. Soil samples were collected in the initial condition (before the beginning of the experiment), at the end of two years of irrigation and, at the end of two years of interruption of irrigation treatments, in which chemical, geochemical and mineralogical analyses were performed. The forage palm was collected annually and productivity calculations were performed. In the tree species, growth measurements were performed and at the end of the experiment, the cut was performed for productivity calculations and energy analyses of the wood. Soil fertility improved mainly in the treatment of higher volume of treated effluent. Two years after the suspension of irrigation the residual effect of the irrigated period maintained significantly higher fertility status compared to the initial condition. At the end of the experiment, an incipient process of soil salinization and alteration in the geochemistry of the silt and clay fractions was observed, with evidence of illite formation in clay with effluent application. The highest yield, in fresh and dry mass of the forage palm, was obtained in ET₁. The residual effect of the treated effluent applied in the 1st cycle promoted increases in productivity up to the 4th cycle of cultivation, in addition to greater efficiency in the use of water by the forage palm. As for trees, the salts present in wastewater applied in the first two years, the growth and production of Sabiá wood decreased and increased in Aroeira. The Treated Effluent in the volume of 1 L/plant/week increased the Yield in Condensed Liquid and decreased the Volatile Materials (MV) of the thrush, while in the aroeira increased the Basic Density and MV, with a decrease in gravimetric yield. The application of wastewater improved the fertility of degraded soil, which was reflected in biomass production and can contribute to the sustainability and food security of family agricultural systems in the Brazilian semi-arid.

Keywords: wastewater; fertility; environmental degradation; reuse; agroforestry.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura 1.** Mapa de localização do município do estudo (Campina Grande), região semiárida, estado da Paraíba, Brasil..... 24
- Figura 2.** Estação de tratamento primário e secundário de esgoto da sede do Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande, Paraíba. Fonte: INSA. 26
- Figura 3.** Volume de precipitação e temperatura no município de Campina Grande, PB, durante o período da realização do experimento. 27
- Figura 4.** Condutividade Elétrica (CE) do solo nos três tratamentos de irrigação (AB_{0,5}: água de abastecimento no volume de 0,5 L/planta/semana; ET_{0,5}: efluente tratado no volume de 0,5 L/planta/semana e ET₁: efluente tratado no volume de 1 L/planta/semana) e na condição inicial (CI), após dois anos com irrigação nas profundidades de 0 – 15 (A) e 15 – 30cm (C) e após dois anos da interrupção da irrigação nas profundidades de 0 – 15 (B) e 15 – 30cm (D). Para cada profundidade, médias seguidas da mesma letra minúscula, e entre períodos, maiúsculas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Médias seguidas de ^{ns} não se diferem do tratamento de referência (Condição inicial – T0) pelo teste de Dunnet ao nível de 5% de significância em cada período e profundidade. 34
- Figura 5.** Porcentagem de Sódio Trocável (PST) nos três tratamentos de irrigação (AB_{0,5}: água de abastecimento no volume de 0,5 L/planta/semana; ET_{0,5}: efluente tratado no volume de 0,5 L/planta/semana e ET₁: efluente tratado no volume de 1 L/planta/semana) e na condição inicial (CI), após dois anos com irrigação nas profundidades de 0 – 15 (A) e 15 – 30cm (C) e após dois anos da interrupção da irrigação nas profundidades de 0 – 15 (B) e 15 – 30cm (D). Para cada profundidade, médias seguidas da mesma letra minúscula, e entre períodos, maiúsculas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Médias seguidas de ^{ns} não se diferem do tratamento de referência (Condição inicial) pelo teste de Dunnet ao nível de 5% de significância em cada período e profundidade. 35
- Figura 6.** Difratometria de raios-X da fração argila de solo degradado, na condição inicial (CI), após dois anos de irrigação com efluente tratado (Com Efluente) e após dois anos da suspensão da irrigação com efluente tratado (Sem Efluente). 2:1: minerais 2:1; Ct: caulinita; Gt: goethita; Mi: mica..... 39

CAPÍTULO II

Figura 1. Mapa de localização do município do estudo (Campina Grande), região semiárida, estado da Paraíba, Brasil.....	51
Figura 2. Volume de precipitação e temperatura no município de Campina Grande, PB, durante o período da realização do experimento.	51

CAPÍTULO III

Figura 1. Volume de precipitação e temperatura durante o período da realização do experimento no Semiárido paraibano - BR.	74
Figura 2. Curva de crescimento da altura da Sabiá (A) e Aroeira (B) submetida a tratamentos de irrigação com água de abastecimento (AB _{0,5} - 0,5L) e reúso (ET _{0,5} - 0,5 L e ET ₁ - 1L) em um solo degradado, no Semiárido brasileiro.	76
Figura 3. Curva de crescimento do Diâmetro Altura do Peito (DAP) da Sabiá (A) e Aroeira (B) submetidas a tratamentos de irrigação com água de abastecimento (AB _{0,5} - 0,5L) e reúso (ET _{0,5} - 0,5 L e ET ₁ - 1L) em um solo degradado, no Semiárido brasileiro.	77
Figura 4. Curva de crescimento do Diâmetro na Base do Caule (DBC) da Sabiá (A) e Aroeira (B) submetidas a tratamentos de irrigação com água de abastecimento (AB _{0,5} - 0,5L) e reúso (ET _{0,5} - 0,5 L e ET ₁ - 1L) em um solo degradado, no Semiárido brasileiro.	78
Figura 5. Incremento Médio Anual (IMA) do Sabiá (A) e Aroeira (B) submetidas a tratamentos de irrigação com água de reúso e abastecimento em um solo degradado no Semiárido brasileiro.	80

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1. Caracterização química da água de abastecimento e da água residuária tratada utilizada na irrigação de um solo degradado, no município de Campina Grande, PB.	25
Tabela 2. Teores de macro e micronutrientes e fertilidade do solo na condição inicial, após dois anos consecutivos de irrigação com efluente tratado e água de abastecimento e após dois anos da interrupção da irrigação em solo degradado do Semiárido.....	30
Tabela 3. Aporte de nutrientes aplicados em dois tipos de água e diferentes lâminas de irrigação durante 2 anos (2013 – 2015).	33
Tabela 4. Teores totais de elementos maiores (%) das frações Areia, silte e argila do solo na Condição Inicial (CI), após dois anos com irrigação de efluente tratado (2CE) e após dois anos sem irrigação com efluente tratado (2SE).	38

CAPÍTULO II

Tabela 1. Caracterização química da água de abastecimento e da água residuária tratada, utilizada na irrigação de um solo degradado, no município de Campina Grande, PB.	52
Tabela 2. Médias (n=10) e desvio padrão da caracterização química de um solo degradado após dois anos consecutivos de irrigação, seguido por dois anos de interrupção dos tratamentos de irrigação, no município de Campina Grande, PB.....	56
Tabela 3. Contrastes ortogonais e valores médios para produtividade da matéria fresca (PMF) e da matéria seca (PMS), e teor de água dos cladódios (TAC) da palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana submetida a tratamentos de irrigação com água de reúso e abastecimento (ciclos 1º e 2º) e sem irrigação (ciclos 3º e 4º) no Semiárido brasileiro.....	57
Tabela 4. Contrastes ortogonais e valores médios (n=20) das variáveis biométricas da palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana submetida a tratamentos de irrigação com água de reúso (ET0,5 e ET1) e abastecimento (AB0,5) (ciclos 1 e 2) e sem irrigação (ciclos 3 e 4) no Semiárido brasileiro.	61
Tabela 5. Contrastes ortogonais e valores médios da produtividade da água da cultura (PAC) em base fresca e seca, e produtividade econômica da água (PEA) com base na irrigação + precipitação da palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana submetida a tratamentos de irrigação com água de reúso e abastecimento (ciclos 1º e 2º) e sem irrigação (ciclos 3º e 4º) no Semiárido brasileiro.....	62

CAPÍTULO III

Tabela 1. Caracterização química do solo degradado antes da aplicação dos tratamentos com água residuária tratada, nas camadas 0 – 15 e 15 – 30 cm, no Semiárido paraibano -BR.	72
Tabela 2. Caracterização química da água de abastecimento e da água residuária tratada utilizada na irrigação de um solo degradado, no município de Campina Grande, PB.	73
Tabela 3. Altura da Planta (ALT), Diâmetro Altura do Peito (DAP), Diâmetro na Base do Caule (DBC) e Volume Total (VT) da Sábia e Aroeira aos 4 anos irrigadas com água de reúso (ET ₁ e ET _{0,5}) e água de abastecimento (AB _{0,5}), em um solo degradado no Semiárido brasileiro	79
Tabela 4. Contrastes ortogonais e valores médios das características energéticas da madeira em Densidade Básica (DB), Rendimento Gravimétrico (RG), Rendimento em Líquido Condensado (RLC) e Materiais Voláteis (MV) de duas espécies arbóreas irrigadas com água de reúso e água de abastecimento em um solo degradado no Semiárido brasileiro.....	81

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
REFERENCIAS	17
CAPÍTULO I	20
ÁGUA RESIDUÁRIA TRATADA E SEU EFEITO RESIDUAL NA QUÍMICA E MINERALOGIA DE SOLO DEGRADADO NO SEMIÁRIDO.....	20
RESUMO.....	20
ABSTRACT	21
1 INTRODUÇÃO	22
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	23
2.1 Descrição da área de estudo.....	23
2.2 Caracterização do solo.....	24
2.3 Descrição experimental	24
2.4 Amostragem e análise do solo	27
2.5 Fluorescência e Difractometria de Raios-X.....	28
2.6 Análise estatística	28
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
3.1 Atributos químicos do solo.....	28
3.2 Salinidade e sodicidade do solo.....	33
3.3 Geoquímica e mineralogia do solo.....	37
4 CONCLUSÃO	40
REFERENCIAS	41
CAPÍTULO II.....	47
PRODUÇÃO DE FORRAGEM, EFICIÊNCIA DO USO DE ÁGUA E QUÍMICA DE UM SOLO DEGRADADO SOB IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA COM EFLUENTE TRATADO.....	47
RESUMO.....	47
ABSTRACT	48
1 INTRODUÇÃO	49
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	50
2.1 Caracterização da área experimental	50
2.2 Descrição experimental	51
2.3 Amostragem e análise do solo	53
2.4 Variáveis analisadas	54
2.5 Análise estatística	55
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55

4	CONCLUSÕES	64
5	AGRADECIMENTOS.....	64
	REFERÊNCIAS	64
	CAPÍTULO III	69
	CRESCIMENTO E CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DA MADEIRA DE	
	ARBÓREAS IRRIGADAS COM ÁGUA RESIDUÁRIA EM SOLO DEGRADADO	
	DO SEMIÁRIDO.....	69
	RESUMO.....	69
	ABSTRACT	70
1	INTRODUÇÃO	71
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	72
2.1	Caracterização da área experimental	72
2.2	Descrição e delineamento experimental.....	72
2.3	Análise estatística	75
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4	CONCLUSÕES.....	82
	REFERENCIAS	83

INTRODUÇÃO GERAL

A degradação dos solos, aliada a escassez hídrica, é um problema de relevância global, visto que água e solo são dois dos recursos mais básicos para a produção de alimento e qualidade do ambiente. Aproximadamente 33% dos solos em todo o mundo apresentam algum nível de degradação (FAO, 2017). Aliado a isto, estima-se que a população mundial será de 9 bilhões até 2050 (Hernández-Sancho et al. 2015), o que aumentará a demanda sobre os recursos hídricos e a produção de alimentos. O cenário de mudanças climáticas agrava esses problemas, pois projeta-se para as próximas décadas eventos extremos como períodos de seca mais prolongados, principalmente em regiões áridas e semiáridas do mundo. Este panorama exige a expansão da agricultura em direção a terras marginais e degradadas, que podem ajudar a aumentar a oferta de alimentos, evitando a degradação ambiental e da terra (Fargione et al., 2008; Hussain et al. 2019). Nesse sentido, a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável definiu como objetivos, dentre outras coisas, aumentar a produtividade agrícola e fortalecer a capacidade de adaptação às mudanças climáticas e à seca, reciclar e reutilizar as águas residuais e evitar a contaminação da água e do solo (UN General Assembly, 2015).

O semiárido brasileiro (SAB), localiza-se na região Nordeste e parte do Sudeste do Brasil, representando cerca de 12% do território nacional, o qual conta com alta densidade demográfica, com um total de 1.262 municípios e mais de 27,8 milhões de habitantes (Silva et al. 2020). Em contrapartida, em toda região Nordeste apenas 38% do esgoto gerado recebe tratamento e, especificamente no semiárido, é gerado anualmente um montante de cerca de 423 milhões m³ de esgoto, os quais são descartados no ambiente (Medeiros et al. 2014). Cabe destacar ainda que, 38% da população do SAB é da zona rural e a atividade agrícola é, majoritariamente, de base familiar com baixo nível tecnológico e poder econômico (Medeiros et al. 2014).

O setor agrícola é o maior consumidor de recursos hídricos, consumindo mais de 70% da água disponível (Sato et al. 2013). A atividade agrícola tolera o uso de água com qualidade inferior àquela exigida para fins residenciais, o que torna o reúso da água para irrigação uma prática de gestão importante para reduzir a pressão sobre os recursos hídricos e por isso vem sendo cada vez mais adotada ao redor do mundo (Hussain et al. 2019). O efluente de esgoto tratado, usado na irrigação, pode representar uma alternativa para conservar a água disponível de boa qualidade (Elfanssi et al., 2018; Ungureanu et al., 2020) e na recuperação de solos degradados (Hussain et al., 2019), podendo se refletir em aumento da produtividade agrícola

em solos marginais. Os efeitos potenciais do reúso de efluente tratado podem ser de ordem química, física e biológica, uma vez que o efluente aporta matéria orgânica (Bedbabis et al. 2015; Irandoust e Tabriz, 2017; Martins et al., 2019) e nutrientes ao solo (Musazura et al., 2019). Esses efeitos são especialmente atrativos para agricultores familiares por diminuírem a necessidade do uso de fertilizantes (Tahtouh et al. 2019). Além disso, o uso de efluente na irrigação contribui para a conservação da água disponível e para minimizar as descargas de esgoto nos corpos de água, contribuindo para a conservação do ambiente (Oliveira et al. 2016).

A prática da irrigação com água residuária também pode gerar diversos impactos negativos, levando risco a qualidade ambiental e saúde humana, como resultado de possíveis componentes microbianos e tóxicos, sendo um sério obstáculo para a reutilização de águas residuais na agricultura (Elgallal et al. 2016). A depender da fonte e grau de tratamento, a água de reúso tem vários tipos e concentrações de contaminantes. Em geral, os problemas críticos em relação aos riscos químicos da reutilização de águas residuais para irrigação são as altas concentrações de sais, metais pesados, nutrientes, compostos orgânicos tóxicos e a matéria orgânica (Qadir et al., 2015).

Tem crescido o número de pesquisas sobre o manejo de irrigação com foco em temas como o uso eficiente da água, irrigação deficitária, economia da irrigação, irrigação eficiente etc. (p. ex. Ding et al., 2020; Saitta et al., 2021; Zhou et al., 2021; Zhang et al., 2021). Além da economia de água, o manejo deficitário da irrigação (subirrigação) com efluente tratado, pode ser uma boa medida, pois reduz o risco de contaminação química do solo pelo efluente, diminuindo seus possíveis efeitos deletérios nos sistemas agrícolas e aumentando a eficiência do seu uso.

A presente pesquisa tem como hipóteses: I) a irrigação deficitária com efluente de esgoto tratado, irá promover aporte de nutrientes e matéria orgânica suficientes para melhorar a fertilidade, acarretar possíveis modificações geoquímicas e mineralógicas e gerar efeito residual em um solo degradado; II) a produção de biomassa e eficiência no uso da água pela palma forrageira aumenta com irrigação deficitária de efluente tratado e; III) o crescimento e produtividade aumentarão, e as características energéticas da madeira de espécies florestais nativas do semiárido, serão melhoradas pela irrigação deficitária com efluente de esgoto tratado.

Dessa forma, o objetivo da presente pesquisa foi avaliar o efeito da irrigação deficitária com efluente de esgoto tratado, aplicado por dois anos consecutivos e após sua suspensão por dois anos, nos atributos químicos e mineralógicos do solo, produção de biomassa e eficiência no uso da água pela cultura da palma forrageira, crescimento e características energéticas da madeira em um sistema agroflorestal em área degradada no semiárido brasileiro.

REFERENCIAS

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

DING, Z.; KHEIR, A. M.; ALI, M. G.; ALI, O. A.; ABDELAAL, A. I.; ZHOU, Z.; WANG, B.; LIU, B.; HE, Z. The integrated effect of salinity, organic amendments, phosphorus fertilizers, and deficit irrigation on soil properties, phosphorus fractionation and wheat productivity. **Scientific reports**, 10(1), 1-13, 2020.

ELFANSSI, SALOUA; OUAZZANI, NAAILA; MANDI, LAILA. Soil properties and agro-physiological responses of alfalfa (*Medicago sativa* L.) irrigated by treated domestic wastewater. **Agricultural water management**, 2018, 202: 231-240.

ELGALLAL, M.; FLETCHER, L.; EVANS, B. Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: A review. **Agricultural Water Management**, 177, 419-431, 2016.

FAO – Food and Agriculture Organization. Directrices voluntarias para la gestión sostenible de los suelos. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. ITPS, Roma, Italia. 2017. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i6874s.pdf>

FARGIONE, J.; HILL, J.; TILMAN, D.; POLASKY, S.; HAWTHORNE, P. Land clearing and the biofuel carbon debt. **Science** 319, 1235e1238, 2008.

HERNÁNDEZ-SANCHO, F.; LAMIZANA-DIALLO, B.; MATEO-SAGASTA, J.; QADIR, M. Economic valuation of wastewater: the cost of action and the cost of no action. United Nations Environment Programme (UNEP), 2015.

HUSSAIN, M. I.; MUSCOLO, A.; FAROOQ, M.; AHMAD, W. Sustainable use and management of non-conventional water resources for rehabilitation of marginal lands in arid and semiarid environments. **Agricultural water management**, 221, 462-476, 2019.

IRANDOUST, M.; TABRIZ, A. S. The effect of municipal wastewater on soil chemical properties. **Solid Earth Discussions**, 1-13, 2017.

MARTINS, E. L.; SILVA SOUZA, R. F.; SILVA FRAGA, V.; SOUSA MEDEIROS, S. Effects of Treated Wastewater on Soil Recovery in Degraded Semiarid Region. **Journal of Experimental Agriculture International**, 1-7, 2019.

MEDEIROS, S. S.; CAVALCANTE, A. M. B.; MARIN, A. M. P.; TINOCO, L. B. M.; SALCEDO, I. H.; PINTO, T. F. Sinopse do censo demográfico para o Semiárido brasileiro. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2012. v. 1. 103p.

MEDEIROS, S. S.; SALCEDO, I. H.; SANTOS, D. B.; BATISTA, R. O.; SANTOS JUNIOR, J. A.; LIMA, R. C. C.; PEREZ-MARIN, A. M. Esgotamento Sanitário: Panorama para o Semiárido Brasileiro. 1. ed. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2014. v. 1. 63p.

MUSAZURA, W.; ODINDO, A. O.; TESFAMARIAM, E. H.; HUGHES, J. C.; BUCKLEY, C. A. (2019). Nitrogen and phosphorus dynamics in plants and soil fertigated with decentralised wastewater treatment effluent. **Agricultural Water Management**, 215, 55-62.

OLIVEIRA, P. C. P. D.; GLOAGUEN, T. V.; GONÇALVES, R. A. B.; SANTOS, D. L.; COUTO, C. F. Soil chemistry after irrigation with treated wastewater in semiarid climate. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 40, 2016.

QADIR, M.; MATEO-SAGASTA, J.; JIMÉNEZ, B.; SIEBE, C.; SIEMENS, J.; HANJRA, M.A. Environmental risks and cost-effective risk management in wastewater usesystems. In: Drechsel, P., Qadir, M., Wichelns, D. (Eds.), *Wastewater: Economic Asset in an Urbanizing World*. Springer, 2015.

SAITTA, D.; CONSOLI, S.; FERLITO, F.; TORRISI, B.; ALLEGRA, M.; LONGO-MINNOLO, G.; VANELLA, D. Adaptation of citrus orchards to deficit irrigation strategies. **Agricultural Water Management**, 247, 106734, 2021.

SATO, T.; QADIR, M.; YAMAMOTO, S.; ENDO, T.; ZAHOOR, A. Global, regional, and country level need for data on wastewater generation, treatment, and use. **Agricultural Water Management**, 130, 1-13, 2013.

SILVA, R. M. A.; AQUINO, J. R.; COSTA, F. B.; NUNES, E. M. Características produtivas e socioambientais da agricultura familiar no Semiárido brasileiro: evidências a partir do Censo Agropecuário de 2017. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*, 55. 2020.

TAHTOUH, J.; MOHTAR, R.; ASSI, A.; SCHWAB, P.; JANTRANIA, A.; DENG, Y.; MUNSTER, C. Impact of brackish groundwater and treated wastewater on soil chemical and mineralogical properties. **Science of the total environment**, 647, 99-109, 2019.

UN General Assembly. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations New York, New York, 2015.

UNGUREANU, N.; VLĂDUȚ, V.; VOICU, G. Water Scarcity and Wastewater Reuse in Crop Irrigation. **Sustainability**, 12(21), 9055, 2020.

ZHANG, J.; ZHANG, H.; SIMA, M. W.; TROUT, T. J.; MALONE, R. W.; WANG, L. Simulated deficit irrigation and climate change effects on sunflower production in Eastern Colorado with CSM-CROPGRO-Sunflower in RZWQM2. **Agricultural Water Management**, 246, 106672, 2021.

ZHOU, Q.; ZHANG, Y.; WU, F. Evaluation of the most proper management scale on water use efficiency and water productivity: A case study of the Heihe River Basin, China. **Agricultural Water Management**, 246, 106671, 2021.

CAPÍTULO I

ÁGUA RESIDUÁRIA TRATADA E SEU EFEITO RESIDUAL NA QUÍMICA E MINERALOGIA DE SOLO DEGRADADO NO SEMIÁRIDO

RESUMO

A recuperação de solos degradados é estratégica no contexto de crescimento na demanda por alimento e mudanças climáticas, principalmente em regiões semiáridas de países em desenvolvimento. O reúso de efluente de esgoto tratado para irrigação tem potencial para causar efeitos positivos ou negativos nos sistemas agrícolas, causando alterações que podem ser significativas no solo. Por outro lado, poucos estudos foram dedicados as alterações na mineralogia e seus possíveis reflexos na química dos solos sob aplicação de efluentes tratados, não havendo registro desses para os solos da região semiárida brasileira. Dessa maneira, o objetivo da pesquisa foi avaliar o efeito da irrigação deficitária, com efluente tratado, aplicado por dois anos consecutivos e após sua suspensão por dois anos, na química, geoquímica e mineralogia de um solo degradado no semiárido. Para tanto, foi realizado um experimento em campo, em um solo degradado pela retirada das camadas superficiais, sob sistema agroflorestal com consórcio de duas espécies florestais e a palma forrageira. Os tratamentos foram dispostos em blocos casualizados com 10 repetições, sendo estes: AB_{0,5} – água de abastecimento no volume de 0,5 L planta/semana; ET_{0,5} – efluente tratado no volume de 0,5 L planta/semana e; ET₁ – efluente tratado no volume de 1 L planta/semana. Estes tratamentos foram aplicados durante dois anos consecutivos (2013 à 2015) e interrompidos nos anos posteriores (2015 à 2017). Amostras de solo foram coletadas na condição inicial (antes do início do experimento), ao final de dois anos da irrigação (junho de 2015) e ao final de dois anos da interrupção dos tratamentos de irrigação (junho de 2017). Foram realizadas análises químicas (pH, COT, P, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Al³⁺, H+Al e calculados os índices de fertilidade), geoquímica (teores totais dos elementos maiores) e mineralógicas nas amostras de solo. Todos os tratamentos de irrigação aumentaram substancialmente a fertilidade (V%) do solo degradado, no entanto, o efluente tratado, na lâmina de 1 L/planta/semana, resultou em fertilidade mais alta ao final de dois anos de aplicação comparado aos tratamentos de menor volume. Dois anos após a suspensão dos tratamentos de irrigação o efeito residual do período irrigado manteve o status da fertilidade significativamente maior comparado a condição inicial. A salinidade do solo aumentou no período irrigado e diminuiu após a suspensão da irrigação, sem apresentar risco de salinização. Entretanto, ao final do experimento foi observado incipiente processo de solodização. A aplicação do efluente tratado alterou os teores dos elementos maiores das frações silte e argila, com evidências de formação de ilita na argila. Esse processo de formação de minerais com maior capacidade de retenção de cátions e de água beneficia a fertilidade do solo e contribui para sustentabilidade e segurança alimentar dos sistemas agrícolas familiares no semiárido brasileiro.

Palavras-chave: Água residuária, Geoquímica, Fertilidade do solo.

DOMESTIC EFFLUENT AND ITS RESIDUAL EFFECT ON CHEMISTRY AND MINERALOGY OF DEGRADED SOIL IN SEMI-ARID

ABSTRACT

The recovery of degraded soils is strategic in the context of growth in demand for food and climate change, especially in semi-arid regions of developing countries. The reuse of sewage effluent treated for irrigation has the potential to cause positive or negative effects on agricultural systems, causing changes that may be significant in the soil. On the other hand, few studies have been dedicated to changes in mineralogy and its possible reflexes in soil chemistry under application of treated effluents, with no record of these for soils in the Brazilian semiarid region. Thus, the objective of the research was to evaluate the effect of deficient irrigation, with treated effluent, applied for two consecutive years and after its suspension for two years, on the chemistry, geochemistry and mineralogy of a degraded soil in the semi-arid region. For this, a field experiment was carried out in a soil degraded by the removal of the surface layers, under agroforestry system with intercropping of two forest species and the forage palm. The treatments were arranged in randomized blocks with 10 replications, which were: AB_{0.5} – water supply at the volume of 0.5 L plant/week; ET_{0.5} - effluent treated in the volume of 0.5 L plant/week and; ET₁ - effluent treated in the volume of 1 L plant/week. These treatments were applied for two consecutive years (2013 to 2015) and discontinued in the years after (2015 to 2017). Soil samples were collected in the initial condition (before the beginning of the experiment), at the end of two years of irrigation (June 2015) and at the end of two years of interruption of irrigation treatments (June 2017). Chemical analyses (pH, TOC, P, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Al³⁺, H+Al and fertility indices were calculated and fertility indices were calculated, geochemical (total contents of the major elements) and mineralogical analyses in the soil samples. All irrigation treatments substantially increased fertility (V%) degraded soil, however, the treated effluent, in the 1 L/plant/week lamina, resulted in higher fertility at the end of two years of application compared to the lower volume treatments. Two years after the suspension of irrigation treatments, the residual effect of the irrigated period maintained significantly higher fertility status compared to the initial condition. Soil salinity increased in the irrigated period and decreased after the suspension of irrigation, without presenting a risk of salinization. However, at the end of the experiment, an incipient soloization process was observed. The application of the treated effluent changed the contents of the major elements of the silt and clay fractions, with evidence of the formation of illite in the clay. This process of formation of minerals with greater cation and water retention capacity benefits soil fertility and contributes to the sustainability and food security of family agricultural systems in the Brazilian semi-arid.

Keywords: Wastewater, Geochemistry, Soil fertility.

1. INTRODUÇÃO

Áreas marginais, com solos degradados, aumentam cada vez mais ao redor do mundo e ganham atenção pelo seu impacto na segurança alimentar e qualidade ambiental, principalmente em regiões semiáridas de países em desenvolvimento. A degradação de terras secas resulta de vários fatores, entre eles a variação climática e as atividades humanas (ONU, 1994; Eni, 2012). Os solos perdem a capacidade de suporte vegetal (Pluer et al. 2020), reflexo de distúrbios de ordem química, física e biológica, em decorrência dos diversos tipos de degradação. O conceito de resiliência desses solos, com vistas a recuperação dos seus serviços ambientais e produtividade agrícola, é imprescindível, no entanto, revela-se como um desafio em contexto de escassez hídrica (Hussain et al., 2019).

O efluente de esgoto tratado, usado na irrigação, pode representar uma alternativa para preservar a água disponível de boa qualidade (Elfanssi et al., 2018; Ungureanu et al., 2020) e na recuperação de solos degradados (Hussain et al., 2019), podendo se refletir em aumento da produtividade agrícola em solos degradados. Os efeitos do reúso de efluente tratado, quando bem manejada na irrigação, incluem o aporte e reciclagem da matéria orgânica (Irandoost e Tabriz, 2017; Martins et al., 2019) e de nutrientes no solo (Musazura et al., 2019), o que é especialmente atrativo para agricultores familiares por substituir ou diminuir a necessidade do uso de fertilizantes minerais (Tahtouh et al. 2019). Além disso, conserva a água disponível e minimiza as descargas de esgoto nos corpos de água, corroborando a conservação do ambiente (Oliveira et al. 2016).

Apesar do potencial benéfico da aplicação de efluente no solo, seu manejo inadequado pode gerar riscos como o excesso de concentração de sal, metais pesados, nutrientes, compostos orgânicos tóxicos e de matéria orgânica (Qadir et al., 2015) podendo acarretar efeitos deletérios e afetar a qualidade do ambiente e por consequência a saúde humana (Dickin et al., 2016; Odoemena et al., 2020). Os efeitos da aplicação de águas residuárias na agricultura dependem de diversos fatores, como a fonte da água, seu nível de tratamento, volume aplicado, condições climáticas e das propriedades do solo (Elgallal et al. 2016).

Diversas pesquisas têm sido realizadas, com aumento considerável nas últimas décadas, sobre os efeitos da aplicação da água residuária, no entanto, poucas tem se dedicado aos efeitos na mineralogia dos solos (Tahtouh et al. 2019). De acordo com Marchuk et al. (2016), a aplicação de águas residuárias ricas em potássio, em solos de argila 2:1, pode acarretar mudanças mineralógicas no solo, como a ilitização, que podem ocorrer em curto espaço de tempo. Por outro lado, alguns estudos não encontraram efeitos significativos na composição da

mineralogia do solo como resultado da irrigação de longo prazo com água residuária tratada (Tarchouna et al., 2010; Rezapour e Samadi, 2011).

Os raros trabalhos dedicados a mineralogia do solo sob aplicação com água residuária foram realizados considerando aplicação de longo prazo (e.g. Van Oort et al. 2017; Tahtouh et al. 2019). Ainda não foram documentados trabalhos com o efeito de água residuária na mineralogia de solos da região semiárida do Brasil. Dessa forma, torna-se importante a geração dessas informações para apoiar tomadores de decisão na formulação de políticas públicas relativas ao uso de efluente tratado.

Diante do exposto, a hipótese da pesquisa é que, mesmo com aplicação deficitária de efluente de esgoto tratado, o aporte de nutrientes e matéria orgânica será suficiente para melhorar a fertilidade e promover alterações geoquímicas e mineralógicas em um solo degradado. Dessa forma, o objetivo da pesquisa foi avaliar o efeito da irrigação deficitária, com efluente tratado, aplicado por dois anos consecutivos e após sua suspensão por dois anos, na química, geoquímica e mineralogia de um solo degradado no semiárido.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Descrição da área de estudo

O estudo foi conduzido na área experimental do Instituto Nacional do Semiárido (INSA) em Campina Grande, estado da Paraíba-Brasil (7°15'11"S a 7°15'13"S e 35°56'49"W a 35°56'51"W; 556 m) (Figura 1). O clima da região é classificado como As' pela classificação de Köppen, caracterizado como quente e úmido com regime pluviométrico irregular e longo período de estiagem (Alvares et al., 2013). A temperatura do ar varia entre a máxima anual de 28,6°C e a mínima 19,5 °C e a umidade relativa com média em torno de 80%.

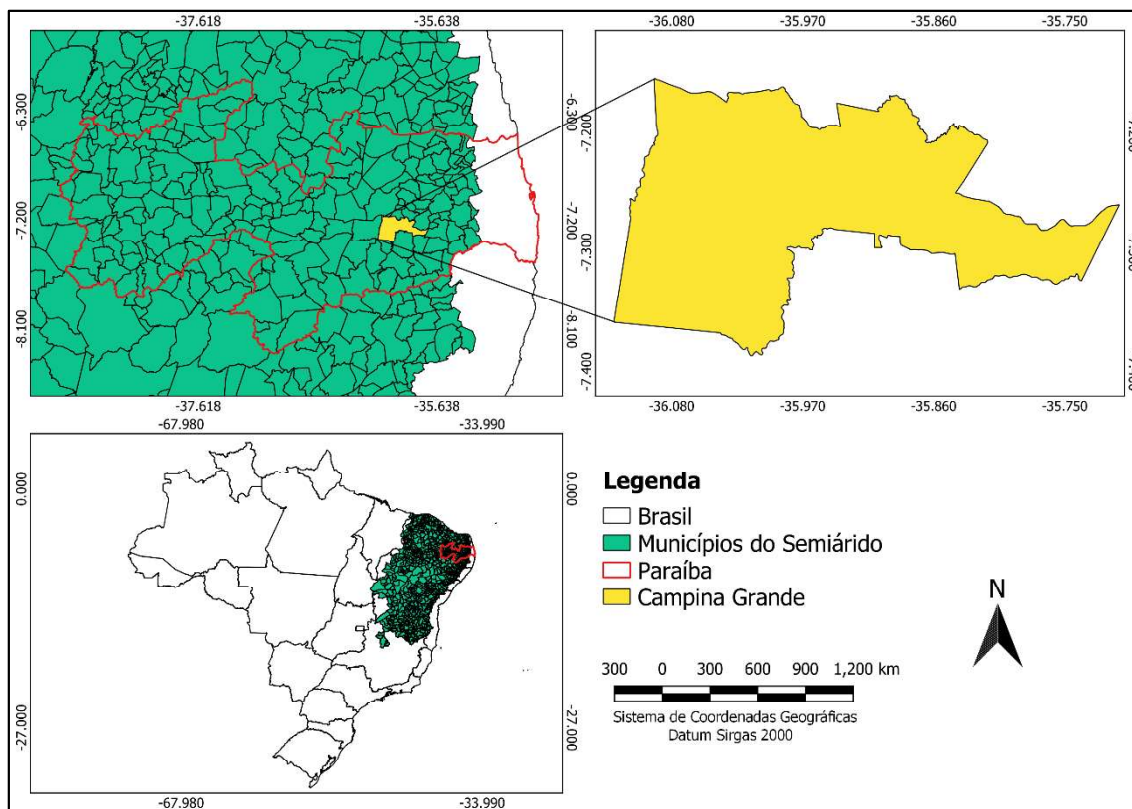


Figura 1. Mapa de localização do município do estudo (Campina Grande), região semiárida, estado da Paraíba, Brasil.

2.2. Caracterização do solo

A geologia pertence ao complexo São Caetano, constituído por gnaiss, megacristalinos, metavulcânica félsica a intermediária (Beltrão et al., 2005), e compostas por muscovita-biotita gnaiss às vezes granodífero, biotita gnaiss, muscovita xisto, incluindo calcário cristalino, quartzito e metavulcanoclástica (CPRM, 2002). O relevo local suavemente ondulado contribui para o predomínio de Planossolos Nátricos (Campos e Queiroz, 2006). Na área do experimento os seus horizontes superficiais do solo foram removidos pela construção civil, tendo, dessa forma, sofrido processo de “truncamento” que expôs os horizontes subsuperficiais. O solo apresenta como principais características pedregosidade e pouca profundidade. A granulometria foi realizada conforme (Teixeira et al. 2017) e a textura foi classificada como “franco arenosa” (Areia = 716 g kg⁻¹; Silte = 150 g kg⁻¹; Argila = 134 g kg⁻¹)

2.3. Descrição experimental

O experimento foi implantado numa área de 780 m² em delineamento de blocos casualizados com três tratamentos de irrigação e dez repetições. Os tratamentos foram: AB_{0,5} – água de abastecimento no volume de 0,5 L planta/semana, que representa 10% da evapotranspiração de referência (ET₀); ET_{0,5} – efluente tratado no volume de 0,5 L

planta/semana, representando 10% da evapotranspiração de referência (ET₀) e; ET₁ – efluente tratado no volume de 1 L planta/semana, representando 20% da evapotranspiração de referência (ET₀). Foi utilizada a água do sistema de abastecimento do INSA, proveniente da captação de água da chuva, e a água de reúso derivada do esgoto gerado nas dependências da sede administrativa do INSA a qual conta com banheiros e copas (Tabela 1). O esgoto passou por tratamento primário e secundário na estação de tratamento de efluentes do INSA, o qual consiste numa sequência de tanques de filtragem, e depois por cisterna séptica para sedimentação (Figura 2), para em seguida ser bombeada usando sistema de irrigação localizada do tipo gotejamento autocompensantes. Com base nas características químicas dos dois tipos de água usadas no experimento, foi estimado o aporte de nutrientes ao solo via tratamentos de irrigação.

Tabela 1. Caracterização química da água de abastecimento e da água residuária tratada utilizada na irrigação de um solo degradado, no município de Campina Grande, PB.

Parâmetro	Unidade	Água	
		Abastecimento	Residuária
pH	-	7,5	8,3
CE	dS m ⁻¹	0,79	1,35
COT	mg L ⁻¹	1,72	3,7
N	mg L ⁻¹	0,28	26,3
NH ₄ ⁺	mg L ⁻¹	-	22,3
NO ₂ ³⁻	mg L ⁻¹	-	4,5
P	mg L ⁻¹	1,68	14
PO ₄ ³⁻	mg L ⁻¹	-	9,4
K ⁺	mg L ⁻¹	5,4	27,6
Ca ⁺²	mg L ⁻¹	11,2	24,5
Mg ⁺²	mg L ⁻¹	6,4	10,7
SO ₄ ³⁻	mg L ⁻¹	-	51,9
Na ⁺	mg L ⁻¹	9,1	22,3
Cl ⁻	mg L ⁻¹	178	270

CE, condutividade elétrica; COT, carbono orgânico total; N, nitrogênio total; NH₄⁺, nitrogênio amoniacal; NO₃⁻, nitratos; P, fósforo total; PO₄³⁻, fosfatos; K⁺, potássio; Ca⁺², cálcio; Mg⁺², magnésio; SO₄³⁻, sulfatos; Na⁺, sódio, Cl⁻, cloro.

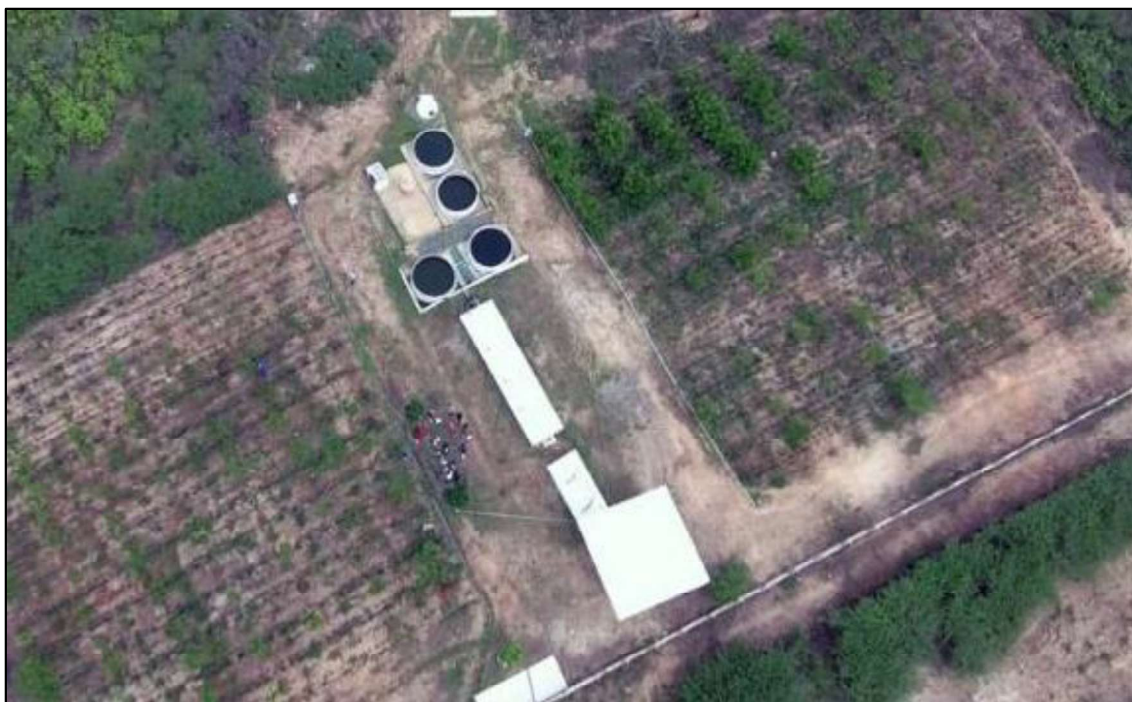


Figura 2. Visão panorâmica da estação de tratamento primário e secundário de esgoto da sede do Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande, Paraíba. Fonte: INSA.

Na área do estudo foram plantados cladódios de palma forrageira (*Opuntia stricta*) cultivar “Orelha de elefante mexicana” em fileira dupla, no espaçamento de 0,5 x 0,5 x 1,5 m, resultando em uma densidade de 20.000 plantas por hectare com cortes realizados anualmente. A palma foi plantada em consórcio com mudas de 2 espécies nativas da Caatinga com potencial madeireiro, a saber: Sabiá (*Mimosa caesalpinifolia*) e Aroeira-Branca (*Astroium urundeuva* Allemão), as quais foram dispostas alternadamente em espaçamento 2 x 2 m entre as fileiras das palmas, constituindo um sistema agroflorestal. Os blocos possuem 45 m² e são constituídos por três fileiras duplas de palma forrageira e três fileiras de arbóreas, cada uma correspondente a um tratamento de irrigação. Os tratamentos de irrigação foram aplicados entre junho de 2013 e junho de 2015 com uma lâmina total de irrigação de 52,8 mm no AB_{0,5} e ET_{0,5} e 76 mm no ET₁, com precipitação total de 748 mm (Figura 2). Nos dois anos seguintes (jun/2015 a jul/2017) os tratamentos foram suspensos, com um total de precipitação de 934 mm (Figura 2).

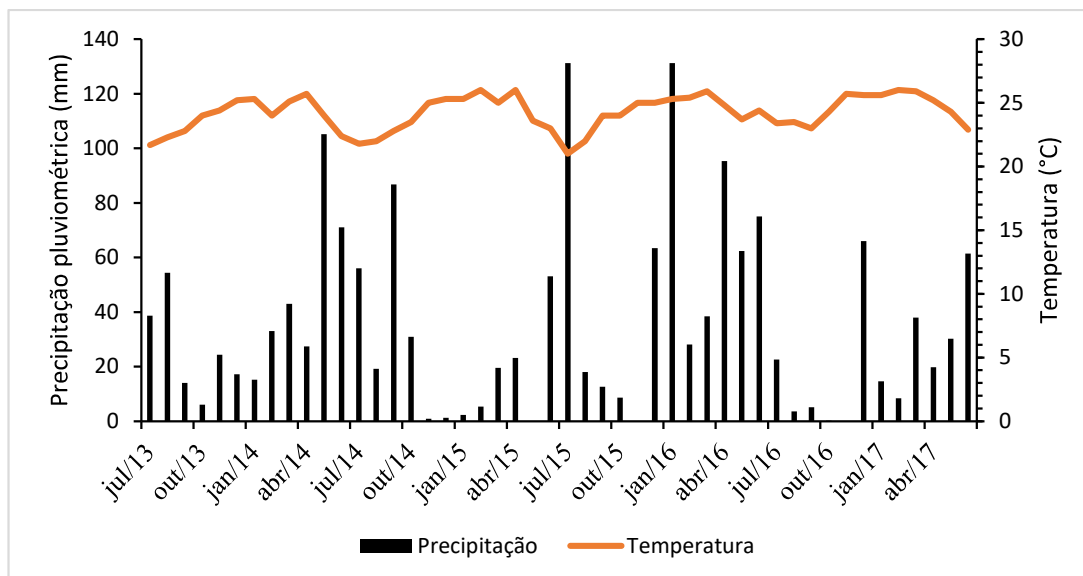


Figura 3. Volume de precipitação e temperatura no município de Campina Grande, PB, durante o período da realização do experimento.

2.4. Amostragem e análise do solo

O solo foi coletado na condição inicial (antes do início do experimento), ao final de dois anos da irrigação (junho de 2015) e ao final dos dois anos da interrupção dos tratamentos de irrigação (junho de 2017). Foram coletadas 60 amostras de solo, sendo 30 na profundidade de 0 – 15 cm e 30 na profundidade de 15 – 30 cm, logo abaixo dos gotejadores das fileiras duplas da palma forrageira, sempre após a colheita da palma forrageira. Todas as amostras de solo foram secas ao ar, peneiradas em malha 2 mm e foram analisadas quanto aos atributos químicos conforme normas constantes em Teixeira et al. (2017). O pH do solo foi determinado em água na proporção de 1:2,5 (sólido: líquido). A condutividade elétrica (CE) do solo foi medida em extrato de pasta saturada. O Ca^{2+} e Mg^{2+} foram extraídos com solução de cloreto de potássio (1M KCl) e determinados por espectrofotômetro de absorção atômica (AAS); P, K^+ , Na^+ foram extraídos com solução Mehlich-1. O P disponível foi determinado por colorimetria, enquanto K^+ e Na^+ trocáveis foram determinados por fotometria de chama. O Al^{3+} e H^+Al foram determinados a partir de extratos de cloreto de potássio (KCl) e extração com acetato de cálcio (1 mol L^{-1} em pH 7,0) respectivamente, e posteriormente determinados por titulometria com NaOH (0,025 mol L^{-1}). Posteriormente, a soma das bases (SB), a capacidade de troca catiônica (T), a saturação por bases (V%) e a porcentagem de sódio trocável (PST) foram calculadas conforme recomendado por (Teixeira et al. 2017). E o carbono total foi determinado segundo metodologia baseada em Yeomans & Bremner (1988).

2.5. Fluorescência e Difratometria de Raios-X

Amostras de solo do tratamento com água residuária no volume de 1 L/planta/semana (ET₁) foram separadas em suas frações granulométricas nos diferentes períodos (Condição inicial, após dois anos de aplicação de efluente tratado e após dois anos da interrupção da irrigação) considerando a profundidade 0 – 30cm. A argila foi separada pelo método da pipeta, a areia por peneiramento e o silte por sedimentação (Jackson, 2005). Os teores totais de elementos maiores das frações areia, silte e argila foram obtidos por meio de espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF). As amostras foram prensadas com ácido bórico em uma prensa Vaneox Pressing Technology. Em seguida, os elementos foram determinados na forma de óxidos no equipamento S2 Ranger com detector de silício X-Flash com refrigeração Peltier. A fração argila foi montada em lâminas orientadas e identificadas após i) saturação com Mg^{2+} ($MgCl$ 1 mol L^{-1}) em temperatura ambiente (25°C) e ii) Mg^{2+} solvatada com glicerol. Os minerais foram submetidos à difração de raios X com Difratometro D-2 Phaser.

2.6. Análise estatística

Os atributos químicos do solo foram submetidos à análise de variância (teste F) e as médias comparadas por meio do teste de Tukey para os fatores tratamentos de irrigação com medidas repetidas no tempo. Foi realizado o teste de Dunnet para comparação dos atributos químicos nos dois tempos (período irrigado e período não irrigado) com a condição inicial nas camadas de 0 – 15 e 15 – 30 cm. Para todas as análises estatísticas, utilizou-se o software SISVAR (Ferreira, 2008).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Atributos químicos do solo

Os atributos químicos do solo degradado sob condição inicial, após dois anos da aplicação de efluente tratado e após dois anos da interrupção dos tratamentos de irrigação são apresentados na Tabela 2. Na condição inicial o solo apresentou reação moderadamente ácida (Santos et al. 2018), valores esses considerados elevados sob uma perspectiva de classificação agrônômica (Alvarez et al. 1999). Os teores de COT, P disponível e Mg^{2+} são baixos, enquanto os teores de Ca^{2+} e K^+ são muito baixos (Alvarez et al. 1999). Como consequência, baixa fertilidade em ambas as profundidades (0 – 15 e 15 – 30 cm). Isto reflete sua condição de degradação ocasionada pela retirada da camada superficial, correspondente ao horizonte A, deixando a área sem vegetação e expondo em superfície partes de horizonte B plânico e

horizonte C muito pedregoso (30% de cascalhos e calhaus). Os teores trocáveis de Na^+ considerados muito elevados confirmam um processo incipiente de sodificação (caráter sódico), comumente encontrado em horizontes Bt da ordem dos Planossolos da região (Brasil, 1972; Santos et al. 2018).

Após 2 anos consecutivos de irrigação (2013 – 2015) os tratamentos não demonstraram diferenças significativas entre si ($p>0,05$) para os macronutrientes do solo em ambas as profundidades avaliadas (Tabela 2). Entretanto, a saturação por bases em ET_1 (efluente tratado no volume de 1 L/planta/semana) foi mais elevada quando comparado com os demais tratamentos nas duas profundidades avaliadas. Tal fato é explicado pelo ligeiro aumento das bases trocáveis em ET_1 , notadamente Mg^{2+} , mostrando que mesmo que tal diferença não seja estaticamente significativa, a aplicação do efluente em 1L/planta/semana aumenta a participação dos cátions trocáveis no complexo de troca dos solos e, por conseguinte, tornam os solos ainda mais eutróficos. Isto deverá se refletir em ganhos na produção de biomassa das espécies cultivadas.

A melhora na fertilidade dos solos com aplicação de água residuária em regiões áridas e semiáridas é amplamente relatada na literatura (Abegunrin et al. 2016; Hussain et al. 2019; Jahany et al. 2020). Em solo arenoso da região semiárida da Tunísia, Dakhli (2016), relatou aumento significativo na fertilidade com aplicação de curta duração com água de reúso. No semiárido brasileiro a aplicação de água residuária em solo arenoso diminuiu a fertilidade em superfície e aumento em subsuperfície, principalmente com lixiviação Ca^{2+} e Mg^{2+} , devido a aplicação de uma lâmina acima da evapotranspiração da cultura pesquisada (Oliveira et al. 2016).

Tabela 2. Teores de macro e micronutrientes e fertilidade do solo na condição inicial, após dois anos consecutivos de irrigação com efluente tratado e água de abastecimento e após dois anos da interrupção da irrigação em solo degradado do Semiárido.

Trat.	pH 1:2,5	C	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	T	t	V	m
	H ₂ O	g.kg	mg.kg ⁻¹	cmol. Kg ⁻¹							%			
Condição inicial														
0 – 15	6.07	7.6	8.14	0.27	0.23	0.21	0.02	0.1	3.29	0.74	4.0	0.84	19.05	12.45
15 – 30	6.37	5.3	4.07	0.28	0.18	0.16	0.01	0.1	2.87	0.64	3.5	0.74	18.60	16.04
Após 2 anos com irrigação														
Profundidade 0 – 15 cm														
AB _{0,5}	5.94a ^{ns}	9.4a ^{ns}	6.3a ^{ns}	2.84a ^{**}	1.11a ^{ns}	0.52a [*]	0.08a ^{**}	0.11a ^{ns}	2.45a ^{**}	4.55a ^{**}	7.00a ^{**}	4.66a ^{**}	66b ^{**}	2.51a ^{B**}
ET _{0,5}	5.85a ^{ns}	9.7a ^{ns}	6.8a ^{ns}	2.87a ^{**}	1.59a [*]	0.52a [*]	0.09a ^{**}	0.11a ^{ns}	2.93a ^{**}	4.56a ^{**}	7.20a ^{**}	4.67a ^{**}	61b ^{**}	2.58a ^{**}
ET ₁	6.02a ^{ns}	10.9a ^{ns}	9.5a ^{ns}	2.88a ^{**}	2.13a ^{**}	0.92a ^{**}	0.11a ^{**}	0.10a ^{B^{ns}}	2.32a ^{**}	6.04a ^{**}	8.36a ^{**}	6.14a ^{**}	71a ^{**}	1.78a ^{B**}
Profundidade 15 – 30 cm														
AB _{0,5}	5.89a [*]	8.1a ^{ns}	7.2a [*]	3.03a ^{**}	1.05a ^{ns}	0.56a ^{ns}	0.12a ^{**}	0.10a ^{ns}	2.48a ^{**}	4.76a ^{**}	7.24a ^{**}	4.86a ^{**}	68ab ^{**}	2.19a ^{**}
ET _{0,5}	5.79a [*]	11.5a [*]	6.2a ^{ns}	2.74a ^{**}	1.40a [*]	0.77a ^{**}	0.11a ^{**}	0.13a ^{ns}	3.23a ^{ns}	4.61a ^{**}	7.84a ^{**}	4.75a ^{**}	58b ^{**}	3.26a ^{**}
ET ₁	5.89a [*]	10.3a ^{ns}	7.4a [*]	3.14a ^{**}	2.00a ^{**}	0.82a ^{**}	0.12a ^{**}	0.10a ^{ns}	2.08a ^{**}	6.08a ^{**}	8.16a ^{**}	6.18a ^{**}	73a ^{**}	1.83a ^{B**}
Após 2 anos da interrupção da irrigação														
Profundidade 0 – 15 cm														
AB _{0,5}	5.72a ^{ns}	7.9a ^{ns}	7.9a ^{ns}	1.62a ^{B**}	1.06a ^{ns}	0.37a ^{ns}	0.10a ^{**}	0.14a ^{ns}	3.05a ^{ns}	3.12a ^{**}	6.17a [*]	3.26a ^{**}	51a ^{B**}	5.26a ^{**}
ET _{0,5}	5.62a [*]	10.9a ^{ns}	8.1a ^{ns}	1.70a ^{B**}	1.05a ^{ns}	0.40a ^{ns}	0.09a ^{**}	0.13a ^{ns}	3.29a ^{ns}	3.24a ^{**}	6.53a ^{**}	3.37a ^{**}	50a ^{**}	4.45a ^{**}
ET ₁	5.65a ^{ns}	9.6a ^{ns}	9.8a ^{ns}	1.61a ^{B**}	1.09a ^{ns}	0.40a ^{B^{ns}}	0.10a ^{**}	0.19a [*]	3.23a ^{ns}	3.20a ^{B**}	6.43a ^{B*}	3.39a ^{B**}	48a ^{B**}	6.71a ^{**}
Profundidade 15 – 30 cm														
AB _{0,5}	6.02a ^{ns}	5.7a ^{ns}	2.5a ^{B^{ns}}	1.36a ^{B**}	1.66a [*]	0.34a ^{ns}	0.09a [*]	0.10a ^{ns}	2.29a ^{ns}	3.45a ^{**}	5.74a [*]	3.55a ^{**}	59a ^{**}	3.30a ^{**}
ET _{0,5}	6.03a ^{ns}	7.1a ^{ns}	4.0a ^{ns}	1.29a ^{B**}	1.21a ^{ns}	0.55a [*]	0.10a ^{**}	0.14a ^{ns}	2.00a ^{B^{ns}}	3.15a ^{**}	5.15a ^{B^{ns}}	3.28a ^{B**}	61a ^{**}	4.81a ^{**}
ET ₁	6.08a ^{ns}	6.2a ^{ns}	3.1a ^{B^{ns}}	1.39a ^{B**}	1.61a [*]	0.60a [*]	0.11a ^{**}	0.13a ^{ns}	2.38a ^{ns}	3.71a ^{B**}	6.09a ^{B**}	3.84a ^{B**}	57a ^{B**}	5.00a ^{**}

Para cada profundidade, médias seguidas da mesma letra minúscula, e entre períodos, maiúsculas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Médias seguidas de ^{ns}, *, **, não significativo, significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, em relação ao tratamento de referência (Condição inicial) pelo teste de Dunnet em cada período e profundidade. AB_{0,5}: água de abastecimento no volume de 0,5 L planta/semana; ET_{0,5}: Efluente tratado no volume de 0,5 L planta/semana; ET₁: Efluente tratado no volume de 1 L planta/semana.

Comparando a condição inicial com o final do período de 2 anos com irrigação, à exceção do pH, COT, P e Al^{+3} , os demais atributos diferiram significativamente ($p < 0,05$) na camada 0 – 15 cm (Tabela 2). A elevação observada para o tratamento que obteve os maiores teores (ET_1) para o Ca^{2+} (0,27 – 2,88 cmolc.kg^{-1}), Mg^{2+} (0,23 – 2,13 cmolc.kg^{-1}), K^+ (0,02 – 0,11 cmolc.kg^{-1}) e Na^+ (0,21 – 0,92 cmolc.kg^{-1}) alcançou acréscimos que representam aproximadamente 10, 9, 5 e 4 vezes os teores iniciais da camada superficial, respectivamente. Nesse período, os teores passaram a ser classificados como bom (Ca^{2+}), muito bom (Mg^{2+}), médio (K^+), muito alto (Na^+) e a saturação por bases (V%) de muito baixo para bom (19,05 – 71%) (Alvarez et al. 1999).

Na camada 15 – 30 cm apenas o Al^{+3} não diferiu significativamente da condição inicial em nenhum dos tratamentos de irrigação e os acréscimos obtiveram grandezas semelhantes aos da camada superficial para as mesmas variáveis. Na camada subsuperficial também houve aumento significativo ($p < 0,05$) de COT no tratamento $\text{ET}_{0,5}$ e do P no $\text{AB}_{0,5}$ e ET_1 comparados à condição inicial. Uma primeira hipótese é que pode estar havendo lixiviação de P no solo, fenômeno relatado para solos arenosos da região com adição de fontes de P (Galvão et al. 2008; Xavier et al. 2009; Azevedo et al. 2018; Carneiro 2019). Outro fator, é que as raízes da palma forrageira exploram mais abundantemente até 30 cm de profundidade do solo, e a cultura tem como característica a morte e renovação de um percentual de raízes de acordo com as condições ambientais (Sampaio, 2005), o que pode justificar o acréscimo de COT e P nesta profundidade.

De forma geral, foi observado aumento da fertilidade do solo após 2 anos de irrigação no tratamento de maior volume de água residuária. Em relação à condição inicial, houve aumento substancial da fertilidade do solo em todos os tratamentos, independente da qualidade e quantidade da água de irrigação. Tal fato pode ser explicado provavelmente devido a influência do crescimento das espécies florestais (Sabiá e Aroeira) e forrageira (Palma Orelha de Elefante) cultivadas na área, contribuindo na reciclagem de nutrientes pela deposição de folhas, bem como pelo desenvolvimento de suas raízes. De acordo com Salton e Tomazi (2014) o sistema radicular pode proporcionar significativas melhorias ao solo, principalmente nos aspectos relacionados com a estrutura e no acúmulo de matéria orgânica no solo.

Após dois anos da interrupção dos tratamentos de irrigação (2015 – 2017) não houve diferença significativa entre os tratamentos para nenhuma variável avaliada nas duas profundidades (Tabela 2). Apesar disso, quando se compara os resultados obtidos após o período irrigado (junho de 2015) com o final do período da interrupção dos tratamentos de irrigação (junho de 2017), há uma tendência de diminuição dos teores de COT e da soma de bases, notadamente para os teores Ca^{2+} , com consequente redução da CTC e saturação por

bases. O que é reflexo da suspensão do aporte via água residuária e atuação da biota do solo na decomposição da MOS. Esse comportamento se refletiu na diminuição significativa ($p < 0,05$) do Ca^{2+} para todos os tratamentos, além do Na^+ e índices de fertilidade (SB, T, t e V) no tratamento ET_1 e do V no $\text{AB}_{0,5}$ comparados ao final do período irrigado.

Esses resultados indicam uma tendência de equilíbrio dos teores dos nutrientes e fertilidade entre os tratamentos, em função da suspensão do aporte através da irrigação, além da ciclagem de nutrientes, aliada ao consumo e exportação principalmente pela cultura da palma forrageira. Por outro lado, houve um pequeno aumento nos teores de P em relação ao período irrigado na camada 0 – 15cm, o que se deve, provavelmente, à diminuição da disponibilidade hídrica de forma regular, diminuindo a mineralização de P orgânico e absorção pelas plantas, o que contribuiu para o acúmulo do nutriente no solo.

Pinheiro Júnior et al. (2018) encontraram maiores teores de P disponível em solo degradado do semiárido brasileiro devido à pouca ou a falta de vegetação, não havendo absorção do nutriente, resultando no seu acúmulo no solo. De acordo com Ahmad et al. (2020), a atividade microbiana atuando na mineralização regula os teores de P disponível em solos arenosos do semiárido do Pazaquistão com aplicação de água residuária.

Em relação à condição inicial, houve diferença nos cátions básicos para o Ca^{2+} e K^+ , os quais se mantiveram aproximadamente 6,5 e 5 vezes maiores, respectivamente, que os teores antes do experimento na camada 0 – 15cm (Tabela 2). Na camada subsuperficial houve diferença para todos os cátions básicos, exceto para o Mg^{2+} e Na^+ nos tratamentos $\text{ET}_{0,5}$ e $\text{AB}_{0,5}$, respectivamente. Em ambas as profundidades manteve-se diferença significativa para todos os índices de fertilidade (SB, T, t, V e m), sendo estes, maiores, comparados a condição inicial, exceto o T no $\text{ET}_{0,5}$ da camada 0 – 30cm. Isso demonstra que apesar da diminuição dos teores de nutrientes devido a interrupção da irrigação, somada a extração pelas culturas, ocorreu um efeito residual do que foi aplicado nos primeiros anos de irrigação. Em termos práticos, estes resultados evidenciam que a aplicação de água residuária, mesmo em pequena quantidade, aumenta a fertilidade do solo e, sua suspensão, seja por escassez hídrica ou por prevenção de danos ao solo, mantém os nutrientes em concentrações mais elevadas quando comparada com os teores iniciais.

Com base na concentração dos elementos nas duas qualidades de água usadas na irrigação (Tabela 1), foi calculado o aporte de nutrientes aplicado ao solo após dois anos em kg ha^{-1} (Tabela 3). Isto nos permite compreender o balanço de nutrientes no sistema no período avaliado. Devido as expressivas quantidades de Ca, Mg, Na, K e P no efluente, o aporte desses nutrientes foi naturalmente superior comparado a água de abastecimento. Considerando os

teores do solo na condição inicial e ao final do experimento (junho de 2017) (Tabela 2) em mg.kg^{-1} , diminuindo o que foi aportado via efluente tratado (Tabela 3), há um déficit de 14.85; 6.53; 15.55; 20.51; 10.46 kg de Ca, Mg, Na, K e P, respectivamente, na camada 0 – 15cm, tratamento ET₁. E na profundidade 15 – 30 cm há um déficit de 15.83; 6.17; 75.57; 20.55 e 10.57 kg para Ca, Mg, Na, K e P, respectivamente, para o mesmo tratamento.

Tabela 3. Aporte de nutrientes aplicados em dois tipos de água e diferentes lâminas de irrigação durante 2 anos (2013 – 2015).

Tratamento	Lâmina mm	Ca	Mg	Na kg ha^{-1}	K	P
AB _{0,5}	53	5.91	3.38	4.80	2.85	0.9
ET _{0,5}	53	12.94	5.65	11.77	14.57	7.39
ET ₁	76	18.62	8.13	16.95	20.98	10.64

A diferença de nutrientes no solo para o que foi aportado, representa a quantidade que saiu do sistema, principalmente via extração pelas culturas ou por processo de lixiviação.

3.2. Salinidade e sodicidade do solo

Após dois anos de irrigação não houve diferença significativa ($p>0,05$) na condutividade elétrica do solo (CE) entre os tratamentos de irrigação em nenhuma das profundidades avaliadas (0 – 15 e 15 -30 cm) (Figura 3 A - C). Apesar disso, observa-se uma tendência de valores médios de CE maiores no tratamento com maior volume de efluente tratado (ET₁), o qual, comparado à Condição Inicial (CI), foi significativamente ($p<0,01$) superior na camada superficial, representando um aumento de 67% (Figura 3 A). Estes resultados ratificam o aporte salino a partir da irrigação com efluentes tratados, o qual é amplamente relatado na literatura e atribuído aos sais dissolvidos na água residuária (Adrover et al. 2017; Chaganti et al. 2019).

No entanto, apesar do aumento observado na irrigação com efluente, que alcançou $357 \mu\text{S cm}^{-1}$ no ET₁, este valor está muito abaixo dos níveis requeridos para que o solo apresente caráter salino ($\text{CE} \geq 4000 \mu\text{S cm}^{-1}$) (Santos et al. 2018). Pode-se afirmar, portanto, que a irrigação com efluente, aplicado regularmente por dois anos consecutivos em pequenas quantidades, não causou a salinização do solo, o que não prejudicaria o rendimento e produtividade da maioria das culturas. Após dois anos de aplicação de água residuária em solo argilo-arenoso de uma região árida do Texas, Changati et al. (2019), relataram que a CE não excedeu os níveis aceitáveis. A pesquisa de Oliveira et al. (2016) em solo arenoso do semiárido brasileiro, com irrigação de curta duração com efluente tratado, também não demonstrou salinização do solo.

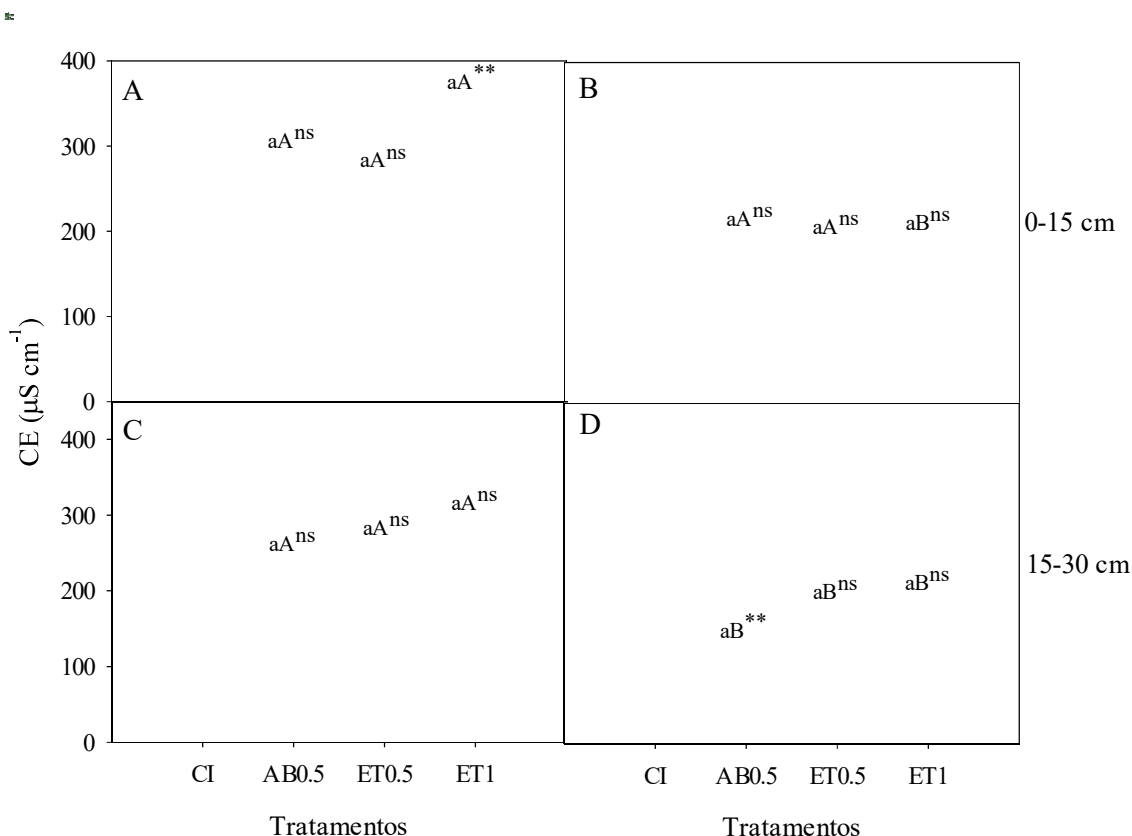


Figura 4. Condutividade Elétrica (CE) do solo nos três tratamentos de irrigação (AB_{0,5}: água de abastecimento no volume de 0,5 L/planta/semana; ET_{0,5}: efluente tratado no volume de 0,5 L/planta/semana e ET₁: efluente tratado no volume de 1 L/planta/semana) e na condição inicial (CI), após dois anos com irrigação nas profundidades de 0 – 15 (A) e 15 – 30cm (C) e após dois anos da interrupção da irrigação nas profundidades de 0 – 15 (B) e 15 – 30cm (D). Para cada profundidade, médias seguidas da mesma letra minúscula, e entre períodos, maiúsculas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Médias seguidas de ns, *, **: não significativo, significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, em relação ao tratamento de referência (Condição inicial - CI) pelo teste de Dunnet em cada período e profundidade.

Não foram constatadas diferenças significativas após 2 anos da suspensão da irrigação entre os tratamentos em ambas as profundidades (Figura 3 B - D). Não obstante, houve uma tendência de diminuição da CE para todos os tratamentos comparados ao final do período irrigado (2015), sendo esta diminuição significativa na camada superficial somente para o ET₁ (-46%) e na camada subsuperficial para todos os tratamentos (-53%, -40% e -41% para AB_{0,5}, ET_{0,5} e ET₁, respectivamente). Além disso, observa-se uma tendência de valores médios abaixo dos encontrados na condição inicial para todos os tratamentos em ambas as profundidades ao final de dois anos após suspensão (2017) dos tratamentos de irrigação, com diminuição significativa ($p < 0,01$) para o AB_{0,5} na camada 15 – 30 cm. Esses resultados indicam que após a suspensão da irrigação houve lixiviação dos sais do solo devido aos eventos de precipitação pluviométrica ocorridas durante o período não irrigado (934 mm entre 2015 – 2017) (Figura 2). Tal hipótese também é suportada pelo fato de que a textura franco arenosa desses solos permite maior infiltração de água no solo dado sua maior permeabilidade, o que favorece a remoção

dos sais solúveis (Heil e Schmidhalter, 2012). Este comportamento também foi observado por Adrover et al. (2017) com diminuição dos sais em solos irrigados com água residuária no período chuvoso sem irrigação. Hussain et al. (2019) afirmam que a irrigação com efluente causa aumento consistente na salinidade do solo, a menos que seja lixiviado por água limpa, irrigação excessiva ou pela chuva, o que corrobora os dados encontrados na presente pesquisa.

O PST do solo, após 2 anos de irrigação, não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos nas camadas avaliadas (Figura 4 A - C). Em relação à condição inicial, houve uma tendência de maiores médias nos tratamentos com irrigação, mas houve diferença ($p < 0,05$) somente no ET₁ na camada de 0 – 15cm. Inicialmente os solos foram classificados como “não sódicos” ($PST < 6$) (Santos et al. 2018). Após dois anos de aplicação, no tratamento ET₁ foi identificado aumento de 90% do PST, tornando o solo de caráter sódico (PST de 7 – 10%). Apesar disso, os valores se mantiveram abaixo do nível de 15% admitido pela FAO (2000) como o limite para que ocorram impactos severamente negativos ao solo e que afetariam a produtividade das culturas, com a dispersão e possível iluviação das argilas e a perda da condutividade hidráulica do solo.

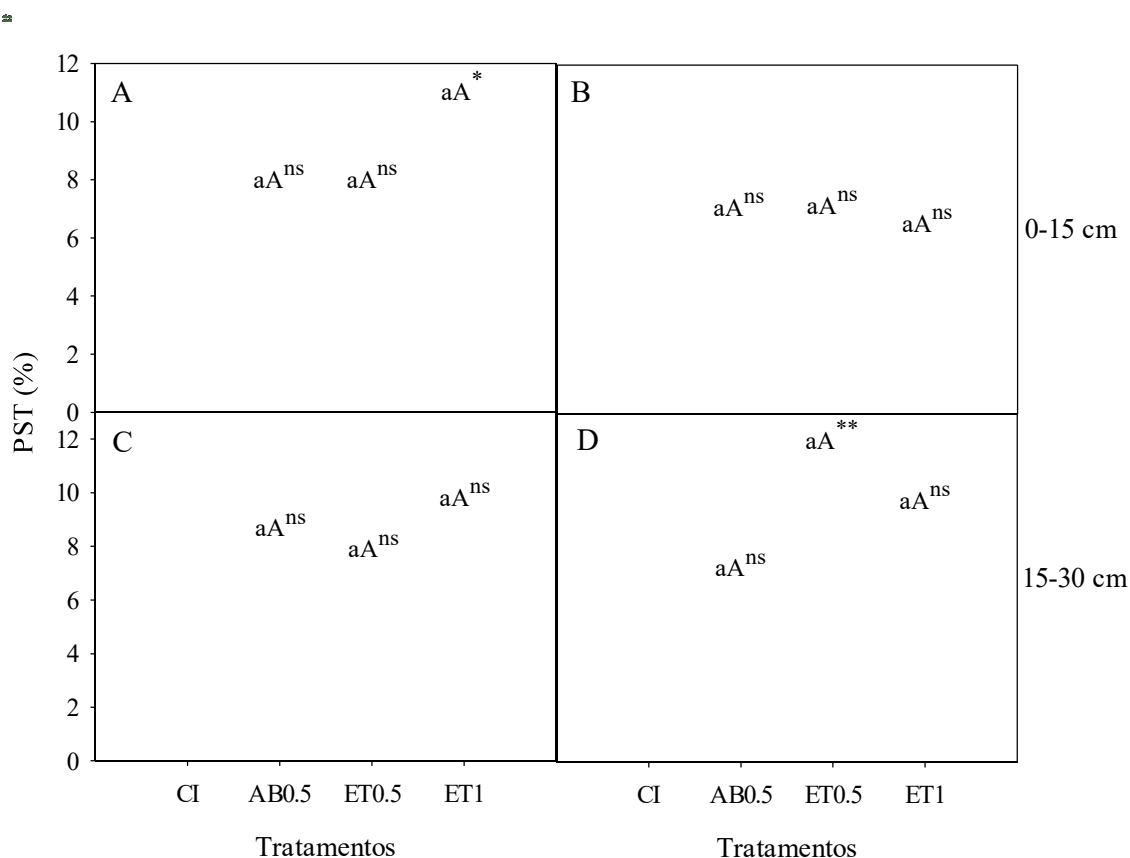


Figura 5. Porcentagem de Sódio Trocável (PST) nos três tratamentos de irrigação (AB0,5: água de abastecimento no volume de 0,5 L/planta/semana; ET0,5: efluente tratado no volume de 0,5 L/planta/semana e ET1: efluente tratado no volume de 1 L/planta/semana) e na condição inicial (CI), após dois anos com irrigação nas profundidades de 0 – 15 (A) e 15 – 30cm (C) e após dois anos da interrupção da irrigação nas profundidades de 0 – 15 (B) e 15 – 30cm (D). Para cada

profundidade, médias seguidas da mesma letra minúscula, e entre períodos, maiúsculas, não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Médias seguidas de ns, *, **: não significativo, significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, em relação ao tratamento de referência (Condição inicial - CI) pelo teste de Dunnet em cada período e profundidade.

Dois anos após a suspensão da irrigação não houve diferença significativa entre os tratamentos para o PST em ambas as profundidades, bem como não houve diferença em relação ao final do período irrigado (Figura 5 B - D). Apesar disso, na camada superficial, observou-se uma tendência de redução em relação ao período irrigado, principalmente no tratamento ET₁, que apresentou diminuição de 40%. À exceção do tratamento AB_{0,5}, na camada subsuperficial com os tratamentos de efluente (ET_{0,5} e ET₁) houve elevação média do PST comparado à camada superficial, com o ET_{0,5} obtendo diferença significativa ($p < 0,01$) em relação ao PST da condição inicial. Esses resultados indicam que ocorreu lixiviação com a diminuição dos teores na camada superficial, no entanto, houve acúmulo de sódio na camada mais profunda nos tratamentos com efluente tratado. O ET_{0,5} alcançou o valor de PST de 11% indicando caráter solódico (6 – 15%) (Santos et al. 2018).

Apesar de não ter excedido o valor limite, esta tendência de acúmulo merece atenção, pois pode indicar problemas de sodificação, principalmente com a diminuição da condutividade elétrica (Figura 3) e dos cátions trocáveis (Tabela 2), o que potencializa os efeitos deletérios do sódio. Tal fato também evidencia que a aplicação da água residuária seguido de um tempo de drenagem livre, acarretou lixiviação de sais do sistema (dessalinização). E está contribuindo para o aumento da concentração dos íons Na⁺ no complexo de troca catiônico, ainda que em níveis não suficientes para caracterização desses como sódicos (sodificação). Confirmando assim, que a aplicação de efluente pode desencadear o processo pedogenético de solonização (sodificação + dessalinização).

Quando o conteúdo de sódio se eleva, o problema é mais sério, já que o sódio geralmente persiste depois que os sais solúveis têm sido eliminados (Queiroz et al. 2010). O acúmulo de sódio no solo pode causar graves danos por promover a dispersão e possível iluviação das argilas, acarretando a perda da condutividade hidráulica, impermeabilizando horizontes subsuperficiais e, resultar no aumento do escoamento superficial, carreando solo, o que pode levar inclusive a danos ambientais com a eutrofização de corpos hídricos (Muyen et al. 2011; Elgallal et al. 2016; Chaganti et al. 2019; Zema et al. 2019). Solos de regiões semiáridas tendem a apresenta maior teor de sais como os de Na⁺, em geral, devido à natureza mineralógica, aliada à baixa precipitação e alta evapotranspiração natural, por isso, esse é um aspecto crítico na avaliação do manejo com água residuária, comumente ricas em Na⁺ (Oliveira et al. 2016). Apesar disso, Bedbabis et al. (2014), observaram em solo arenoso de região

árida da Tunísia, que após 4 anos de aplicação de efluente tratado, a razão de adsorção de sódio (RAS) não ofereceu risco e diminuiu devido a lixiviação ocorrida pela precipitação pluviométrica nos últimos anos avaliados.

3.3. Geoquímica e mineralogia do solo

Em todas as frações predomina SiO_2 , refletindo principalmente a ocorrência de quartzo na fração areia e caulinita e minerais 2:1 na argila (Tabela 4). Os teores consideráveis de Al_2O_3 , seguido de K_2O e CaO na fração areia e notadamente na fração silte, indicam a ocorrência de feldspatos e plagioclásios. Os teores também consideráveis de Fe_2O_3 indicam presença de biotitas. Essa mineralogia corrobora estudos mineralógicos realizados em Planossolos e Neossolos Litólicos/Regolíticos da região (Paraíba 1972; Campos e Queiroz, 2006; Sousa et al., 2020). A fração areia apresentou as menores mudanças nos óxidos maiores, nos períodos após dois anos irrigado com efluente tratado (Com efluente) e ao final de dois anos da suspensão da irrigação (Sem Efluente), comparados à condição inicial (CI). Isso aponta para o predomínio de minerais de difícil intemperização na fração areia (p, ex., quartzo) e a baixa reatividade dessa fração dada sua característica não coloidal.

No período Com Efluente é observada expressiva alteração geoquímica na fração silte, com aumento dos teores de K_2O , CaO , MgO , Cl^- e SO_3 , no qual pode ser creditada a água de irrigação com efluente. Apesar de não significativo, esse maior aporte de Cl^- na fração silte ocorreu em concomitância com o ligeiro aumento da CE após dois anos de irrigação nos solos, indicando que a fração silte foi a fração de maior sensibilidade às alterações na solução do solo. À semelhança, os aumentos nos teores de K_2O , MgO e CaO na fração silte seguiram a tendência de aumento dos teores desses cátions na CTC do solo.

Esses resultados confirmam que as partículas do tamanho silte, nos solos estudados, contribuem consideravelmente para o equilíbrio do meio. O que provavelmente deve estar relacionado com a assembleia mineralógica ainda enriquecida em minerais facilmente intemperizáveis, os quais são reservas desses elementos que são comuns tanto a água de reúso como a solução do solo. Os teores também elevados de SO_3 na fração silte, após a aplicação da água residuária, se deve a reatividade dessa fração frente aos demais tamanhos das frações dos solos.

Tabela 4. Teores totais de elementos maiores (%) das frações areia, silte e argila do solo na Condição Inicial (CI), após dois anos com irrigação de efluente tratado (Com Efluente) e após dois anos sem irrigação com efluente tratado (Sem Efluente).

Período	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Cl	SO ₃	K ₂ O	CaO	MnO	MgO
-----%-----									
Areia									
CI	70,99	18,93	3,21	2,81	1,73	1,48	0,54	-	-
Com Efluente	72,33	17,60	3,67	2,53	1,32	1,45	0,52	-	-
Sem Efluente	71,99	18,51	1,81	3,17	2,18	1,47	0,47	-	-
Silte									
CI	65,96	16,55	6,59	1,10	0,89	2,54	1,13	0,11	3,10
Com Efluente	29,17	17,56	5,11	2,90	3,97	5,47	4,40	0,18	20,00
Sem Efluente	53,07	17,14	6,38	2,14	1,92	3,99	2,30	0,12	6,00
Argila									
CI	42,46	32,54	8,76	0,08	0,11	1,63	0,13	0,06	7,40
Com Efluente	42,72	29,86	7,44	0,09	0,11	1,90	0,16	0,08	7,00
Sem Efluente	47,81	18,37	20,06	0,33	0,13	6,39	0,68	0,24	2,60

Após dois anos da suspensão da irrigação (Sem Efluente) houve diminuição nos teores totais de K₂O, CaO e MgO da fração silte. Isto se deve à suspensão da irrigação que deixou de aportar os nutrientes, enquanto as espécies arbóreas e principalmente a palma forrageira, com alta demanda de K⁺ e Ca²⁺ (Donato et al., 2017), continuaram a remover os nutrientes do solo. Tais reduções são evidenciadas com a diminuição na concentração desses nutrientes na CTC do solo no mesmo período (Tabela 2).

Essas perdas implicam no reequilíbrio do sistema por meio do intemperismo de minerais fontes desses nutrientes, os quais serão liberados para a fase trocável. Nesse período os teores de K₂O aumentaram consideravelmente na fração argila (1,90 – 6,39%). Considerando que a concentração de K disponível não variou entre os períodos irrigado e não irrigado (Tabela 2), tais alterações provavelmente ocorreram no K estrutural (fração não disponível). A perda do K da fração silte e aumento na argila sugere a formação de ilita (mica na fração argila), condição suportada a partir da identificação de picos mais intensos de ilita no difratograma de raio-X no período Sem Efluente (2SE) (Figura 5). Vale ressaltar ainda que esse aumento gradual dos teores de K na argila possa também ser reflexo da transformação, sem necessidade de dissolução e recombinação, de feldspatos e micas primárias na ilita. Estudos em condições pedoambientais semelhantes têm mostrado que o aumento dos picos de ilita na fração argila de solos do semiárido é devido a sua neoformação a partir do intemperismo de plagioclásicos (Bétard et al., 2009) ou transformação a partir de micas primárias (Braga et al., 2002; Barbosa et al., 2015).

Em um ensaio de laboratório, com amostras de solos argilosos de diferentes regiões da Austrália, Marchuk et al. (2016) demonstraram que a aplicação de água de reúso rica em potássio aumentou o componente ilítico das assembleias de argila, também indicada por meio da difração de raio-X, semelhante a este estudo. Os mesmos autores não verificaram relação entre os teores totais de K, Al, Fe e Ca na fração argila. Neste estudo, ao contrário, é possível observar tendências de aumentos semelhantes ao K_2O no Fe_2O_3 , CaO , MnO e Cl . O aumento de ferro ocorrido na fração argila provavelmente se deve à formação de óxidos e/ou ferro na illita.

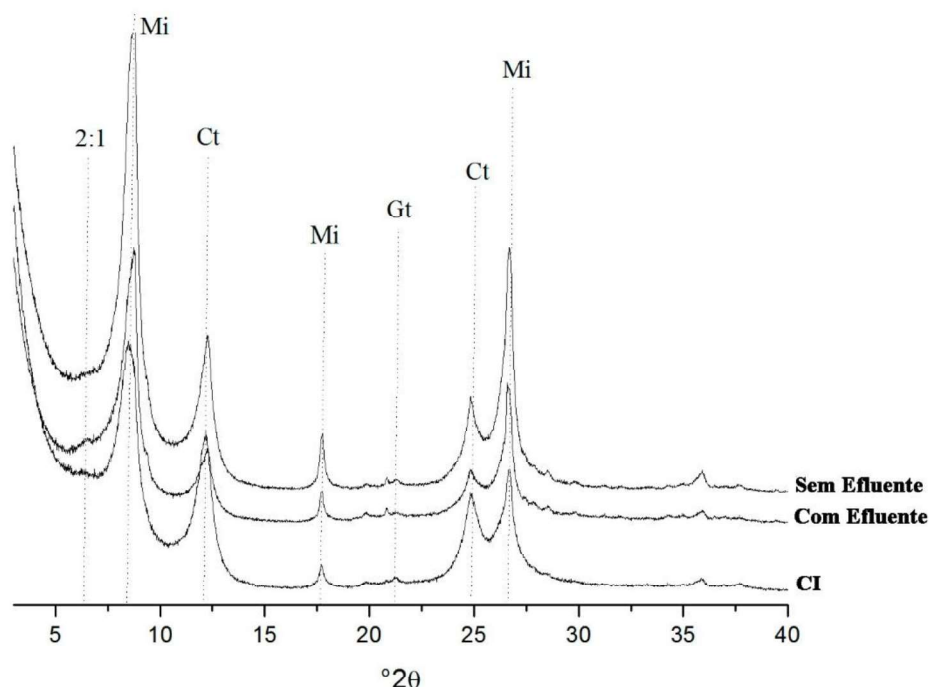


Figura 6. Difratometria de raios-X da fração argila de solo degradado, na condição inicial (CI), após dois anos de irrigação com efluente tratado (Com Efluente) e após dois anos da suspensão da irrigação com efluente tratado (Sem efluente). 2:1: minerais 2:1; Ct: caillinita; Gt: goethita; Mi: mica

A aplicação de longo período (40 anos), com água residuária por inundação em uma topossequência na região semiárida do Iran, promoveu a neoformação de esmectita na posição inferior da vertente, em solos naturalmente ricos em illita (Rezapour et al. 2012). Os autores atribuem os resultados à forte influência das diferentes posições geomorfológicas e propriedades do efluente. Em solos argilosos com 15 anos de irrigação por gotejamento com água residuária e água salobra, na região semiárida do Texas-EUA, foi observado apenas indicativos de possíveis processos futuros de ilitização pela água salobra, sem grandes alterações gerais na química e mineralogia (Tahtouh et al. 2019).

As evidências de neoformação de ilita na fração argila, representa retenção de K que pode ser disponibilizado às plantas a médio e longo prazo, reduzindo a necessidade de adubações químicas de elevado custo para a região do SAB. Além disso, no processo de transformação dos minerais primários para ilita, há liberação de outros elementos para a solução do solo de elevada essencialidade para nutrição de plantas, tais como Fe, Ca e Mg. Por último, esse processo de ilitização configura aumento nos teores de argilas 2:1 e, por conseguinte, aumento da reatividade do solo, com significativo aumento de CTC e retenção de água. No tocante aos solos do semiárido essa questão assume ainda mais importância, dado a ampla ocorrência de solos arenosos de elevada permeabilidade e baixa retenção de cátions e de água; solos degradados que tiveram a fertilidade dos horizontes alterados dada a atividade antrópica e; solos com consideráveis teores de minerais facilmente intemperizáveis, no qual podem liberar elementos de octaedros e entrecamadas (p. ex, K estrutural) para absorção pelas plantas.

Os resultados desta pesquisa evidenciam que mesmo a aplicação por um curto período e de pequeno volume de água residuária tratada, acarretou mudanças na geoquímica e mineralogia do solo degradado, com efeitos nas características químicas e na fertilidade do solo. A aplicação de efluente tratado ainda carece de estudos geoquímicos e mineralógicos mais aprofundados, considerando os efeitos de outras lâminas e períodos de aplicação, bem como os efeitos em diferentes solos e tipos de cultivos importantes para o SAB.

4. CONCLUSÃO

Todos os tratamentos de irrigação aumentaram substancialmente a fertilidade do solo degradado; no entanto, o efluente tratado na lâmina de 1 L/planta/semana resultou em fertilidade mais alta ao final de dois anos de aplicação comparado aos tratamentos de menor volume. Dois anos após a suspensão dos tratamentos de irrigação, o efeito residual do período irrigado, manteve o status da fertilidade significativamente maior comparado a condição inicial. A salinidade do solo aumentou no período irrigado e diminuiu após a suspensão da irrigação, sem apresentar risco de degradação. Entretanto, ao final do experimento foi observado incipiente processo de solodização.

Os teores totais dos elementos maiores aumentaram, principalmente na fração silte, com aplicação do efluente por dois anos e, após a suspensão do efluente por dois anos, os teores diminuíram na fração no silte enquanto aumentaram na fração argila com intensificação dos picos de mica (ilitização). Esse processo contribui para a disponibilidade e retenção de cátions básicos, notadamente K, nos solos tratados com efluente no SAB, bem como, representa um processo de formação de minerais com maior capacidade de retenção de cátions e de água, com

benefícios tanto à fertilidade desses solos como para a sustentabilidade e segurança alimentar dos sistemas agrícolas familiares no SAB.

REFERENCIAS

ABEGUNRIN, T. P.; AWE, G. O.; IDOWU, D. O.; ADEJUMOBI, M. A. Impact of wastewater irrigation on soil physico-chemical properties, growth and water use pattern of two indigenous vegetables in southwest Nigeria. **CATENA**, 139, 167–178, 2016. doi:10.1016/j.catena.2015.12.014

ADROVER, M.; MOYÀ, G.; VADELL, J. Seasonal and depth variation of soil chemical and biological properties in alfalfa crops irrigated with treated wastewater and saline groundwater. **Geoderma**, 286, 54-63, 2017.

AHMAD, A.; ARIF, M. S.; YASMEEN, T.; RIAZ, M.; RIZWAN, M.; SHAHZAD, S. M.; ALI, S.; RIAZ, M. A.; SAROSH, M. Seasonal variations of soil phosphorus and associated fertility indicators in wastewater-irrigated urban aridisol. **Chemosphere**, 239, 124725, 2020.

ALVARES V. V.H.; NOVAES, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B. E LOPES, A.S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO et al. (eds). Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. Viçosa. 1999. p. 25-32.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22(6), 711-728, 2013.

AZEVEDO, R. P.; SALCEDO, I. H.; LIMA, P. A.; FRAGA, V. S.; LANA, R. M. Q. Mobility of phosphorus from organic and inorganic source materials in a sandy soil. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**. Springer, p. 1 - 11, 2018

BARBOSA, W. R.; ROMERO, R. E.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; COOPER, M.; SARTOR, L. R.; PARTITI, C. S. M.; JORGE, F. O.; COHEN, R.; JESUS, S. L.; FERREIRA, T. O. Effects of slope orientation on pedogenesis of altimontane soils from the Brazilian semi-arid region (Baturité massif, Ceará). **Environmental Earth Sciences**, 73(7), 3731-3743, 2015.

BÉTARD, F.; CANER, L.; GUNNELL, Y.; BOURGEON, G. Illite neoformation in plagioclase during weathering: evidence from semi-arid Northeast Brazil. **Geoderma** 152:53–62, 2009.

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

BELTRÃO, B. A.; MORAIS, F. D.; MASCARENHAS, J. D. C.; MIRANDA, J. L. F. D.; SOUZA JUNIOR, L. C. D.; MENDES, V. A. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea, estado de Paraíba: diagnóstico do município de Campina Grande. CPRM, 2005.

BRAGA, M. A.; PAQUET, H.; BEGONHA, A. Weathering of granites in a temperate climate (NW Portugal): granitic saprolites and arenization. **Catena** 49:41–56, 2002.

BRASIL - Ministério da Agricultura e do Interior. Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do estado da Paraíba. Rio de Janeiro, 1972.

CAMPOS, M. C. C.; QUEIROZ, S. B. Reclassificação dos perfis descritos no Levantamento Exploratório-Reconhecimento de solos do estado da Paraíba. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, 6(1), 45-50. 2006.

CARNEIRO, K. A. A. Óxidos de Fe e Al no deslocamento vertical de P em Neossolos Regolíticos. Tese (Doutorado), Universidade Federal da Paraíba, 2019.

CHAGANTI, V. N.; GANJEGUNTE, G.; NIU, G.; ULERY, A.; FLYNN, R.; ENCISO, J. M.; MEKI, M. N.; KINIRY, J. R. Effects of treated urban wastewater irrigation on bioenergy sorghum and soil quality. **Agricultural Water Management**, 228, 105894, 2020.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba. SANTOS, E.D.; FERREIRA, C.A.; SILVA Jr, J.M.F. (Org.). 1 ed. Recife: CPRM, 2002. 234 p

DAKHLI, R. Changes in several soil chemical properties following amendment with olive mill wastewater sludge. **Int. J. Environ. Qual.** 22, 1–14, 2016.

DICKIN, S. K.; SCHUSTER-WALLACE, C. J.; QADIR, M.; PIZZACALLA, K. A review of health risks and pathways for exposure to wastewater use in agriculture. **Environ Health Perspect** 124:900–909, 2016. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1509995>

DONATO, S.L.R.; DONATO, P. E. R.; SILVA, J. A.; RODRIGUES, M. G. V. Diagnóstico nutricional e recomendação de adubação para a cactus pear ‘Gigante’. **Inf. Agropecu. (Belo Horiz.)** 38 (296), 46–58, 2017.

ELFANSSI, S.; OUAZZANI, N.; MANDI, L. Soil properties and agro-physiological responses of alfalfa (*Medicago sativa* L.) irrigated by treated domestic wastewater. **Agricultural water management**, 202: 231-240, 2018.

ELGALLAL, M.; FLETCHER, L.; EVANS, B. Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: A review. **Agricultural Water Management**, 177, 419-431, 2016.

ENI, I. Effects of land degradation on soil fertility: A case study of Calabar South, Nigeria. **Environmental Land Use Planning**, 21-34, 2012.

FAO, 2000. Management and rehabilitation of salt affected soils. Disponível em: <<http://www.fao.org/AG/aGL/agll/spush/topic4.htm>>. Acesso em: 15 dez 2020.

FERREIRA, D. F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, Recife, v. 6, p. 36-41, 2008.

GALVÃO, S. R. S.; SALCEDO, I. H.; OLIVEIRA, F. F. Acumulação de nutrientes em solos arenosos adubados com esterco bovino. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, n.1, p.99-105, 2008.

HEIL, K.; SCHMIDHALTER, U. Characterisation of soil texture variability using the apparent soil electrical conductivity at a highly variable site. **Comput. Geosci.** 39, 98–110, 2012.

HUSSAIN, M. I.; MUSCOLO, A.; FAROOQ, M.; AHMAD, W. Sustainable use and management of non-conventional water resources for rehabilitation of marginal lands in arid and semiarid environments. **Agricultural water management**, 221, 462-476, 2019.

IRANDOUST, M.; TABRIZ, A. S. The effect of municipal wastewater on soil chemical properties. **Solid Earth Discussions**, 1-13, 2017.

JACKSON, M.L. Soil chemical analysis: a advanced course. 2 ed. Madison: Wisconsin, 2005. 930p

JAHAANY, M.; REZAPOUR, S. Assessment of the quality indices of soils irrigated with treated wastewater in a calcareous semi-arid environment. **Ecological Indicators**, 109, 105800, 2020.

MARCHUK, S.; CHURCHMAN, J.; RENGASAMY, P. Possible effects of irrigation with wastewater on the clay mineralogy of some Australian clayey soils: laboratory study. **Soil Research**, 54(7), 857-868, 2016.

MARTINS, E. L.; SILVA SOUZA, R. F.; SILVA FRAGA, V.; SOUSA MEDEIROS, S. Effects of Treated Wastewater on Soil Recovery in Degraded Semiarid Region. **Journal of Experimental Agriculture International**, 1-7, 2019.

MUSAZURA, W.; ODINDO, A. O.; TEFAMARIAM, E. H.; HUGHES, J. C.; BUCKLEY, C. A. Nitrogen and phosphorus dynamics in plants and soil fertigated with decentralised wastewater treatment effluent. **Agricultural Water Management**, 215, 55-62, 2019.

MUYEN, Z.; MOORE, G. A.; WRIGLEY, R. J. Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. **Agricultural Water Management**. 99, 33–41, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.07.021>.

ODOEMENA, K. I.; ROWSHON, K. M. D.; BINTI, C. M. H. Advances in utilization of wastewater in agricultural practice: a technical note. **Irrigation and Drainage**, 69(1), 149-163, 2020.

OLIVEIRA, P. C. P. D.; GLOAGUEN, T. V.; GONÇALVES, R. A. B.; SANTOS, D. L.; COUTO, C. F. Soil chemistry after irrigation with treated wastewater in semiarid climate. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 40, 2016.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, em particular en África. Asamblea General. 1994. Disponível em <<https://www.unccd.int/en/aboutthe-convention/Pages/About-the-Convention.aspx>> Acesso em 10 dez. 2019.

PINHEIRO JUNIOR, C. R.; PEREIRA, M. G.; SOUZA FILHO, O. JOSÉ.; BEUTLER, S. J. Can topography affect the restoration of soil properties after deforestation in a semiarid ecosystem?. **Journal of Arid Environments**, 162, 45-52, 2019.

PLUER, E. M.; SCHNEIDER, R. L.; PLUER, W. T.; MORREALE, S. J.; WALTER, M. T. Returning degraded soils to productivity: Water and nitrogen cycling in degraded soils amended with coarse woody material. **Ecological Engineering**, 157, 105986, 2020.

QADIR, M.; MATEO-SAGASTA, J.; JIMÉNEZ, B.; SIEBE, C.; SIEMENS, J.; HANJRA, M.A. Environmental risks and cost-effective risk management in wastewater usesystems. In: Drechsel, P., Qadir, M., Wichelns, D. (Eds.), *Wastewater: Economic Asset in an Urbanizing World*. Springer, 2015.

QUEIROZ, J. E.; GONÇALVES, A. C. A.; SOUTO, J. S.; FOLEGATTI, M V. Avaliação e monitoramento da salinidade do solo. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA C. F. (eds). *Manejo da salinidade na agricultura: Estudo básico e aplicados*. Fortaleza, INCT Sal, 2010. 472p. il.

REZAPOUR, S.; SAMADI, A.; KHODAVERDILOO, H. Impact of long-term wastewater irrigation on variability of soil attributes along a landscape in semi-arid region of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 67(6), 1713-1723, 2012.

REZAPOUR, S.; SAMADI, A. Soil quality response to long-term wastewater irrigation in inceptisols from a semi-arid environment. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 91 (3), 269–280, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10705-011-9460-2>.

SALTON, J. C.; TOMAZI, M. Sistema radicular de plantas e qualidade do solo. Embrapa Agropecuária Oeste-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2014.

SAMPAIO, E.V.S.B. Fisiologia da palma. In; MENEZES, R.S.C.et al. (eds). *A palma no Nordeste do Brasil: conhecimento atual e novas perspectivas de uso*. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2005. p. 43-55

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H.C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de classificação de solos. 5ª edição. Revista e Ampliada. Embrapa, p. 1 – 590, 2018.

SOUSA, J. E. S.; SANTOS, J. C. B.; CORRÊA, M. M.; NASCIMENTO, A. F.; SCHULZE, S. M. B. B.; FERREIRA, T. O.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SOUZA JÚNIOR, V. S. Mineralogy and genesis of Planosols under a semi-arid climate, Borborema Plateau, NE Brazil. *Catena*, 184, 104260, 2020.

TAHTOUH, J.; MOHTAR, R.; ASSI, A.; SCHWAB, P.; JANTRANIA, A.; DENG, Y.; MUNSTER, C. Impact of brackish groundwater and treated wastewater on soil chemical and mineralogical properties. *Science of the total environment*, 647, 99-109, 2019.

TARCHOUNA, L.; MERDY, P.; RAYNAUD, M.; PFEIFER, H.; LUCAS, Y. Effects of long-term irrigation with treated wastewater. Part I: evolution of soil physico-chemical

properties. **Appl. Geochem.** 25 (11), 1703–1710, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.08.018>.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A. TEIXEIRA, W. G. Manual of soil analysis methods. 3 ed. Brasilia. 2017;573p.

UNGUREANU, N.; VLĂDUȚ, V.; VOICU, G. Water Scarcity and Wastewater Reuse in Crop Irrigation. **Sustainability**, 12(21), 9055, 2020.

VAN OORT, F.; THIRY, M.; FOY, E.; FUJISAKI, K.; DELARUE, G.; DAIRON, R.; JONGMANS, T. Impacts of one century of wastewater discharge on soil transformation through ferrollysis and related metal pollutant distributions. **Science of the Total Environment**, 590, 1-13, 2017.

WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, 2015, 106.

XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, T. S.; ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S. Phosphorus fractionation in a sandy soil under organic agriculture in Northeastern Brazil. **Geoderma** 151:417–423. (2009). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.05.007>

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Commun. Soil Sci. Plant. Anal.**, 19:1467-1476, 1988.

ZEMA, D. A.; LUCAS-BORJA, M. E.; ANDILORO, S.; TAMBURINO, V.; ZIMBONE, S. M. Short-term effects of olive mill wastewater application on the hydrological and physico-chemical properties of a loamy soil. **Agricultural Water Management**, 221, 312-321, 2019.

CAPÍTULO II

PRODUÇÃO DE FORRAGEM, EFICIÊNCIA DO USO DE ÁGUA E QUÍMICA DE UM SOLO DEGRADADO SOB IRRIGAÇÃO DEFICITÁRIA COM EFLUENTE TRATADO

RESUMO

A produção de forragem é um desafio para sustentabilidade das populações de zonas semiáridas, frente as mudanças climáticas, devido a diminuição da disponibilidade hídrica, e degradação dos solos. Os efluentes de esgoto podem representar uma alternativa de suprimento de água e nutrientes, porém, seu uso excessivo pode causar efeitos negativos ao ambiente. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da irrigação deficitária com efluente tratado, na produtividade e eficiência no uso da água pela palma forrageira (*Opuntia stricta*) e propriedades químicas de um solo degradado. Para tanto, foi realizado um experimento em campo com o cultivo da palma forrageira, em consórcio com duas espécies arbóreas, em solo degradado. Os tratamentos foram dispostos em blocos casualizados com 10 repetições em três etapas de acordo com o ciclo anual de produção da palma. Etapa 1 (1º ciclo): AB_{0,5} - água de abastecimento 0,5 L/planta/semana; ET_{0,5} - efluente tratado 0,5 L/planta/semana; ET₁ - efluente tratado 1 L/planta/semana. Etapa 2 (2º ciclo) todos os tratamentos foram nivelados no volume de 0,5 L/planta/semana, e na etapa 3 (3º e 4º ciclos) os tratamentos foram interrompidos. Ao final de cada ciclo foram realizadas medidas biométricas das plantas e a estimativa de produtividade e eficiência no uso da água. Amostras de solo foram coletadas ao final do período irrigado (2013 – 2015) e não irrigado (2015 – 2017), para realização das análises químicas. O período irrigado com efluente tratado aumentou o teor de nutrientes e a percentagem de sódio trocável do solo e após a interrupção da irrigação, houve aumento do P disponível, enquanto os cátions básicos e PST diminuíram. A maior produtividade, em massa fresca e seca da palma forrageira, foi obtida no ET₁. O efeito residual do efluente aplicado no 1º ciclo promoveu aumentos na produtividade até o 4º ciclo de cultivo, além de maior eficiência no uso da água pela palma forrageira.

Palavras-Chave: Palma forrageira, Efeito residual, Água residuária, Ciclagem de nutrientes.

FORAGE PRODUCTION, WATER USE EFFICIENCY AND CHEMISTRY OF A DEGRADED SOIL UNDER DEFICIENT IRRIGATION WITH TREATED EFFLUENT

ABSTRACT

Forage production is a challenge for the sustainability of populations in semi-arid areas, in the face of climate change, due to decreased water availability, and soil degradation. Sewage effluents may represent an alternative of water and nutrient supply, but their excessive use can cause negative effects on the environment. The objective of this work was to evaluate the effects of deficient irrigation with treated effluent, productivity and efficiency in water use by forage palm (*Opuntia stricta*) and chemical properties of a degraded soil. For this, a field experiment was carried out with the cultivation of forage palm, in consortium with two tree species, in degraded soil. The treatments were arranged in randomized blocks with 10 replicates in three stages according to the annual palm production cycle. Step 1 (1st cycle): AB_{0.5} - water supply 0.5 L/plant/week; ET_{0.5} - treated effluent 0.5 L/plant/week; ET₁ - treated effluent 1 L/plant/week. Step 2 (2nd cycle) all treatments were leveled at a volume of 0.5 L/plant/week, and in step 3 (3rd and 4th cycles) the treatments were interrupted. At the end of each cycle, biometric measurements of the plants and the estimation of productivity and efficiency in water use were performed. Soil samples were collected at the end of the irrigated period (2013 - 2015) and non-irrigated (2015 - 2017), for chemical analysis. The period irrigated with treated effluent increased the nutrient content and the percentage of exchangeable sodium of the soil and after the interruption of irrigation, there was an increase in the available P, while the basic cations and PST decreased. The highest yield, in fresh and dry mass of the forage palm, was obtained in ET₁. The residual effect of the effluent applied in the 1st cycle promoted increases in productivity up to the 4th cycle of cultivation, in addition to greater efficiency in the use of water by the forage palm.

Keywords: Forage palm, Residual effect, Wastewater, Nutrient cycling.

1. INTRODUÇÃO

A cíclica escassez hídrica nas regiões semiáridas, aliada a processos de degradação do solo, causa o declínio da produção agropecuária e geração de recursos financeiros que culminam em sérios prejuízos econômicos e sociais (Lira et al., 2015). A recuperação de solos degradados, em termos de serviços ambientais e/ou uso agrícola, envolve, entre outros fatores, a disponibilidade hídrica e fertilidade do solo.

O efluente de esgoto tratado, usado na irrigação, pode representar uma alternativa para reduzir a escassez hídrica (Elfanssi et al., 2018; Ungureanu et al., 2020) e na recuperação de solos degradados (Hussain et al., 2019; Martins et al., 2019), podendo se refletir em aumento da produtividade agrícola. Os efeitos do reúso de água de efluente de esgoto tratado, quando bem manejada, incluem o aporte e reciclagem da matéria orgânica (Martins et al., 2019) e de nutrientes no solo (Musazura et al., 2019), além de conservar a água disponível e minimizar as descargas de esgoto nos corpos de água, corroborando a conservação ambiental (Medeiros et al., 2008; Oliveira et al., 2016). Em contrapartida, a utilização em excesso e de forma inadequada, dessa fonte de água, pode gerar efeitos deletérios aos solos e ambientes, e por consequência, afetar a saúde humana (Dickin et al., 2016; Odoemena et al., 2020).

O uso agrícola de efluente tratado tem sido amplamente estudado em diversos países e com várias espécies, como: *Oryza sativa* (Chakrabarti, 1995), *Olea europaea* L. (Petousi et al., 2015), *Medicago sativa* L. (Elfanssi et al., 2018), *Saccharum officinarum* (Galvis et al., 2018), *Lycopersicon esculentum* Mill. (Libutti et al., 2018), geralmente atendendo a necessidade hídrica das espécies. Tal abordagem é impraticável para agricultura familiar adotada em regiões tropicais, especificamente a praticada no semiárido brasileiro, devido à limitada disponibilidade hídrica, o que impossibilita a produção de efluente em grandes quantidades. Neste caso, há a necessidade da aplicação de água de irrigação de modo racional em pequenas quantidades, além do uso de culturas tolerantes ao estresse hídrico. De acordo com Huang et al. (2020), as culturas forrageiras tolerantes à seca são estratégicas, sobretudo levando em consideração os atuais desafios globais (mudanças climáticas, superexploração de recursos naturais e aumento da demanda por alimentos).

A palma forrageira (*Opuntia stricta*) da família Cactaceae, conhecida como orelha de elefante mexicana, se destaca no cultivo para produção de forragem animal em regiões semiáridas, uma vez que seu provimento diminui a necessidade do fornecimento de água para os rebanhos (Pordeus Neto et al., 2016). Essa espécie, possui ampla adaptação morfofisiológica às condições adversas como o estresse hídrico, além de alta eficiência no uso da água (Silva et

al., 2014). Tais características são típicas de plantas com metabolismo ácido das crassuláceas (CAM). Diante do exposto, a hipótese do estudo é que, mesmo com aplicação de pequena quantidade de efluente de esgoto tratado (sub-irrigação), os nutrientes aportados ao solo serão suficientes para aumentar a produtividade dessa espécie. Além disso, pode-se supor que o pequeno aporte de nutrientes também é suficiente para melhorar a fertilidade de solos degradados.

Diante disso, o objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos da irrigação deficitária com efluente de esgoto tratado, na produtividade e eficiência no uso da água da palma forrageira e propriedades químicas de um solo degradado

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área experimental

O estudo foi desenvolvido na área experimental da sede do Instituto Nacional do Semiárido (INSA) no município de Campina Grande, Paraíba, Brasil (Figura 1). A região apresenta clima semiárido quente e seco (AS), com estação chuvosa de março a julho, com grandes flutuações anuais (Figura 2). O relevo local suavemente ondulado contribui para o predomínio de Planossolos Nátricos (Brasil, 1972; Campos e Queiroz, 2006). Na área do experimento os horizontes superficiais do solo foram removidos pela construção civil, tendo dessa forma sofrido processo de “truncamento” que expôs os horizontes subsuperficiais. O solo apresenta como principais características pedregosidade e pouca profundidade. A granulometria foi realizada conforme (Teixeira et al. 2017) e a textura foi classificada como “franco arenosa”.

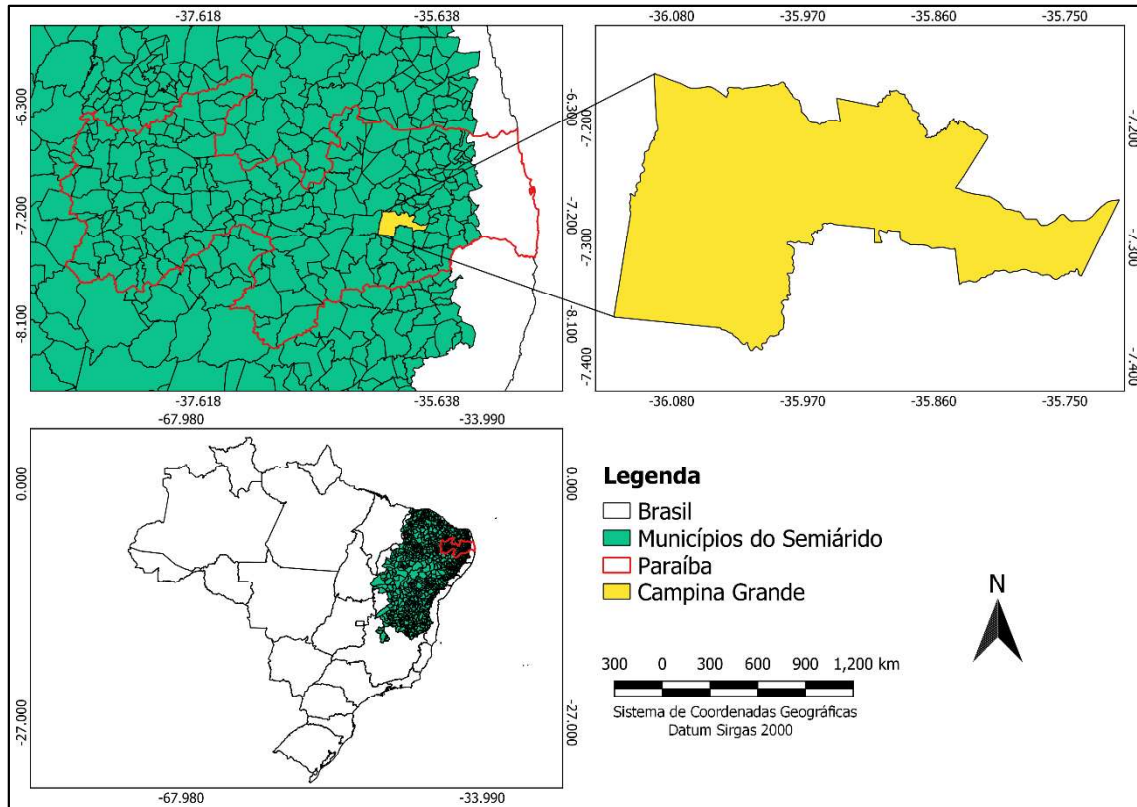


Figura 1. Mapa de localização do município do estudo (Campina Grande), região semiárida, estado da Paraíba, Brasil.

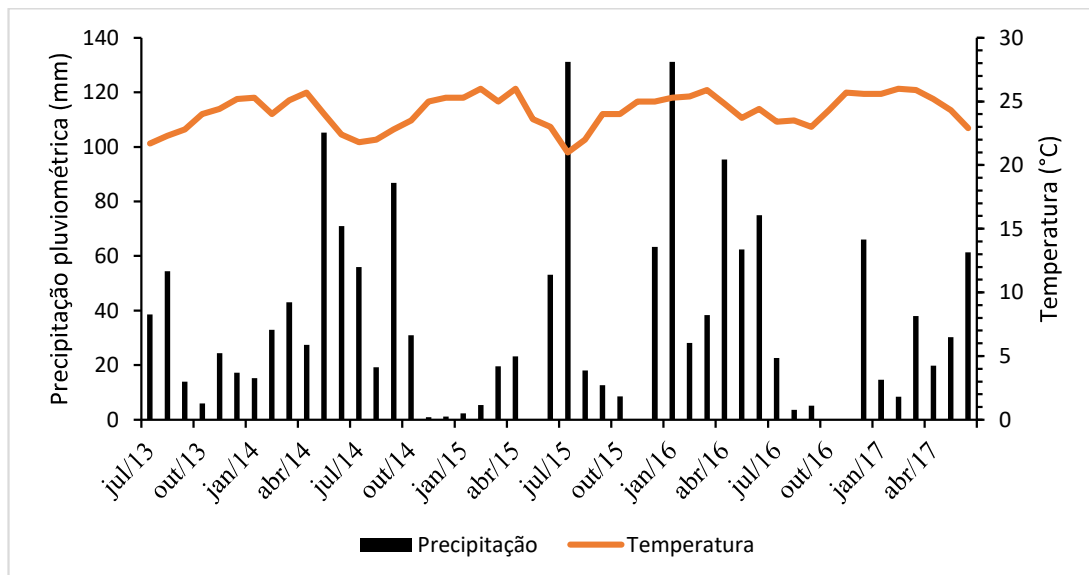


Figura 2. Volume de precipitação e temperatura no município de Campina Grande, PB, durante o período da realização do experimento.

2.2.Descrição experimental

O experimento foi implantado numa área de 780 m² onde foram plantadas 1560 raquetes de palma forrageira (*Opuntia stricta*) cultivar “orelha de elefante mexicana” em fileira dupla, no espaçamento de 0,5 x 0,5 x 1,5 m, resultando em uma densidade de 20.000 plantas por

hectare. A palma foi plantada em consórcio com 195 mudas de 2 espécies nativas da Caatinga com potencial madeireiro: sabiá (*Mimosa caesalpinifolia*) e aroeira-Branca (*Astroium urundeuva* Allemão), as quais foram dispostas alternadamente em espaçamento 2 x 2 m entre fileiras de palma, compondo um sistema agroflorestal. As mudas receberam adubação de fundação de 1 kg de esterco bovino por cova.

O arranjo experimental foi em blocos casualizados, com três tratamentos de irrigação e 10 repetições. Cada bloco foi constituído de 3 fileiras duplas de palma intercaladas por fileiras das arbóreas, cada fileira correspondendo a um tratamento de irrigação. A parcela útil foi formada por 8 plantas de palma forrageira para cada fileira dupla. Foi utilizada a água do sistema de abastecimento do INSA proveniente da captação de água da chuva e a água de reúso derivada do esgoto gerado nas dependências da sede administrativa do INSA a qual conta com banheiros e copas (Tabela 1). O esgoto passou por tratamento primário e secundário na estação de tratamento de efluentes do INSA, o qual consiste numa sequência de tanques de filtragem, e depois por cisterna séptica para sedimentação (Figura 2), para em seguida ser bombeada usando sistema de gotejamento com gotejadores autocompensantes.

Tabela 1. Caracterização química da água de abastecimento e da água residuária tratada, utilizada na irrigação de um solo degradado, no município de Campina Grande, PB.

Parâmetro	Unidade	Água	
		Abastecimento	Residuária
pH	-	7,5	8,3
CE	dS m ⁻¹	0,79	1,35
COT	mg L ⁻¹	1,72	3,7
N	mg L ⁻¹	0,28	26,3
NH ₄ ⁺	mg L ⁻¹	-	22,3
NO ₂ ³⁻	mg L ⁻¹	-	4,5
P	mg L ⁻¹	1,68	14
PO ₄ ³⁻	mg L ⁻¹	-	9,4
K ⁺	mg L ⁻¹	5,4	27,6
Ca ⁺²	mg L ⁻¹	11,2	24,5
Mg ⁺²	mg L ⁻¹	6,4	10,7
SO ₄ ³⁻	mg L ⁻¹	-	51,9
Na ⁺	mg L ⁻¹	9,1	22,3
Cl ⁻	mg L ⁻¹	178	270

CE, condutividade elétrica; COT, carbono orgânico total; N, nitrogênio total; NH₄⁺, nitrogênio amoniacal; NO₂³⁻, nitratos; P, fósforo total; P₄³⁻, fosfatos; K⁺, potássio; Ca⁺², cálcio; Mg⁺², magnésio; SO₄³⁻, sulfatos, Na⁺, sódio, Cl⁻, cloro.

O experimento foi conduzido em três etapas:

1º ciclo de cultivo (etapa 1)

No primeiro ciclo de cultivo da palma forrageira os tratamentos aplicados foram: AB_{0,5} – água de abastecimento no volume de 0,5 L planta/semana, que representa 10% da evapotranspiração de referência (ET₀); ET_{0,5} – efluente tratado no volume de 0,5 L

planta/semana, representando 10% da evapotranspiração de referência (ET_0) e; ET_1 – efluente tratado no volume de 1 L planta/semana, representando 20% da evapotranspiração de referência (ET_0). A duração do ciclo foi de 349 dias após o plantio (DAP), com precipitação total acumulada de 449 mm.

2º ciclo de cultivo (etapa 2)

Para verificar o efeito residual da aplicação, no segundo ciclo de cultivo da palma forrageira, todos os tratamentos foram nivelados no volume de 0,5 L: $AB_{0,5}$ – água de abastecimento no volume de 0,5 L planta/semana, (10% ET_0); $ET_{0,5}$ – efluente tratado no volume de 0,5 L planta/semana, (10% ET_0) e; ET_1 – efluente tratado no volume de 0,5 L planta/semana (10% ET_0). A duração do ciclo foi de 373 dias após o corte (DAC), com precipitação total acumulada de 299 mm.

3º e 4º ciclos de cultivo (etapa 3)

Nos ciclos de cultivo 3º e 4º da palma forrageira, houve a interrupção de todos os tratamentos do sistema de irrigação, contando apenas com a precipitação pluviométrica para entrada de água no sistema de cultivo. Portanto, a produção foi avaliada em sistema de sequeiro, sendo que a duração do 3º ciclo foi de 316 DAC, com precipitação total acumulada de 664 mm e do 4º ciclo de 423 DAC, com precipitação total acumulada de 270 mm

2.3. Amostragem e análise do solo

O solo foi coletado em dois tempos, ao final do 2º ciclo de cultivo da palma (correspondendo ao período irrigado) e ao final do 4º ciclo de cultivo (correspondendo ao período não irrigado). Os pontos de coleta das amostras de solos foram realizados em cada linha correspondente aos tratamentos, abaixo dos gotejadores, nas profundidades de 0 – 15 e 15 – 30 cm, sempre logo após a colheita da palma forrageira. Todas as amostras de solo foram secas ao ar peneiradas em malha 2 mm e foram analisadas quanto aos atributos químicos. O pH do solo foi determinado em água na proporção de 1: 2,5 (sólido: líquido); o Ca^{2+} , Mg^{2+} foram extraídos com uma solução de cloreto de potássio (1M KCl) e determinados por espectrofotômetro de absorção atômica (AAS); os níveis de P, K^+ , Na^+ disponíveis foram avaliados por extração com uma solução Mehlich-1. O P disponível foi determinado por colorimetria, e K^+ e Na^+ foram determinados por fotometria de chama. O PST foi determinado de acordo com a equação 3 (Teixeira et al. 2017):

$$PST = \frac{100 \cdot Na^+}{CTC} \quad (\text{Equação 3})$$

Na^+ : é a concentração de sódio trocável no solo, em cmolc kg^{-1} ;

CTC: é a capacidade de troca de cátions total, em cmolc kg^{-1} .

2.4. Variáveis analisadas

Em todos os ciclos de cultivo (1º, 2º, 3º e 4º), foram avaliadas as seguintes variáveis biométricas na palma forrageira: altura da planta (AP), número total de cladódios (NC), comprimento (CC), perímetro (PC), espessura (EC) e largura dos cladódios (LC). Ao final de cada ciclo foram determinados o peso da massa fresca e seca dos cladódios, e calculada a estimativa de produtividade da matéria fresca (PMF) e seca (PMS) da cultura em Mg ha⁻¹, além do teor de água dos cladódios (TAC) em %. A partir destas informações e das lâminas aplicadas, somadas à precipitação pluviométrica (Figura 1) no 1º e 2º ciclo de cultivo, foram calculados os seguintes indicadores: a eficiência do uso da água, avaliada por meio da produtividade da água da cultura (PAC, kg m⁻³), e produtividade econômica da água (PEA, R\$ m⁻³). Para o 3º e 4º ciclo de cultivo foram calculados os mesmos indicadores, porém considerando somente a precipitação pluviométrica durante cada ciclo.

A PAC avalia a capacidade da água utilizada ou recebida pela cultura em converter fotoassimilados em biomassa total acumulada, sendo calculada de acordo com a equação 1 a seguir (Geerts e Raes, 2009):

$$PAC = \frac{Y}{\sum Irrig. + \sum P} \quad (\text{Equação 1})$$

Y: é o rendimento da cultura em base fresca ou base seca (kg ha⁻¹);

Irrig.: irrigação acumulada ao longo do ciclo de cultivo (mm);

P: Precipitação pluviométrica (mm).

A produtividade econômica da água (PEA) permite conhecer qual foi o retorno econômico de cada unidade de água utilizada pela cultura ou recebida pelo sistema de plantio. Este indicador foi calculado de acordo com a equação 2 (Araya et al., 2011):

$$PEA = \frac{GE}{\sum Irrig. + \sum P} \quad (\text{Equação 2})$$

GE: é o ganho econômico por unidade de área, em R\$ ha⁻¹;

Irrig.: irrigação acumulada ao longo do ciclo de cultivo (mm);

P: precipitação pluviométrica (mm).

2.5. Análise estatística

Os atributos químicos do solo foram submetidos a estatística descritiva (média e desvio padrão) através do software Excel, enquanto as variáveis de produção, biométricas e índices de eficiência no uso da água foram submetidos à análise de variância (teste F), e as médias foram comparadas por meio de contrastes ortogonais, ao nível de significância de 0,05 de probabilidade. Para todas as análises estatísticas, utilizou-se o software SISVAR (Ferreira, 2008).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após dois anos de irrigação o pH do solo foi considerado levemente ácido em todos os tratamentos, com o ET₁ um pouco mais próximo da neutralidade na camada superficial (0 – 15 cm), (Tabela 2). A concentração de P disponível na camada superficial mostrou clara superioridade no tratamento ET₁ obtendo aumento de 28,5% e 34% em comparação ao ET_{0,5} e AB_{0,5}, respectivamente. Na camada subsuperficial o ET_{0,5} obteve valores médios de P disponível menores do que os demais tratamentos. As concentrações de Ca⁺, Mg²⁺ e Na⁺ trocáveis, além do PST, também demonstraram, em valores médios, uma evidente tendência de aumento no ET₁ em relação aos demais tratamentos e em ambas as profundidades. Já para o K⁺ trocável não foi observada grande variação entre os tratamentos e profundidades.

Após dois anos da interrupção dos tratamentos de irrigação, o pH manteve-se levemente ácido, porém houve uma tendência de elevação na camada subsuperficial em todos os tratamentos. O P disponível permaneceu com maior valor médio no tratamento ET₁ (9.8) e houve uma tendência de diminuir na camada subsuperficial em todos os tratamentos. Para as concentrações de Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ e PST, houve tendência de diminuição em relação aos tratamentos com dois anos consecutivos de irrigação, com exceção do Mg²⁺ no tratamento AB_{0,5} e do PST no tratamento ET_{0,5}, ambos na camada subsuperficial (0 – 30 cm). Já o K⁺ trocável permaneceu na mesma faixa de valores em ambas as profundidades.

Tabela 2. Médias (n=10) e desvio padrão da caracterização química de um solo degradado após dois anos consecutivos de irrigação, seguido por dois anos de interrupção dos tratamentos de irrigação, no município de Campina Grande, PB.

Trat.	pH 1:2,5	P	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	PST
	H ₂ O	mg kg ⁻¹	-----cmol _c kg ⁻¹ -----				%
Após 2 anos com irrigação							
Profundidade 0 – 15 cm							
Ab _{0.5}	5.94±0.46	6.3±3.1	2.84±0.6	1.11±0.8	0.52±0.3	0.08±0.04	7.42±4.9
ET _{0.5}	5.85±0.76	6.8±3.1	2.87±0.5	1.59±1.8	0.52±0.4	0.09±0.03	7.22±5.3
ET ₁	6.02±0.56	9.5±5.7	2.88±0.4	2.13±1.5	0.92±0.4	0.11±0.08	11.0±4.9
Profundidade 15 – 30 cm							
Ab _{0.5}	5.89±0.41	7.2±2.7	3.03±0.8	1.05±0.7	0.56±0.1	0.12±0.04	7.73±5.8
ET _{0.5}	5.79±0.47	6.2±1.5	2.74±0.4	1.40±1.5	0.77±0.6	0.11±0.03	9.82±4.1
ET ₁	5.89±0.53	7.4±3.0	3.14±0.7	2.00±1.5	0.82±0.5	0.12±0.08	10.04±2.2
Após 2 anos da interrupção da irrigação							
Profundidade 0 – 15 cm							
Ab _{0.5}	5.72±0.3	7.9±4.8	1.62±0.5	1.06±1.0	0.37±0.3	0.1±0.001	5.51±5.0
ET _{0.5}	5.62±0.3	8.1±3.8	1.70±0.7	1.05±0.6	0.40±0.3	0.09±0.03	6.12±5.4
ET ₁	5.65±0.4	9.8±7.3	1.61±0.5	1.09±1.4	0.40±0.3	0.1±0.04	6.22±3.4
Profundidade 15 – 30 cm							
Ab _{0.5}	6.02±0.4	2.5±0.9	1.36±0.5	1.66±1.1	0.34±0.3	0.09±0.09	5.92±5.4
ET _{0.5}	6.03±0.4	4.0±2.7	1.29±0.6	1.21±1.2	0.55±0.3	0.1±0.001	10.67±7.8
ET ₁	6.08±0.5	3.1±1.9	1.39±0.6	1.61±1.3	0.6±0.4	0.11±0.03	9.85±4.3

Trat: tratamento; PST: Porcentagem de Sódio Trocável

AB_{0,5} – Água de abastecimento no volume de 0,5 litros planta/semana; ET_{0,5} – Efluente Tratado no volume de 0,5 litros planta/semana; ET₁ – Efluente Tratado no volume 1 litro planta/semana.

O aporte de macronutrientes, verificado ao final do período irrigado, notadamente no tratamento de maior volume de efluente de esgoto tratado (ET₁), também é amplamente relatado na literatura sobre o efeito dos efluentes na química do solo (p. ex. Abegunrin et al. 2016; Jethwa et al. 2020). No segundo período, após dois anos da interrupção dos tratamentos, os teores de P disponível aumentaram na camada 0 – 15 cm do solo em todos os tratamentos em relação ao final do período irrigado, mas com maior magnitude nos tratamentos AB_{0,5} e ET_{0,5}, mesmo assim manteve-se superior no ET₁. Este aumento se deve, provavelmente, à diminuição da disponibilidade hídrica de forma regular, o que diminuiu a mineralização de P orgânico e absorção pelas plantas, contribuindo para o acúmulo do nutriente no solo. De acordo com Ahmad et al. (2020), a atividade microbiana atuando na mineralização regula os teores de P disponível em solos arenosos do semiárido do Pazaquistão com aplicação de água residuária. Zema et al. (2012), observaram diminuição no teor de carbono orgânico do solo (COS) e nutrientes com aplicação de água de reúso por dois anos, estes autores atribuíram essa diminuição dos nutrientes, especialmente, à absorção pela cultura teste (*Typha latifolia*).

Em contrapartida, também ao final do período não irrigado, houve uma tendência de diminuição dos cátions trocáveis, bem como do PST, em relação ao período irrigado, independente do tratamento. Isso pode ser atribuído à textura arenosa do solo que facilita a lixiviação aliada a ocorrência de precipitações pluviométricas (934 mm entre 2015 – 2017), embora pontuais, suficientes para promover processos de ciclagem dos nutrientes e consumo pelas plantas durante o período avaliado. Essa tendência de diminuição nos teores de nutrientes em períodos não irrigados, após a realização da irrigação com efluente, foi observada por Adrover et al. (2017), o que também foi atribuído a ocorrência de precipitações, que podem, inclusive, ter lixiviado os elementos do solo.

A Produtividade da Matéria Fresca (PMF), Produtividade da Matéria Seca (PMS) e Teor de Água dos Cladódios (TAC) no primeiro ciclo de cultivo da palma forrageira, não diferiu significativamente ($p>0,05$) entre os tratamentos AB_{0,5} e ET_{0,5} (Tabela 3). Em contrapartida, o PMF e PMS no tratamento ET₁ diferiram significativamente dos tratamentos ET_{0,5} ($p<0,05$) e AB_{0,5} ($p<0,01$). Para a variável TAC não houve diferenças significativas entre os tratamentos ($p>0,05$).

Tabela 3. Contrastes ortogonais e valores médios para produtividade da matéria fresca (PMF) e da matéria seca (PMS), e teor de água dos cladódios (TAC) da palma forrageira orelha de elefante mexicana submetida a tratamentos de irrigação com água de reúso e abastecimento (ciclos 1º e 2º) e sem irrigação (ciclos 3º e 4º) no Semiárido brasileiro

Contraste	PMF	PMS	TAC
	----- Mg ha ⁻¹ -----		%
1º Ciclo de cultivo (irrigado)			
AB _{0,5} – ET _{0,5}	30,5 – 43,3 ^{ns}	2,7 – 3,5 ^{ns}	92 – 88 ^{ns}
AB _{0,5} – ET ₁	30,5 – 75,3**	2,7 – 6,5**	92 – 85 ^{ns}
ET _{0,5} – ET ₁	43,3 – 75,3*	3,5 – 6,5*	88 – 85 ^{ns}
2º Ciclo de cultivo (irrigado)			
AB _{0,5} – ET _{0,5}	27,7 – 32,9 ^{ns}	1,9 – 2,4 ^{ns}	93 – 92 ^{ns}
AB _{0,5} – ET ₁	27,7 – 47,4**	1,9 – 3,1*	93 – 93 ^{ns}
ET _{0,5} – ET ₁	32,9 – 47,4*	2,4 – 3,1*	92 – 93 ^{ns}
3º Ciclo de cultivo (sequeiro)			
AB _{0,5} – ET _{0,5}	9,6 – 11,4 ^{ns}	1,3 – 1,8 ^{ns}	88 – 84 ^{ns}
AB _{0,5} – ET ₁	9,6 – 14,5*	1,3 – 2,3*	88 – 84 ^{ns}
ET _{0,5} – ET ₁	11,4 – 14,5 ^{ns}	1,8 – 2,3 ^{ns}	84 – 84 ^{ns}
4º Ciclo de cultivo (sequeiro)			
AB _{0,5} – ET _{0,5}	10,6 – 10,5 ^{ns}	0,8 – 0,9 ^{ns}	92 – 91 ^{ns}
AB _{0,5} – ET ₁	10,6 – 14,4*	0,8 – 1,2*	92 – 91 ^{ns}
ET _{0,5} – ET ₁	10,5 – 14,4*	0,9 – 1,2*	91 – 91 ^{ns}

(*) e (**) significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente; (ns) não significativo.

AB_{0,5} – Água de abastecimento no volume de 0,5 litros planta/semana; ET_{0,5} – Efluente Tratado no volume de 0,5 litros planta/semana; ET₁ – Efluente Tratado no volume 1 litro planta/semana.

Foram obtidos aumentos de 44,8 (147%) e 3,8 (141%) Mg ha^{-1} em PMF e PMS, respectivamente, no tratamento ET_1 em relação ao $\text{AB}_{0,5}$. E em relação ao $\text{ET}_{0,5}$, o tratamento ET_1 representou aumentos de 74% e 86%, ou seja, 32 Mg ha^{-1} em PMF e 3 Mg ha^{-1} em PMS, respectivamente. Isto significa que a irrigação com efluente tratado, no volume de 1 L/planta/semana (ET_1), proporcionou um aumento substancial na produtividade da palma forrageira em relação à irrigação com água de abastecimento ($\text{AB}_{0,5}$) ou com efluente tratado ($\text{ET}_{0,5}$) no volume de 0,5 L/planta/semana.

A palma forrageira tem elevada capacidade de extração de nutrientes do solo (Dubeux Júnior et al., 2010) com preferência para K, Ca, N, Mg, P e S (Donato et al., 2017). A resposta positiva das plantas demonstra que a irrigação com efluente tratado, além de disponibilizar uma água que seria descartada, promoveu o aporte de nutrientes que auxiliam no crescimento da palma forrageira. Isto pode ser comprovado principalmente pelo aumento do P e Mg^{2+} disponíveis no solo (Tabela 2) que, embora seus teores sejam considerados baixo e médio, respectivamente (Donato et al., 2017; Matos et al., 2021), resultaram em ganho na produção de massa fresca e seca da palma. Os teores de Ca^{2+} ($2 - 3 \text{ cmolc kg}^{-1}$) são considerados médios no período irrigado e baixo no período não irrigado, e do K^+ classificados como baixos (CFSEMG, 1999). Em relação ao Na^+ , apesar de aumentar nos tratamentos com efluente, elevando também o PST, não foi suficiente para afetar a produtividade da palma. Além disso, após dois anos sem irrigação houve a diminuição do Na^+ trocável nas duas profundidades avaliadas (Tabela 2).

Resultados semelhantes foram obtidos por Lemos et al. (2018), com o aumento na produtividade da palma forrageira “orelha de elefante” com aplicação de efluente tratado, mesmo sendo disponibilizado em menor frequência uma mesma lâmina em relação ao controle. Essa tendência foi observada em diferentes culturas como o milho (gramínea) e repolho (olerícola), com aumento de biomassa quando irrigado com efluente tratado em relação à irrigação com água potável em região semiárida do Oriente Médio (EL-NAHHAL et al. 2013).

No segundo ciclo de cultivo (etapa 2), com o nivelamento de todos os tratamentos a uma lâmina de 0,5 L/planta/semana, observa-se que houve redução no PMF e PMS em todos os tratamentos, porém essa queda foi mais pronunciada no ET_1 (-37% no PMF e -47% PMS) em relação ao 1º ciclo de cultivo. No entanto, o ET_1 se manteve superior aos demais tratamentos ($p < 0.05$), evidenciando efeito residual do que foi aplicado no primeiro ciclo de cultivo (etapa 1). Efeito residual também foi observado por Medeiros et al. (2015) em cultivos sucessivos de algodão irrigado com água residuária proveniente da suinocultura. Neste caso, os autores verificaram efeito residual de nutrientes no tecido foliar da cultura do 1º para o 2º ciclo de cultivo.

Após a interrupção da irrigação, no 3º e 4º ciclos de cultivo (etapa 3), houve uma redução em torno de 30% do PMF e PMS no ET₁, em relação ao 2º ciclo de cultivo. Não obstante, no 3º ciclo de cultivo o ET₁ manteve-se significativamente superior para essas variáveis ($p < 0,05$) comparado ao tratamento AB_{0,5}. Não houve diferenças significativas para a variável TAC, assim como para os demais contrastes testados. No 4º ciclo de cultivo o tratamento ET₁ manteve o PMF e PMS significativamente maior do que os tratamentos AB_{0,5} e ET_{0,5}. Novamente, para a variável TAC as diferenças entre os tratamentos não foram significativas (Tabela 3).

Mesmo havendo decréscimo na produção de massa verde e seca com a interrupção da irrigação (do 2º para o 3º e 4º ciclos de cultivo), o efeito residual da aplicação do efluente foi significativo. Particularmente o tratamento com maior volume aplicado (ET₁) manteve-se superior nas variáveis de produção da palma forrageira “orelha de elefante mexicana”, embora a diferença para o tratamento com aplicação de menor volume do efluente (ET_{0,5}) não tenha sido significativa ($p > 0,05$) no 3º ciclo de cultivo. Esses resultados indicam que a irrigação com efluente tratado, mesmo em pequenas quantidades, foi suficiente para gerar um efeito residual que contribuiu com os ciclos de cultivo seguintes, sob influência somente da precipitação. Sigua et al. (2005), avaliaram a aplicação de lodo de esgoto por três anos na produtividade de forragem “*Paspalum notatum*” e seu efeito residual após dois anos da interrupção dos tratamentos. Esses autores verificaram aumento da produtividade da forragem e efeito residual após a interrupção da aplicação do lodo de esgoto. Nessa mesma perspectiva, Costa et al. (2009), verificaram efeito residual do efluente de esgoto tratado no crescimento do milho, sete meses após a interrupção da aplicação do efluente no solo, cultivado anteriormente com mamona (*Ricinus communis* L.).

As variáveis biométricas altura da planta (AP), número de cladódios (NC), largura do cladódio (LC), espessura do cladódio (EC), perímetro do cladódio (PC) e comprimento do cladódio (CC) não diferiram entre os tratamentos nos contrastes testados para o 1º ciclo de cultivo (Tabela 4). No 2º ciclo de cultivo, não houve diferença significativa entre os tratamentos AB_{0,5} e ET_{0,5}, havendo, no entanto, entre os tratamentos AB_{0,5} e ET₁ ($p < 0,05$), para todas as variáveis, bem como entre os tratamentos ET_{0,5} e ET₁, com exceção do PC e CC, com superioridade para o ET₁ em ambas as comparações. De acordo com Matos et al. (2021) uma maior fertilidade do solo influencia no aumento da produtividade da palma forrageira, mas não necessariamente determinam um melhor desempenho estrutural, o que está mais associado à práticas de manejo e ao clima.

No período não irrigado (ciclos de cultivo 3º e 4º), não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos AB_{0,5} e ET_{0,5} para todas as variáveis analisadas. Entretanto, comparando AB_{0,5} e ET₁ houve diferença significativa ($p < 0,05$), para as variáveis AP, NC e

CC, no 3º ciclo de cultivo, e apenas para as variáveis AP e NC no 4º ciclo de cultivo. Na comparação entre o ET_{0,5} e ET₁, observaram-se diferenças apenas para AP e LC no 3º ciclo de cultivo da Palma Forrageira.

De acordo com esses resultados houve uma tendência de diminuição do 1º para o 2º ciclo de cultivo em todas as variáveis, com exceção do NC, nos tratamentos AB_{0,5} e ET_{0,5}. Em contrapartida, no ET₁ houve tendência de aumento em todas as variáveis no segundo ciclo de cultivo, com exceção do PC e CC. Tal resultado pode ser atribuído ao efeito residual do efluente aplicado em maior volume (ET₁) no 1º ciclo em adição ao que foi aplicado no 2º ciclo de cultivo. No período não irrigado, observa-se também o efeito residual da aplicação do efluente, principalmente do tratamento ET₁. Não obstante, uma pequena diminuição das variáveis AP e NC pode ser observada entre os ciclos 3º e 4º, para todos os tratamentos. Em contrapartida, houve um aumento para as demais variáveis (Tabela 4) provavelmente devido à maior duração do 4º ciclo (423 DAC) em relação ao 3º ciclo de cultivo (316 DAC).

Tabela 4. Contrastes ortogonais e valores médios (n=20) das variáveis biométricas da palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana submetida a tratamentos de irrigação com água de reúso (ET_{0,5} e ET₁) e abastecimento (AB_{0,5}) (ciclos 1 e 2) e sem irrigação (ciclos 3 e 4) no Semiárido brasileiro.

Tratamentos	AP (cm)	NC	LC (cm)	EC (mm)	PC (cm)	CC (cm)
			1º Ciclo de cultivo (irrigado)			
AB _{0,5} – ET _{0,5}	42,09 – 43,07 ^{ns}	2,9 – 3,8 ^{ns}	22,8 – 23,1 ^{ns}	12,2 – 12,7 ^{ns}	73,0 – 75,4 ^{ns}	26,2 – 26,2 ^{ns}
AB _{0,5} – ET ₁	42,09 – 42,49 ^{ns}	2,9 – 5,1 ^{ns}	22,8 – 22,3 ^{ns}	12,2 – 12,95 ^{ns}	73,0 – 73,5 ^{ns}	26,2 – 25,6 ^{ns}
ET _{0,5} – ET ₁	43,07 – 42,49 ^{ns}	3,8 – 5,1 ^{ns}	23,1 – 22,3 ^{ns}	12,7 – 12,95 ^{ns}	75,4 – 73,5 ^{ns}	26,2 – 25,6 ^{ns}
			2º Ciclo de cultivo (irrigado)			
AB _{0,5} – ET _{0,5}	39,68 – 41,58 ^{ns}	3,4 – 3,9 ^{ns}	20,9 – 21,03 ^{ns}	11,2 – 11,2 ^{ns}	66,3 – 66,7 ^{ns}	23,3 – 23,4 ^{ns}
AB _{0,5} – ET ₁	39,68 – 47,02*	3,4 – 5,1*	20,9 – 22,4*	11,2 – 13,1*	66,3 – 70,5*	23,3 – 24,8*
ET _{0,5} – ET ₁	41,58 – 47,02*	3,9 – 5,1*	21,03 – 22,4*	11,2 – 13,1*	66,7 – 70,5 ^{ns}	23,4 – 24,8 ^{ns}
			3º Ciclo de cultivo (sequeiro)			
AB _{0,5} – ET _{0,5}	35,26 – 35,71 ^{ns}	2,8 – 3,5 ^{ns}	16,1 – 15,6 ^{ns}	6,52 – 6,78 ^{ns}	49,4 – 48,9 ^{ns}	18,2 – 18,8 ^{ns}
AB _{0,5} – ET ₁	35,26 – 40,03*	2,8 – 4,0*	16,1 – 17,0 ^{ns}	6,52 – 7,50 ^{ns}	49,4 – 51,4 ^{ns}	18,2 – 19,6*
ET _{0,5} – ET ₁	35,71 – 40,03*	3,5 – 4,0 ^{ns}	15,6 – 17,0*	6,78 – 7,50 ^{ns}	48,9 – 51,4 ^{ns}	18,8 – 19,6 ^{ns}
			4º Ciclo de cultivo (sequeiro)			
AB _{0,5} – ET _{0,5}	33,38 – 34,78 ^{ns}	2,6 – 3,0 ^{ns}	21,0 – 21,2 ^{ns}	9,23 – 9,70 ^{ns}	56,7 – 56,9 ^{ns}	24,3 – 24,7 ^{ns}
AB _{0,5} – ET ₁	33,38 – 36,93*	2,6 – 3,4*	21,0 – 22,1 ^{ns}	9,23 – 9,86 ^{ns}	56,7 – 60,5 ^{ns}	24,3 – 26,5 ^{ns}
ET _{0,5} – ET ₁	34,78 – 36,93 ^{ns}	3,0 – 3,4 ^{ns}	21,2 – 22,1 ^{ns}	9,70 – 9,86 ^{ns}	56,9 – 60,5 ^{ns}	24,7 – 26,5 ^{ns}

(*) significativo a 5% de probabilidade; (ns) não significativo.

AB_{0,5} – Água de abastecimento no volume de 0,5 litros planta/semana; ET_{0,5} – Efluente Tratado no volume de 0,5 litros planta/semana; ET₁ – Efluente Tratado no volume 1 litro planta/semana.

AP= Altura da Planta; NC= Número de cladódios; LC= Largura do Cladódio; EC= Espessura do cladódio; PC= Perímetro do cladódio; CC= Comprimento do Cladódio.

Os indicadores de eficiência do uso da água, produtividade da água da cultura (PAC) e produtividade econômica da água (PEA), usando como referência os valores acumulados da irrigação e precipitação pluviométrica, de modo geral, foram melhores para os tratamentos com efluente tratado (Tabela 5).

Tabela 5. Contrastes ortogonais e valores médios da produtividade da água da cultura (PAC) em base fresca e seca, e produtividade econômica da água (PEA) com base na irrigação + precipitação da palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana submetida a tratamentos de irrigação com água de reúso e abastecimento (ciclos 1º e 2º) e sem irrigação (ciclos 3º e 4º) no Semiárido brasileiro

Tratamento	PAC (BF) Kg MV ha ⁻¹ mm ⁻¹	PAC (BS) Kg MS ha ⁻¹ mm ⁻¹	Preço R\$ unid. ⁻¹	Ganho Bruto R\$ ha ⁻¹	PEA R\$ ha ⁻¹ mm ⁻¹
1º Ciclo de cultivo					
AB _{0,5} – ET _{0,5}	60,71 – 86,25 ^{ns}	5,36 – 7,14 ^{ns}	0,25	14.500 ¹	28,87 – 37,33 ^{ns}
AB _{0,5} – ET ₁	60,71 – 136,93 [*]	5,36 – 11,87 [*]	0,25	18.750 ²	28,87 – 46,39 [*]
ET _{0,5} – ET ₁	86,25 – 136,93 [*]	7,14 – 11,87 [*]	0,25	25.500 ³	37,33 – 46,39 ^{ns}
2º Ciclo de cultivo					
AB _{0,5} – ET _{0,5}	78,70 – 93,71 ^{ns}	5,62 – 6,99 ^{ns}	0,25	16.750 ¹	47,65 – 55,66 ^{ns}
AB _{0,5} – ET ₁	78,70 – 118,76 [*]	5,62 – 7,92 [*]	0,25	19.562 ²	47,65 – 63,46 [*]
ET _{0,5} – ET ₁	93,71 – 118,76 ^{ns}	6,99 – 7,92 ^{ns}	0,25	25.312 ³	55,66 – 63,46 [*]
3º Ciclo de cultivo					
AB _{0,5} – ET _{0,5}	14,54 – 17,21 ^{ns}	1,92 – 2,68 ^{ns}	0,25	14.375 ¹	21,63 – 25,96 ^{ns}
AB _{0,5} – ET ₁	14,54 – 21,91 [*]	1,92 – 3,46 [*]	0,25	17.225 ²	21,63 – 31,14 ^{**}
ET _{0,5} – ET ₁	17,21 – 21,91 ^{ns}	2,68 – 3,46 ^{ns}	0,25	20.687 ³	25,96 – 31,14 [*]
4º Ciclo de cultivo					
AB _{0,5} – ET _{0,5}	39,42 – 39,03 ^{ns}	3,12 – 3,43 ^{ns}	0,25	13.250 ¹	49,09 – 54,88 ^{ns}
AB _{0,5} – ET ₁	39,42 – 53,35 [*]	3,12 – 4,59 [*]	0,25	14.812 ²	49,09 – 63,44 [*]
ET _{0,5} – ET ₁	39,03 – 53,35 [*]	3,43 – 4,59 [*]	0,25	17.125 ³	54,88 – 63,44 ^{ns}

(*) e (**) significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente; (ns) não significativo. BF = Base Fresca; BS = Base Seca. AB_{0,5} – Água de abastecimento no volume de 0,5 litros planta/semana; ET_{0,5} – Efluente Tratado no volume de 0,5 litros planta/semana; ET₁ – Efluente Tratado no volume 1 litro planta/semana. 1 – AB_{0,5}; 2 – ET_{0,5}; 3 – ET₁.

No 1º ciclo de cultivo (etapa 1), a PAC diferiu ($p < 0,05$) entre os tratamentos, tanto em base fresca quanto em base seca. O ET₁ obteve uma conversão de 137 e 12 kg de massa verde e seca, respectivamente, a cada milímetro de irrigação + precipitação que entrou no sistema. Dessa forma, o ET₁ representou um aumento de 125% e 121% em base fresca e seca, em relação ao AB_{0,5}, respectivamente, e 59% e 66% em base fresca e seca, em relação ao ET_{0,5} respectivamente. Silva et al. (2014) relataram um valor de PAC de 105 kg MV ha⁻¹ mm⁻¹ em um cultivo de Palma Forrageira “Orelha de Elefante Mexicana”, no semiárido brasileiro em sistema de sequeiro, menor, portanto, que o obtido no tratamento ET₁ neste trabalho.

Em relação à produtividade econômica da água (PEA), adotando preços individuais de cladódios e ganhos brutos por área (Tabela 5), ainda no 1º ciclo de cultivo houve diferença

significativa somente entre os tratamentos ET_1 e $AB_{0,5}$. Neste caso, o melhor desempenho, obtido no tratamento com efluente tratado (ET_1), indica que a cultura retornou ao agricultor R\$ 46,39 por hectare, para cada mm de água que entrou no sistema.

No 2º ciclo de cultivo (etapa 2), houve efeito significativo ($p < 0,05$) para a produtividade da água na cultura (PA_c) apenas entre os tratamentos ET_1 e $AB_{0,5}$, com um aumento de 50,9% em base fresca e 41% em base seca, no tratamento com efluente em relação à água de abastecimento. No entanto, para a produtividade econômica da água (PEA) houve diferença significativa entre a aplicação do efluente em maior volume (ET_1) representando um ganho de 15,81 e 7,8 R\$ $ha^{-1} mm^{-1}$ em relação ao $AB_{0,5}$ e $ET_{0,5}$, respectivamente.

Comparando o 1º com o 2º ciclo de cultivo, no tratamento ET_1 , houve um aumento de 17,07 R\$ $ha^{-1} mm^{-1}$ na produtividade econômica da água (PEA). Isto indica uma maior eficiência no 2º ciclo, mesmo com menor entrada de água via irrigação + precipitação (399 mm) em relação ao primeiro ciclo (549 mm), uma vez que manteve um número de cladódios por hectare praticamente o mesmo, como mostra a tabela 4. Rahil e Qanadillo (2015), observaram uma maior eficiência no uso da água pela *Cucumis sativus* L. quando irrigada com 70% da necessidade da cultura, comparado à 100%, em condições de casa de vegetação.

Após a interrupção da irrigação, no 3º ciclo de cultivo, houve efeito significativo para PA_c somente no ET_1 em relação ao uso de água de abastecimento ($AB_{0,5}$), com efluente mantendo-se superior, obtendo aumento de 50% em base fresca e aumento expressivo em base seca de 80,2%, não havendo diferença entre $AB_{0,5}$ e $ET_{0,5}$. Enquanto para PEA, houve diferença significativa do ET_1 em relação aos demais tratamentos ($AB_{0,5}$ e $ET_{0,5}$).

Comparando o 2º ciclo de cultivo (etapa 2, irrigado) com o 3º ciclo de cultivo (etapa 3, sequeiro), observa-se redução acentuada da produtividade da água (PA_c) em todos os tratamentos. Apesar do decréscimo, o total acumulado em precipitação no 3º ciclo foi de 664 mm, maior, por tanto, do que 2º ciclo com 399 mm valor acumulado da precipitação + irrigação. Esses resultados novamente demonstram que o uso de efluente tratado resulta no aumento da eficiência no uso da água pela Palma Forrageira “Orelha de Elefante Mexicana”.

No 4º ciclo de cultivo, também não houve diferença significativa ($p > 0,05$) entre os tratamentos $AB_{0,5}$ e $ET_{0,5}$ para PA_c , havendo, no entanto, entre ET_1 e $AB_{0,5}$ em base fresca e seca. Os tratamentos com o uso de efluente (ET_1 e $ET_{0,5}$) também diferiram entre si quanto à produtividade da água em base fresca e seca (53,35 – 39,03 Kg MV $ha^{-1} mm^{-1}$ e 4,59 – 3,43 Kg MS $ha^{-1} mm^{-1}$, respectivamente).

A produtividade econômica da água (PEA) revelou uma alta eficiência no 4º ciclo em relação aos demais ciclos, uma vez que manteve um número médio de cladódios por hectare

equivalente aos ciclos anteriores. Isto, resultou em maior ganho bruto de 17.125 R\$ ha⁻¹ no 4º ciclo, mesmo recebendo menor quantidade de água (270 mm).

4. CONCLUSÕES

O período irrigado com efluente de esgoto (2013 – 2015) aumentou o teor de nutrientes e PST no solo e após a interrupção da irrigação (2015 – 2017), houve aumento do P disponível e diminuição dos cátions básicos e PST. A maior produtividade em massa fresca e seca da palma forrageira “Orelha de Elefante Mexicana” foi obtida no tratamento que recebeu 1 L de efluente tratado planta/semana, chegando a mais que dobrar a produtividade em relação ao irrigado com água de abastecimento no volume de 0,5 L/planta/semana. E o efeito residual do efluente tratado (ET₁) aplicado no 1º ciclo promoveu aumentos na produtividade até o 4º ciclo consecutivo de cultivo. A eficiência no uso da água da Palma Forrageira também foi maior no tratamento com uso de 1 L de efluente tratado por semana (ET₁). A maior produtividade da água na cultura para esse tratamento revelou-se já no 1º ciclo de cultivo, porém a maior produtividade econômica da água (PEA) só se constatou no 2º ciclo de cultivo. O efluente tratado promoveu uma maior eficiência no uso da água e produtividade econômica pela Palma forrageira “Orelha de Elefante Mexicana”.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Nacional do Semiárido (INSA) pela estrutura experimental e analítica, e ao apoio do Observatório Nacional da Dinâmica da Água e Carbono no Bioma Caatinga – ONDACBC apoiado pela FACEPE (outorgas: APQ-0296-5.01 / 17; APQ-0498-3.07 / 17 ONDACBC; APQ-0532- 5.01 / 14). E à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa (nº 88882.441607 / 2019-01) ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

ABEGUNRIN, T. P.; AWE, G. O.; IDOWU, D. O.; ADEJUMOBI, M. A. Impact of wastewater irrigation on soil physico-chemical properties, growth and water use pattern of two indigenous vegetables in southwest Nigeria. **Catena**, 139, 167-178, 2016.

AHMAD, A.; ARIF, M. S.; YASMEEN, T.; RIAZ, M.; RIZWAN, M.; SHAHZAD, S. M.; ALI, S.; RIAZ, M. A.; SAROSH, M. Seasonal variations of soil phosphorus and associated fertility indicators in wastewater-irrigated urban aridisol. **Chemosphere**, 239, 124725, 2020.

ADROVER, M.; MOYÀ, G.; VADELL, J. Seasonal and depth variation of soil chemical and biological properties in alfalfa crops irrigated with treated wastewater and saline groundwater. **Geoderma**, 286, 54-63, 2017.

ARAYA, A.; STROOSNIJDER, L.; GIRMAY, G.; KEESSTRA, S.D. Crop coefficient, yield response to water stress and water productivity of teff (*Eragrostis tef* (Zucc.). **Agricultural Water Management**, n.98, p.775-783, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.12.001>

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Reconhecimento Exploratório e Pesquisa de Solos do Estado Paraíba**. Boletim 15, Série Pedologia, 8, Rio de Janeiro, 1972.

CAMPOS, M. C. C.; QUEIROZ, S. B. Reclassificação dos perfis descritos no Levantamento Exploratório-Reconhecimento de solos do estado da Paraíba. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, 6(1), 45-50. 2006.

CFSEMG - Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5. aproximação. Viçosa, MG, Brazil, p. 359.

CHAKRABARTI, C. Residual effects of long-term land application of domestic wastewater. **Environment International**, 21.3: 333-339. 1995.

COSTA, F. X.; LIMA, V. L.; BELTRÃO, N. E. D. M.; AZEVEDO, C. A.; SOARES, F. A.; ALVA, I. D. Efeitos residuais da aplicação de biossólidos e da irrigação com água residuária no crescimento do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 13(6), 687-693, 2009.

CURCIO, G. R.; LIMA, V. C.; GIAROLA, N. F. B. **Antropossolos: Proposta de Ordem (1ª aproximação)**. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2004.

DICKIN, S. K.; SCHUSTER-WALLACE, C. J.; QADIR, M.; PIZZACALLA, K. A review of health risks and pathways for exposure to wastewater use in agriculture. **Environ Health Perspect** 124:900–909, 2016. <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1509995>

Donato, S.L.R., Donato, P.E.R., Silva, J.A. da, Rodrigues, M.G.V., 2017c. Diagnóstico nutricional e recomendação de adubação para a cactus pear ‘Gigante’. *Inf. Agropecu.* (Belo Horiz.) 38 (296), 46–58.

DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; ARAÚJO FILHO, J. T.; SANTOS, M. V. F.; LIRA, M. A.; SANTOS, D. C.; PESSOA, R. A. S. Adubação mineral no crescimento e composição mineral da palma forrageira – Clone IPA-201. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, p. 129-135, 2010. <https://doi.org/10.5039/agraria.v5i1a591>.

ELFANSSI, SALOUA; OUAZZANI, NAAILA; MANDI, LAILA. Soil properties and agro-physiological responses of alfalfa (*Medicago sativa* L.) irrigated by treated domestic wastewater. **Agricultural water management**, 2018, 202: 231-240.

EL-NAHHAL, Y.; TUBAIL, K.; SAFI, M.; SAFI, J. Effect of treated wastewater irrigation on plant growth and soil properties in Gaza Strip, Palestine. **American Journal of Plant Sciences**, v. 4, n. 9, p. 1736, 2013.

FERREIRA, D.F. SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, Recife, v. 6, p. 36-41, 2008.

GALVIS, A.; JARAMILLO, M. F.; VAN DER STEEN, P.; GIJZEN, H. J. Financial aspects of reclaimed wastewater irrigation in three sugarcane production areas in the Upper Cauca river Basin, Colombia. **Agricultural water management**, 209, 102-110. 2018.

GEERTS, S.; RAES, D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1275-1284, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.009>

HUANG, Z.; DUNKERLEY, D.; LÓPEZ-VICENTE, M.; WU, G.-L. Trade-offs of dryland forage production and soil water consumption in a semi-arid area. **Agricultural Water Management**, 241, 106349, 2020. doi:10.1016/j.agwat.2020.106349

Hussain, M. I., Muscolo, A., Farooq, M., & Ahmad, W. (2019). Sustainable use and management of non-conventional water resources for rehabilitation of marginal lands in arid and semiarid environments. *Agricultural Water Management*, 221, 462–476. doi:10.1016/j.agwat.2019.04.014

JETHWA, K.; BAJPAI, S.; CHAUDHARI, P. K. Application of a Low-Cost Technology to Treat Domestic Sewage and to Improve Fertility of a Barren Lateritic Soil. In *Environmental Processes and Management* (pp. 201-223). **Springer**, Cham, 2020.

LEMOS, M.; FERREIRA NETO, M.; MEDEIROS, J.F.; DIAS, N.S.; SILVA, E. F. F. E.; LIRA, R.B. Nutritional evaluation of forage cactus fertigated with domestic sewage effluent. **Revista Caatinga**, v. 31, p. 476-486, 2018.

LIBUTTI, A.; GATTA, G.; GAGLIARDI, A.; VERGINE, P.; POLLICE, A.; BENEDUCE, L.; DISCIGLIO, G.; TARANTINO, E. Agro-industrial wastewater reuse for irrigation of a vegetable crop succession under Mediterranean conditions. **Agricultural Water Management**, 196, 1-14. 2018.

LIRA, R.; SANTOS, A.; SILVA, J.; BARNABÉ, J.; BARROS, M.; SOARES, H. A utilização de água de qualidade inferior na agricultura irrigada. **Revista GEAMA (Online)**, v. 3, n. 1, p. 62-83, 2015.

MARTINS, E. L.; SOUZA, R. F. S.; FRAGA, V. S.; MEDEIROS, S. S. Effects of Treated Wastewater on Soil Recovery in Degraded Semiarid Region. *Journal of Experimental Agriculture International*, 41(6), 1-7. (2019). <https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v41i630430>

MATOS, L. V.; DONATO, S. L. R.; KONDO, M. K.; LANI, J. L.; ASPIAZÚ, I. Soil attributes and the quality and yield of ‘Gigante’ cactus pear in agroecosystems of the semiarid region of Bahia. **Journal of Arid Environments**, 185, 104325, 2021.

MEDEIROS, S. S.; PEREZ-MARIN, A. M.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; REIS, C. F.; GHEYI, H. R. Potencial hídrico-nutricional da água residuária de suinocultura na irrigação do algodoeiro cultivado em condições semiáridas. **Revista Irriga**, 20.2: 248-260, 2015.

MEDEIROS, S. S.; SOARES, ANTÔNIO A.; FERREIRA, PAULO A.; NEVES, JÚLIO C. L.; SOUZA, JOSÉ A. Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: estudo do estado nutricional do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online)**, v. 12, p. 109-115, 2008.

MUSAZURA, W.; ODINDO, A. O.; TESFAMARIAM, E. H.; HUGHES, J. C.; BUCKLEY, C. A. (2019). Nitrogen and phosphorus dynamics in plants and soil fertigated with decentralised wastewater treatment effluent. **Agricultural Water Management**, 215, 55-62.

ODOEMENA, K. I.; ROWSHON, K. M. D.; BINTI, C. M. H. Advances in utilization of wastewater in agricultural practice: a technical note. **Irrigation and Drainage**, 69(1), 149-163, 2020.

OLIVEIRA, P. C. P. D.; GLOAGUEN, T. V.; GONÇALVES, R. A. B.; SANTOS, D. L.; COUTO, C. F. Soil Chemistry after Irrigation with Treated Wastewater in Semiarid Climate. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016.

PETOUSI, I.; FOUNTOULAKIS, M. S.; SARU, M. L.; NIKOLAIDIS, N.; FLETCHER, L.; STENTIFORD, E. I.; MANIOS, T. Effects of reclaimed wastewater irrigation on olive (*Olea europaea* L. cv. 'Koroneiki') trees. **Agricultural Water Management**, 160, 33-40. 2015.

PORDEUS NETO, J.; SOARES, P. C.; BATISTA, Â. M. V.; ANDRADE, S. F.; ANDRADE, R. P.; LUCENA, R. B.; GUIM, A. Balanço hídrico e excreção renal de metabólitos em ovinos alimentados com palma forrageira (*Nopalea cochenillifera* Salm Dyck). **Pesquisa Veterinária Brasileira**, 36(4), 322-328, (2016).

RAHIL, M. H.; QANADILLO, Alia. Effects of different irrigation regimes on yield and water use efficiency of cucumber crop. **Agricultural water management**, 2015, 148: 10-15.

SIGUA, G.; ADJEI, M.; RECHCIGL, J. Cumulative and residual effects of repeated sewage sludge applications: forage productivity and soil quality implications in South Florida, USA (9 pp). **Environmental Science and Pollution Research**, 12(2), 80-88, 2005.

SILVA, T. G. F.; PRIMO, J. T. A.; MOURA, M. S. B. D.; SANTOS, D. C. D.; SILVA, M. D. C.; ARAÚJO, J. E. M. Indicadores de eficiência do uso da água e de nutrientes de clones de palma forrageira em condições de sequeiro no Semiárido brasileiro. **Bragantia**, 2014, 73.2: 184-191.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual of soil analysis methods. 3 ed. Brasilia. 573; 2017.

UNGUREANU, N.; VLĂDUȚ, V.; VOICU, G. (2020). Water Scarcity and Wastewater Reuse in Crop Irrigation. *Sustainability*, 12(21), 9055.

WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, 2014, 106.

ZEMA, D. A.; BOMBINO, G.; ANDILORO, S.; ZIMBONE, S. M. Irrigation of energy crops with urban wastewater: Effects on biomass yields, soils and heating values. **Agricultural Water Management**, 115, 55-65, 2012.

CAPÍTULO III

CRESCIMENTO E CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DA MADEIRA DE ARBÓREAS IRRIGADAS COM ÁGUA RESIDUÁRIA EM SOLO DEGRADADO DO SEMIÁRIDO

RESUMO

O manejo de espécies florestais na recuperação de áreas degradadas de regiões semiáridas tem como os principais fatores limitantes a disponibilidade de água e nutrientes. Os efluentes de esgoto podem representar uma alternativa de suprimento de água e nutrientes, porém, seu uso excessivo também pode causar efeitos negativos. Sabe-se pouco sobre a influência da irrigação com efluente de esgoto no padrão de crescimento, produtividade e características energéticas da madeira de espécies arbóreas. Dessa forma, o objetivo da pesquisa foi avaliar o crescimento, produtividade e as características energéticas da madeira de duas espécies florestais do semiárido brasileiro, submetidas a irrigação deficitária de efluente de esgoto por gotejamento nos dois primeiros anos e sem irrigação nos dois anos posteriores em solo degradado. Para tanto, foi realizado um experimento em campo em sistema agroflorestal com duas espécies florestais nativas da Caatinga com potencial madeireiro: sabiá (*Mimosa ceasalpinifolia*) e aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão) em consórcio com a palma forrageira (*Opuntia stricta*). Os tratamentos com irrigação foram aplicados nos primeiros 2 anos (2013 a 2015), sendo estes no primeiro ano: água de abastecimento no volume de 0,5 L planta/semana (AB_{0,5}), efluente tratado no volume de 0,5 L planta/semana (ET_{0,5}) e efluente tratado no volume de 1 L planta/semana (ET₁). No segundo ano todos os tratamentos foram nivelados no volume de 0,5 L/planta/semana, e nos anos seguintes (2015 a 2017), houve a interrupção de todos os tratamentos do sistema de irrigação. Foram monitoradas mensalmente, até o 3º ano, a altura total, o diâmetro de base e diâmetro altura do peito, nas quais foi realizado o ajuste de modelo das curvas de crescimento. Ao final do 4º ano foram abatidas todas as árvores, calculado a produção de madeira e retirada amostras para análises energéticas da madeira das duas espécies. O modelo de Richards se ajustou satisfatoriamente às variáveis de crescimento para o Sabiá e para Aroeira. Os sais presentes na água residuária aplicada nos dois primeiros anos diminuiu o crescimento e produção de madeira do Sabiá. O Efluente Tratado no volume de 1 L/semana aumentou o Rendimento em Líquido Condensado e diminuiu os Materiais Voláteis (MV) do Sabiá, enquanto na Aroeira aumentou a Densidade Básica e MV, com diminuição do Rendimento Gravimétrico.

Palavras-chave: Água de reuso, *Mimosa ceasalpinifolia*, *Myracrodruon urundeuva* Allemão, irrigação deficitária.

GROWTH AND ENERGY CHARACTERISTICS OF ARBOREAL WOOD IRRIGATED WITH TREATED EFFLUENT IN DEGRADED SOIL OF THE SEMI- ARID

ABSTRACT

The management of forest species in the recovery of degraded areas of semi-arid regions has as main limiting factors the availability of water and nutrients. Sewage effluents may represent an alternative to supply water and nutrients, but their overuse can also cause negative effects. Little is known about the influence of irrigation with sewage effluent on the pattern of growth, productivity and energy characteristics of wood of tree species. Thus, the objective of the research was to evaluate the growth, productivity and energy characteristics of the wood of two forest species of the Brazilian semi-arid region, submitted to deficient irrigation of sewage effluent by drip in the first two years and without irrigation in the two subsequent years in degraded soil. For this, a field experiment was carried out in the agroforestry system with two native forest species of the Caatinga with logging potential: thrush (*Mimosa ceasalpinifolia*) and aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão) in consortium with forage palm (*Opuntia stricta*). The treatments with irrigation were applied in the first 2 years (2013 to 2015), these in the first year: water supply in the volume of 0.5 L plant/week (AB_{0.5}), effluent traded in the volume of 0.5 L plant/week (ET_{0.5}) and effluent treated in the volume of 1 L plant/week (ET₁). In the second year all treatments were leveled in the volume of 0.5 L/plant/week, and in the following years (2015 to 2017), all treatments of the irrigation system were discontinuation. The total height, base diameter and diameter of the breast were monitored monthly, up to the 3rd year, in which the model adjustment of the growth curves was performed. At the end of the 4th year, all trees were felled, wood production was calculated and samples were taken for energy analyses of the wood of the two species. Richards' model adjusted satisfactorily to the growth variables for Sabiá and Aroeira. The salts present in the wastewater applied in the first two years decreased the growth and production of Sabiá wood. The Treated Effluent in the volume of 1 L/week increased the Yield in Condensed Liquid and decreased the Volatile Materials (MV) of Sabiá, while in Aroeira increased the Basic Density and MV, with decreased Gravimetric Yield.

Keywords: Reuse water, *Mimosa ceasalpinifolia*, *Myracrodruon urundeuva* Allemão, deficient irrigation.

1. INTRODUÇÃO

O cultivo de espécies florestais, em áreas degradadas de regiões semiáridas, é indicado em programas de restauração ambiental e no manejo de agroecossistemas. No entanto, a disponibilidade de água e nutrientes nesses ambientes são os fatores mais limitantes para o crescimento das plantas (Lü e Han, 2010; Pareyn, et al. 2020), o que requer estratégias que viabilizem o desenvolvimento das espécies e não sobrecarregue os recursos hídricos disponíveis.

O Semiárido brasileiro é uma das regiões secas mais populosas do mundo (INSA, 2010; Rufino e Silva 2017), a qual, recentemente, passou pela pior crise hídrica já registrada (2010-2016) (ARAÚJO, et al. 2017). Além disso, processos de degradação ambiental, culminam em sérios prejuízos econômicos e sociais, a partir do declínio da produção agrícola e geração de recursos financeiros (LIRA, et al. 2015). Desse modo, há necessidade de mudança dos modelos de exploração, principalmente agrícolas, para status mais sustentáveis, que privilegiem a manutenção da vegetação arbórea como em sistemas silvipastoris e agrosilvipastoris (SAMPAIO e SALCEDO, 2008). Aliado a isto, o uso de tecnologias alternativas, para o enriquecimento e ou recuperação dos solos degradados, devem ser aplicadas.

Os efluentes de origem doméstica podem representar uma alternativa para reduzir a escassez hídrica e promover a recuperação de solos degradados. Além disso, o uso desses efluentes pode se refletir em incremento na produção silvicultural. Os efeitos da aplicação dos efluentes de esgoto, quando bem manejados, são diversos, como o aporte e reciclagem da matéria orgânica e de nutrientes, gerando benefícios químicos, físicos e biológicos ao solo. Ademais, o uso do efluente conserva a água disponível e minimiza as descargas de esgoto nos corpos de água, corroborando a conservação ambiental (MEDEIROS, et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2016).

O sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth) da família Fabaceae, é de porte médio (até 5 m) e rápido crescimento, enquanto a aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão) da família Anacardiaceae, de grande porte (20 à 30 m) tem crescimento lento a moderado. Ambas são espécies nativas do semiárido brasileiro e de potencial principalmente madeireiro, mas que têm uso versátil, desde forragem ao uso medicinal (Coradin, et al. 2018), sendo estas, portanto, de interesse econômico. Os impactos da irrigação com efluentes de esgoto tratados, em espécies arbóreas, ainda são pouco conhecidos (Farahat e Linderholm, 2015), especialmente no padrão de crescimento, produtividade e nas características energéticas da madeira.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o crescimento, produtividade e as características energéticas da madeira de duas espécies florestais do semiárido brasileiro, submetidas a aplicação de efluente de esgoto em pequenas quantidades nos dois primeiros anos e sem irrigação nos dois anos posteriores.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área experimental

O estudo foi desenvolvido na área experimental da sede do Instituto Nacional do Semiárido (INSA) no município de Campina Grande, PB. A região apresenta clima semiárido quente e seco (AS'), com estação chuvosa de março a julho, com grandes flutuações anuais. O relevo local suavemente ondulado contribui para o predomínio de Planossolos Nátricos (Brasil, 1972; Campos e Queiroz, 2006). Na área do experimento os seus horizontes superficiais foram removidos pela construção civil, tendo dessa forma sofrido processo de “truncamento” que expôs os horizontes subsuperficiais. O solo apresenta como principais características pedregosidade e pouca profundidade. A granulometria do solo foi realizada conforme (Teixeira et al. 2017) e a textura foi classificada como “franco arenosa” e suas características químicas são descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização química do solo degradado antes da aplicação dos tratamentos com água residuária tratada, nas camadas 0 – 15 e 15 – 30 cm, no Semiárido paraibano -BR.

Prof.	pH 1:2,5	P	Al ³⁺	H+Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SB	T	t	V	m
	H ₂ O	mg.Kg ⁻¹	-----cmol _c .Kg ⁻¹ -----								-----%-----		
0 - 15	6,07	8,14	0,1	3,29	0,27	0,23	0,21	0,02	0,74	4,0	0,84	19,05	12,45
15 - 30	6,37	4,07	0,1	2,87	0,28	0,18	0,16	0,01	0,64	3,5	0,74	18,60	16,04

Prof. = Profundidade

2.2. Descrição e delineamento experimental

O experimento foi conduzido em uma área 780 m², na qual foram plantadas 195 mudas de 2 espécies nativas da Caatinga com potencial madeireiro: sabiá (*Mimosa ceasalpinifolia*) e aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Allemão). O plantio das mudas foi feito em nível colocando 01 (uma) muda por cova com dimensões de 30 x 30 x 30 cm e espaçamento 2,0 x 2,0 m e, a adubação de fundação foi realizada com 1 kg de matéria orgânica por cova. O experimento foi montado em sistema agroflorestal consorciado com 1560 raquetes de palma forrageira: orelha de elefante mexicana (*Opuntia stricta*), plantadas em fileira dupla.

Foi utilizada a água do sistema de abastecimento do INSA, proveniente da captação de água da chuva, e a água de reúso derivada do esgoto gerado nas dependências da sede administrativa do INSA a qual conta com banheiros e copas. O esgoto passou por tratamento primário e secundário na estação de tratamento de efluentes do INSA, o qual consiste numa sequência de tanques de filtragem, e depois por cisterna séptica para sedimentação, para em seguida ser bombeada usando sistema de gotejamento com gotejadores autocompensantes, cuja caracterização química encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização química da água de abastecimento e da água residuária tratada utilizada na irrigação de um solo degradado, no município de Campina Grande, PB.

Parâmetro	Unidade	Água	
		Abastecimento	Residuária
pH	-	7,5	8,3
CE	dS m ⁻¹	0,79	1,35
COT	mg L ⁻¹	1,72	3,7
N	mg L ⁻¹	0,28	26,3
NH ₄ ⁺	mg L ⁻¹	-	22,3
NO ₂ ³⁻	mg L ⁻¹	-	4,5
P	mg L ⁻¹	1,68	14
PO ₄ ³⁻	mg L ⁻¹	-	9,4
K ⁺	mg L ⁻¹	5,4	27,6
Ca ⁺²	mg L ⁻¹	11,2	24,5
Mg ⁺²	mg L ⁻¹	6,4	10,7
SO ₄ ³⁻	mg L ⁻¹	-	51,9
Na ⁺	mg L ⁻¹	9,1	22,3
Cl ⁻		178	270

CE- condutividade elétrica; COT- carbono orgânico total; N- nitrogênio total; NH₄⁺- nitrogênio amoniacal; NO₂³⁻- nitratos; P- fósforo total; PO₄³⁻- fosfatos; K⁺- potássio; Ca⁺²- cálcio; Mg⁺²- magnésio; SO₄³⁻-sulfatos, Na⁺,-sódio, Cl⁻-cloro.

A implantação do experimento se deu em julho do ano de 2013 e teve duração de 4 anos, onde os tratamentos com irrigação foram aplicados nos primeiros 2 anos (2013 a 2015). No primeiro ano os tratamentos foram: água de abastecimento no volume de 0,5 L planta/semana (AB_{0,5}), efluente tratado no volume de 0,5 L planta/semana (ET_{0,5}) e efluente tratado no volume de 1 L planta/semana (ET₁). No segundo ano todos os tratamentos foram nivelados no volume de 0,5 L/planta/semana, sendo dessa forma, AB_{0,5} – água de abastecimento no volume de 0,5 L/planta/semana; ET_{0,5} – efluente tratado no volume de 0,5 L/planta/semana e; ET₁ – efluente tratado também no volume de 0,5 L planta/semana. Nos anos seguintes (2015 a 2017), houve a interrupção de todos os tratamentos do sistema de irrigação, passando o cultivo a ser avaliado em sistema de sequeiro, contando apenas com a precipitação pluviométrica para entrada de água no sistema de cultivo

A precipitação e temperatura foram monitoradas durante o tempo experimental por meio de estação meteorológica localizada a 100 metros do experimento (Figura 1). O arranjo experimental foi em blocos casualizados, com três tratamentos e 10 repetições.

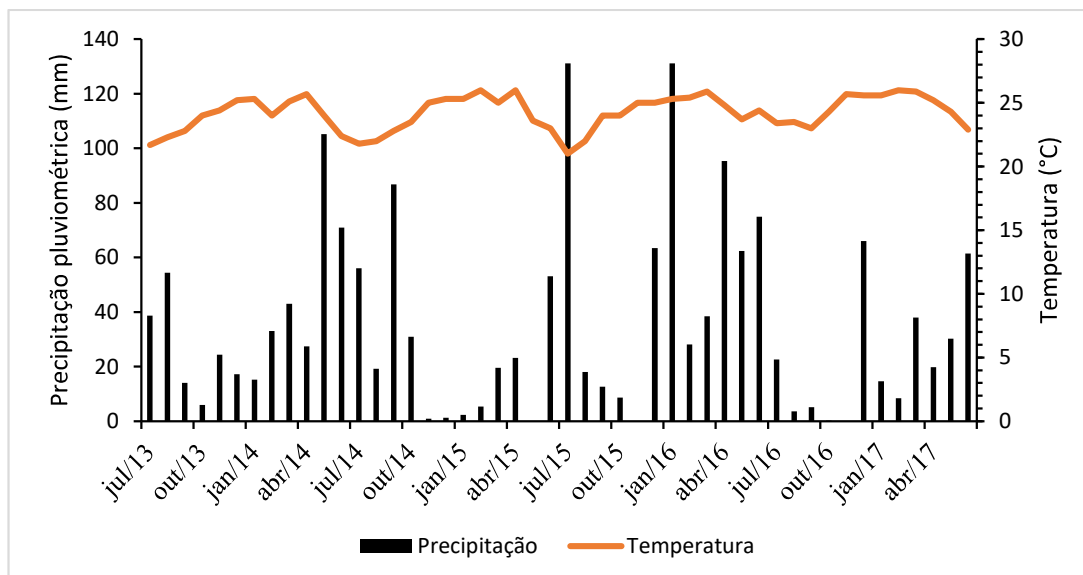


Figura 1. Volume de precipitação e temperatura durante o período da realização do experimento no Semiárido paraibano - BR.

Nas espécies arbóreas foram avaliadas as seguintes características dendrométricas: altura total, diâmetro de base (5 cm do solo) e diâmetro da altura do peito (DAP) em todas as plantas. A periodicidade das avaliações foi mensal até o 3º ano, onde também foram ajustados por meio do modelo de Richards, o crescimento em função do tempo para altura total, diâmetro de base, e diâmetro altura do peito (Richards, 1959), conforme Equação 1:

$$\frac{a}{1+\exp(b-c*x)} \left(\frac{1}{a}\right) \quad (1)$$

Ao final, foram abatidas todas as árvores do experimento, as quais foram cortadas a 30 cm do solo e medidas em sua altura comercial. Após isso, do fuste, foram retirados discos com 2,5 cm de espessura a 0 (base), 50, e 100% da altura comercial. Essas amostras foram devidamente identificadas e transportadas para o Setor de Tecnologia de Produtos Florestais (STPF) da Unidade Acadêmica de Engenharia Florestal (UAEF), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campus de Patos-PB. Parte dos discos das arbóreas foram utilizados para determinação da densidade básica (DB) e os restantes foram reservados para análise energética.

A determinação da densidade básica da madeira foi realizada de acordo com o método para discos utilizando balança hidrostática (Db, Equação 2), conforme a NBR-11941 (ABNT, 2003).

$$DB \frac{m_3}{(m_2 - m_1)} \quad (2)$$

em que: DB é a densidade básica da madeira, em gramas por centímetro cúbico (g/cm³); m₃ é a massa da amostra seca em estufa a 105 °C + 2 °C, em gramas (g); m₂ é massa do recipiente com água e disco imerso, em gramas (g); m₁ é a massa do recipiente com água, em gramas.

As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico (mufla) adaptado para essa operação, com controle de temperatura. O controle de aquecimento foi manual, seguindo a marcha (100 °C – 00:30h; 150 °C – 00:30h; 200 °C – 00:30h; 250 °C – 00:30h; 300 – 00:30h; 350 – 00:30h; 400 – 00:30h e 450 °C – 00:30h). Foram carbonizados 300 g de madeira, aproximadamente. Os vapores/gases foram conduzidos para um condensador tubular, com recolhimento do líquido pirolenhoso em kitassato.

Após a carbonização, o rendimento gravimétrico, em carvão e em condensados, foi determinado, ao dividir a massa do carvão, seco ou do condensado, produzido pela massa da madeira seca. Dessa maneira obteve-se o Rendimento Gravimétrico (RG), Rendimento em Líquido Condensado (RLC) e Materiais Voláteis (MV).

2.3. Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância de acordo com o modelo de experimento de blocos casualizados (teste F), e as médias foram comparadas por meio de contrastes ortogonais, ao nível máximo de significância de 0,10 de probabilidade. Nas análises estatísticas, utilizou-se o software SISVAR (Ferreira, 2008).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As duas espécies arbóreas obtiveram bom ajuste no modelo de Richards com coeficientes de determinação ($R^2 \geq 0,90$) para o crescimento em altura, Diâmetro Altura do Peito (DAP) e Diâmetro na Base do Caule (DBC) submetidas aos três tratamentos de irrigação e avaliadas nos três primeiros anos de crescimento (Figuras 2, 3 e 4). De acordo com Bawman et al. (2013), a detecção de padrões de crescimento de árvores não é algo simples e varia em função da dimensão que é medida. O comportamento biológico é representado tipicamente por curva sigmoidal, no entanto, o período de três anos é considerado pouco para representar crescimento de espécies florestais, podendo ser observado por tanto o comportamento inicial dessas curvas.

A altura do sabiá seguiu tendência muito próxima entre os tratamentos, com um rápido crescimento de forma exponencial e pequena superioridade para o tratamento $AB_{0,5}$ durante o primeiro ano. A partir de então, houve uma desaceleração no crescimento e estabilização antes de completar o segundo ano para os três tratamentos de irrigação (Figura 2 A). De acordo com Machado (2018), o Sabiá tem como característica um rápido desenvolvimento, chegando a 4 m de altura aos dois anos de idade. Fato também relatado por Silva (2017) com o alcance de 4,75 m em 2 anos, em cultivo de sabiá com sistema adubado. O crescimento exponencial do Sabiá no primeiro ano (Figura 2A) se deu provavelmente até o contato lítico se tornar um impedimento ao desenvolvimento das raízes, uma vez que a profundidade efetiva do solo decapeado não ultrapassava os 40 cm, ocorrendo a estabilização da curva com altura próxima aos 3 m, permanecendo até o terceiro ano de crescimento. De acordo com Nascimento et al. (1996), o sabiá tem preferência por solos profundos, bem drenados e férteis. Apesar de também conseguir ocorrer em solos rasos e pedregosos como os do embasamento cristalino da Caatinga (Moro et al. 2015). Além do solo raso, o adensamento do plantio também pode ter influenciado no desenvolvimento do sabiá, uma vez que o recomendado para a espécie seria no mínimo 3 x 3 m.

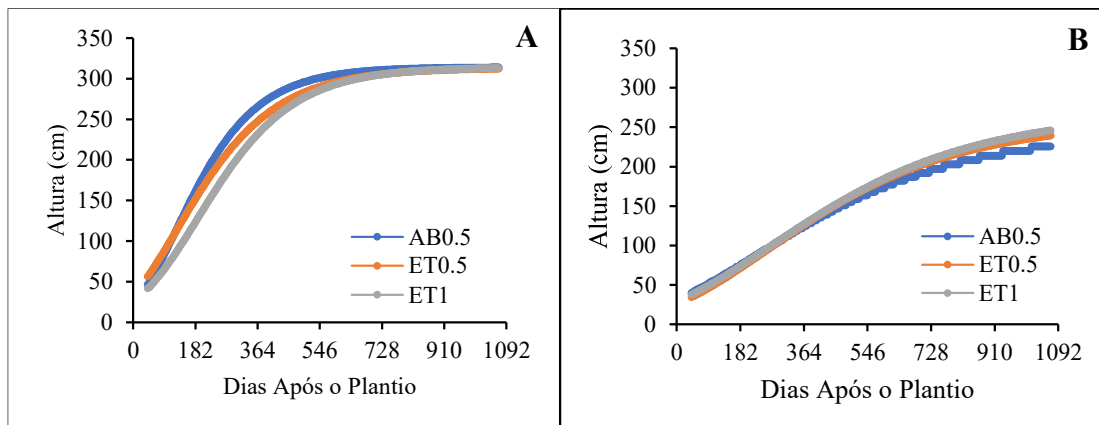


Figura 3. Curva de crescimento da altura da Sabiá (A) e Aroeira (B) submetida a tratamentos de irrigação com água de abastecimento ($AB_{0,5}$ - 0,5L) e reúso ($ET_{0,5}$ - 0,5 L e ET_1 - 1L) em um solo degradado, no Semiárido brasileiro.

A aroeira demonstrou crescimento mais lento comparada ao sabiá, com curvas semelhantes entre tratamentos. A diminuição no seu crescimento até o terceiro ano não foi tão evidente quanto no sabiá, demonstrando que o decréscimo e tendência à estabilização acontece mais tardiamente (Figura 2 B). Houve uma pequena superioridade do ET_1 a partir do terceiro ano em relação aos demais tratamentos.

Em geral, para a altura, a fase juvenil da árvore é identificada até o ponto de inflexão da curva, quando diminui a taxa de crescimento, dando início ao período da maturidade, a qual vai

até o ponto de máxima tangência e daí em diante é a fase de senescência (Finger, 1992). O comportamento da curva de crescimento da Aroeira evidenciou as características inerentes a espécie, uma vez que é considerada longeva, de crescimento lento a moderado, tendo dessa forma, estimativa de cortes para produção de mourões aos 20 anos de idade (Carvalho, 2003; Pareyn, et al. 2018).

O crescimento em DAP na Sabiá mostra diferença mais evidente entre os tratamentos, com maior crescimento no AB_{0,5} do segundo até o terceiro ano de avaliação (Figura 3 A). No entanto, diferente da altura, não foi observada diminuição nas taxas de crescimento ou estabilização até o terceiro ano, mostrando que o DAP continuou aumentando nos anos seguintes. Na Aroeira o DAP demonstrou crescimento exponencial ao longo do tempo, principalmente no ET₁, o qual também foi superior aos demais tratamentos.

Diferente do crescimento em altura, o qual estabiliza quando a árvore atinge a maturidade, o incremento em DAP acontece de forma constante ao longo da vida útil das espécies (Weiskittel et al. 2011). Isso foi evidenciado neste trabalho, uma vez que ambas as espécies não mostraram até o final da avaliação tendência a estabilização e diminuição do crescimento.

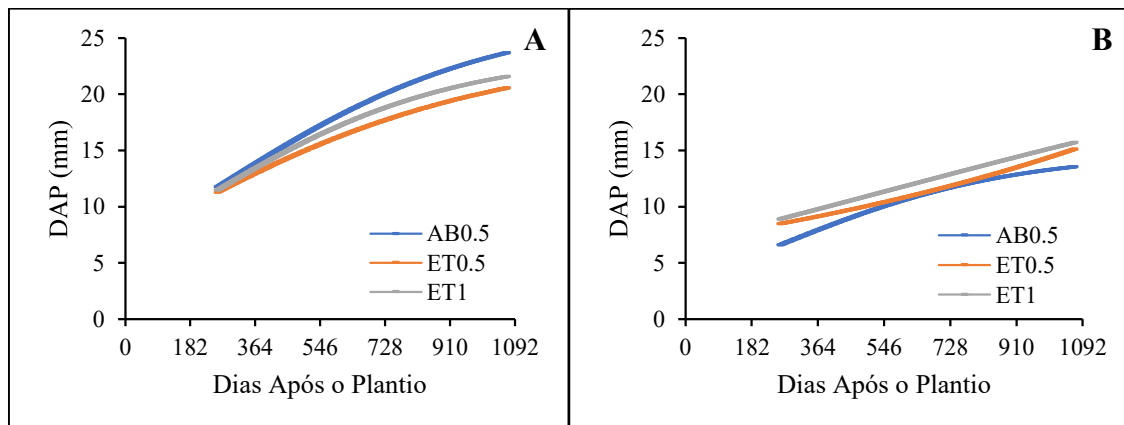


Figura 4. Curva de crescimento do Diâmetro Altura do Peito (DAP) da Sabiá (A) e Aroeira (B) submetidas a tratamentos de irrigação com água de abastecimento (AB_{0,5} - 0,5L) e reúso (ET_{0,5} - 0,5 L e ET₁ - 1L) em um solo degradado, no Semiárido brasileiro.

O crescimento em DBC no Sabiá teve um incremento gradual no início e demonstrou ao final da avaliação uma tendência a diminuir a taxa de crescimento (Figura 4A). O ET_{0,5} demonstrou menor magnitude a partir do primeiro ano, em comparação aos demais tratamentos. Já nas curvas de DBC da Aroeira houve uma maior variação entre os tratamentos (Figura 4B). Inicialmente ocorreu crescimento semelhante, após o primeiro ano o ET₁ teve um elevado crescimento comparado aos demais tratamentos, havendo uma tendência à estabilização a partir do segundo ano de crescimento. De acordo com Bawman (2013) em árvores de pequeno e

médio porte o incremento em DAP varia menos do que o DBC, a biomassa e o volume. Comportamento observado nesta pesquisa, principalmente nas curvas da aroeira.

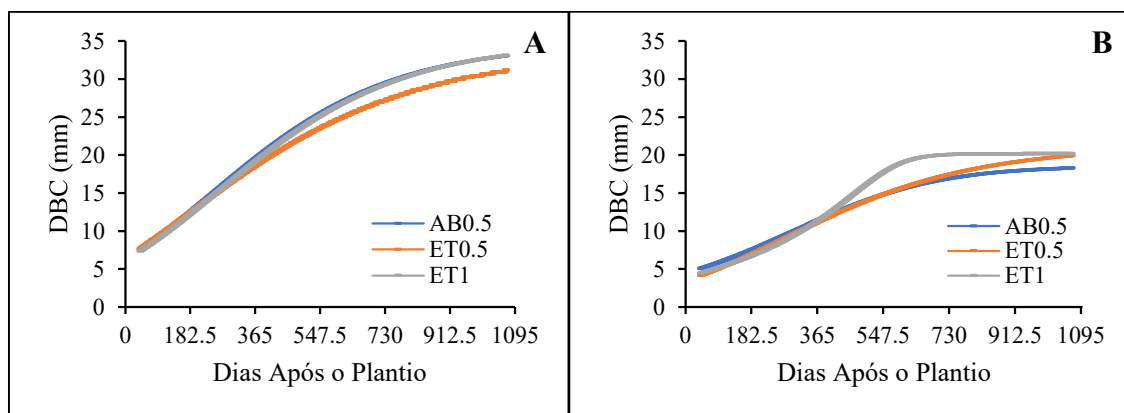


Figura 5. Curva de crescimento do Diâmetro na Base do Caule (DBC) da Sabiá (A) e Aroeira (B) submetidas a tratamentos de irrigação com água de abastecimento (AB_{0,5} - 0,5L) e reúso (ET_{0,5} - 0,5 L e ET₁ - 1L) em um solo degradado, no Semiárido brasileiro.

Em geral as curvas de crescimento em altura, DAP e DBC, evidenciaram as diferenças intrínsecas a cada espécie, onde o Sabiá demonstrou rápido crescimento nos primeiros anos, e a aroeira, de característica macróbia, demonstrou crescimento mais lento. O efluente apesar de não modificar as tendências nas curvas, promoveu pequenas superioridade nas curvas da Aroeira, em contrapartida, menores em geral no Sabiá. A interrupção dos tratamentos após o segundo ano não evidenciou alterações nas tendências de crescimento em ambas as espécies e tratamentos.

A espécie Sabiá aos 4 anos de idade não apresentou diferença significativa ($p > 0,10$) entre os tratamentos testados para Altura Total da Planta (ALT), Diâmetro da Base do Caule (DBC) e Volume Total (VT), havendo, no entanto, para o Diâmetro Altura do Peito (DAP) onde o AB_{0,5} foi maior comparado ET₁ ao nível de 10% de probabilidade (Tabela 3). Na Aroeira foi observado efeito significativo ($p < 0,10$) para Altura da Planta (ALT), onde o ET₁ foi superior ao AB_{0,5}, e para o Volume Total (VT), sendo o ET₁ superior ao AB_{0,5} e ET_{0,5}, não havendo diferença em DAP e DBC da planta.

Esses resultados demonstram que as espécies em estudo responderam de forma diferente à aplicação do efluente tratado. Através das variáveis de crescimento e produção, observa-se que o Sabiá, mostrou tendência de maiores valores no tratamento com água de abastecimento (AB_{0,5}), evidenciando a pouca resposta dessa espécie à água de reúso mesmo tendo sido aplicada nos dois primeiros anos de crescimento. Isto se deve, provavelmente, à sensibilidade do sabiá aos sais presentes em maiores concentrações no efluente de esgoto (Tabela 2), e que por sua vez aumentam os teores de Na⁺ e PST do solo. Em pesquisa realizada por Bessa et al.

(2017) a Aroeira foi classificada com alta resistência e o Sabiá como a mais sensível a níveis de salinidade do solo, dentre o cultivo de espécies nativas do semiárido brasileiro. A sensibilidade do sabiá à salinidade é relatada em diversas pesquisas com plantas jovens (Silva, et al. 2009) e produção de mudas (Tavares, et al. 2012; Sousa, et al. 2018) todas em condições de casa de vegetação.

Tabela 3. Altura da Planta (ALT), Diâmetro Altura do Peito (DAP), Diâmetro na Base do Caule (DBC) e Volume Total (VT) da Sábia e Aroeira aos 4 anos irrigadas com água de reúso (ET₁ e ET_{0,5}) e água de abastecimento (AB_{0,5}), em um solo degradado no Semiárido brasileiro

Contraste	ALT -----m-----	DAP ----- mm -----	DBC	VT --- m ³ /ha ---
Sabiá				
AB _{0,5} – ET _{0,5}	3.33 - 3.16 ^{ns}	25.91 - 23.75 ^{ns}	40.19 - 37.11 ^{ns}	9.9 – 8.2 ^{ns}
AB _{0,5} - ET ₁	3.33 - 3.10 ^{ns}	25.91 - 22.26 ^o	40.19 - 39.06 ^{ns}	9.9 – 7.6 ^{ns}
ET _{0,5} – ET ₁	3.16 - 3.10 ^{ns}	23.75 - 22.26 ^{ns}	37.11 - 39.06 ^{ns}	8.2 – 7.6 ^{ns}
Aroeira				
AB _{0,5} – ET _{0,5}	2.23 - 2.35 ^{ns}	12.85 - 14.08 ^{ns}	19.89 - 21.56 ^{ns}	1.9 – 2.0 ^{ns}
AB _{0,5} - ET ₁	2.23 - 2.60 ^o	12.85 - 13.18 ^{ns}	19.89 - 20.95 ^{ns}	1.9 – 2.9 ^o
ET _{0,5} – ET ₁	2.35 - 2.60 ^{ns}	14.08 - 13.18 ^{ns}	19.89 - 20.95 ^{ns}	2.0 – 2.9 ^o

(^o), (*) e (**) significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente; (ns) não significativo.

Já a aroeira, obteve resposta significativa e positiva à água residuária, uma vez que o tratamento com efluente tratado de maior volume (ET₁), resultou no aumento em ALT e VT. No entanto, comparando o potencial madeireiro das duas espécies aos 4 anos de idade em valores médios de VT nos tratamentos de maiores resultados, o Sabiá é aproximadamente 3,4 vezes maior do que a produção em volume de madeira da Aroeira.

Em um plantio de sabiá sob dois sistemas de cultivo, menos intensivo (S0 - sem adubação e tratos culturais) e mais intensivo (S1 - adubação fosfatada, correção do solo e tratos culturais), Silva et al. (2017), relataram aos 4 anos de crescimento, maiores valores de altura e volume de madeira (4,61 m e 12,5 m³/ha, respectivamente) no S1. A título de comparação com os valores deste trabalho, é preciso ponderar que o plantio do experimento supracitado foi em Latossolo Amarelo, com profundidade maior que 100 cm, e pouco adensada com espaçamento 3 x 3 m, considerado ideal para fim madeireiro (Moura, et al. 2006). Desse modo, pode-se considerar desenvolvimento relativamente satisfatório do sabiá nas condições de área com degradação severa no qual foi submetido nesta pesquisa, com solo decapeado, pouco profundo e pedregoso, além do plantio adensado.

Para as espécies sabiá e aroeira, existem publicadas apenas pesquisas realizadas com a utilização de água de reúso para produção de mudas (Oliveira et al. 2013; Rebouças et al. 2018; Brito et al. 2018). Ambas as pesquisas mostram que a água residuária na proporção de 100%

promove melhores desempenhos no crescimento e desenvolvimento inicial das espécies cultivadas em vasos e ambiente protegido. Avaliando em campo por 4 anos consecutivos o crescimento de brotações e produtividade de árvores de *Olea europaea* L., Ayoub et al. (2016) verificaram eficiência igual entre a água de reúso e água doce em ambiente semiárido da Jordânia. Em estudo realizado com 11 espécies irrigadas com água residuária por 4 anos em locais e solos diferentes no sudeste da Austrália, Stewart e Flinn (1984), concluíram que foi obtido em geral bons índices de crescimento com resultados semelhantes entre irrigação com água doce e de reúso, ressaltando sua viabilidade no estabelecimento de espécies florestais.

O Incremento Médio Anual (IMA) do sabiá alcançou valores máximos no terceiro ano de crescimento, com superioridade para o AB_{0,5} (Figura 5A). Houve uma tendência a diminuição em ambos os tratamentos no quarto ano. Valores máximos de IMA do sabiá no terceiro ano e decréscimo no quarto ano de idade, também foram relatados por Silva et al. (2017), em cultivo adubado e sistema de sequeiro. Isso evidencia que as tendências no comportamento das taxas de crescimento do Sabiá não foram alteradas com as condições experimentais as quais foi submetido nesse trabalho.

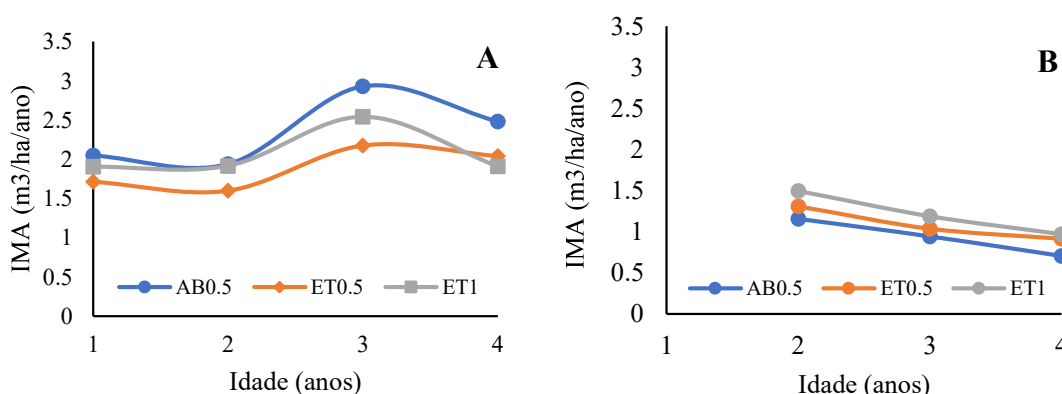


Figura 6. Incremento Médio Anual (IMA) do Sabiá (A) e Aroeira (B) submetidas a tratamentos de irrigação com água de reúso e abastecimento em um solo degradado no Semiárido brasileiro.

O volume da aroeira foi obtido somente após o primeiro ano devido seu pouco crescimento, o que possibilitou o cálculo de apenas 3 anos de IMA (Figura 5B). O IMA da aroeira diminuiu de forma linear a cada ano avaliado. No entanto, de acordo com Coradin et al. (2018), ao longo do seu ciclo de crescimento a aroeira pode atingir produtividade máxima de até 5,50 m³/ha/ano.

Em relação as características da madeira, foi observado que para o sabiá não houve efeito significativo na Densidade Básica (DB) e Rendimento Gravimétrico (RG), havendo, no entanto, para o Rendimento em Líquido Condensado (RLC) e para Materiais Voláteis (MV)

($p < 0,01$) (Tabela 4). O ET_1 aumentou os valores de RLC comparado ao $AB_{0,5}$ e $ET_{0,5}$. Em contrapartida, os valores de MV foram maiores no $AB_{0,5}$ e $ET_{0,5}$ em relação ao ET_1 . Na aroeira, houve diferença significativa ($p < 0,10$) para a DB e MV, onde o ET_1 obteve os maiores valores comparado ao $AB_{0,5}$ e ao $ET_{0,5}$, respectivamente (Tabela 4). E o RG obteve maior valor no tratamento $AB_{0,5}$ comparado ao ET_1 , não havendo diferença significativa em nenhum contraste testado para o RLC da aroeira.

Esses resultados demonstram que o efluente tratado afetou de forma diferente a qualidade da madeira das duas espécies. No sabiá a água residuária aumentou o RLC e diminuiu o MV, enquanto na aroeira, promoveu maior DB e MV, e diminuiu o RG. A densidade Básica é uma característica considerada como importante indicadora da qualidade da madeira (Vale, et al. 2010) e sua interpretação vai depender da finalidade desejada. Destinada à indústria de celulose, por exemplo, maiores valores em DB como as do sabiá não são desejáveis (Carvalho, et al. 2007; Gonçalves, et al. 2010), todavia, para produção de carvão e fins energéticos, são preferíveis madeiras de maiores densidades. Nesse sentido, com valores de DB de $0,66 \text{ g/cm}^3$ na aroeira contra $0,83 \text{ g/cm}^3$ no Sabiá, este último se mostra mais indicado para fins energéticos e ambas são maiores que os valores relatados para híbridos de Eucaliptos aos 7 anos de idade, com $0,54 \text{ g/cm}^3$ em média (Soares, et al. 2014). Gonçalves et al. (2010) caracterizou a densidade básica do Sabiá, obtendo o valor de $0,78 \text{ g/cm}^3$. Já na madeira de sabiá obtida em cultivo com 4 anos de idade, com adubação e regime de sequeiro, foi obtido o valor de densidade básica de $0,81 \text{ g/cm}^3$ (Costa, et al. 2017). Esses valores são menores que os valores obtidos nesta pesquisa, os quais variaram de $0,80$ à $0,83 \text{ g/cm}^3$ no $ET_{0,5}$ e ET_1 , respectivamente.

Na aroeira, apesar do aumento na DB com aplicação do efluente, a diminuição no RG do carvão deve-se provavelmente a um decréscimo no teor de lignina e extrativos, por serem estes constituintes químicos ricos em carbono (Medeiros Neto, et al. 2012). Isto é evidenciado com os altos valores de MV no ET_1 , uma vez que o aumento desta variável é inversamente proporcional aos rendimentos em DB, RG, teor de lignina, extrativos, carbono fixo (Oliveira, et al. 2010; Soares, et al. 2014).

Tabela 4. Contrastes ortogonais e valores médios das características energéticas da madeira em Densidade Básica (DB), Rendimento Gravimétrico (RG), Rendimento em Líquido Condensado (RLC) e Materiais Voláteis (MV) de duas espécies arbóreas irrigadas com água de reúso e água de abastecimento em um solo degradado no Semiárido brasileiro.

Contraste	DB (g/cm^3)	RG (%)	RLC (%)	MV (%)
Sabiá				
Ab – $ET_{0,5}$	0,824-0,802 ^{ns}	37,01-38,11 ^{ns}	20,18-16,24 ^{ns}	42,81-45,82 ^{ns}
Ab - ET_1	0,824-0,835 ^{ns}	37,01-37,74 ^{ns}	20,18-31,77**	42,81- 30,55**
$ET_{0,5}$ – ET_1	0,802-0,835 ^{ns}	38,11-37,74 ^{ns}	16,24-31,77**	45,82-30,55**

	Aroeira			
Ab – ET _{0,5}	0,632 – 0,637 ^{ns}	35,83-35,62 ^{ns}	27,47- 29,71 ^{ns}	36,70-34,79 ^{ns}
Ab - ET ₁	0,632 – 0,661 ^o	35,83-34,23 ^o	27,47-25,28 ^{ns}	36,70-48,70 ^{ns}
ET _{0,5} – ET ₁	0,637 – 0,661 ^{ns}	35,62-34,23 ^{ns}	29,71-25,28 ^{ns}	34,79-48,70 ^o

(°), (*) e (**) significativo a 10, 5 e 1% de probabilidade, respectivamente; (ns) não significativo.

Os materiais voláteis liberados podem ser indesejados em alguns casos por promoverem impregnação, mau-cheiro etc. (Oliveira, et al. 2010). De acordo com o Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO, 2008), um carvão vegetal de melhor qualidade apresenta-se com alta densidade e resistência, baixas taxas de voláteis e cinzas. Em análise da madeira de aroeiras adultas, através de processo de carbonização semelhante ao deste trabalho, Silva et al. (2018), obteve valor de 41,22% em RG e 33,87% em MV, valor maior portanto em RG e menores em MV em relação aos valores obtidos na presente pesquisa. Evidencia-se que a água residuária promoveu acréscimo no teor de MV da Aroeira, no entanto, tais diferenças em MV e RG para os encontrados por Silva et al. (2018) devem-se provavelmente também à diferença de idade das árvores analisadas. Tendência no aumento da densidade básica da madeira conforme a idade, foi observada para o Eucalipto (Soares et al. 2014).

4. CONCLUSÕES

- O modelo de Richards se ajustou satisfatoriamente às variáveis de crescimento para o sabiá e para aroeira;
- O crescimento exponencial do sabiá nos primeiros anos foi afetado pela pouca profundidade do solo decapeado, e a aroeira demonstrou taxas de crescimento mais lento independente do tratamento até os 3 anos de idade;
- Os sais presentes na água residuária aplicada nos dois primeiros anos diminuíram o crescimento e produção de madeira do sabiá.
- A aplicação de efluente de esgoto tratado aumentou a altura, volume total e o IMA da aroeira aos 4 anos de idade;
- O Efluente Tratado no volume de 1 L/semana aumentou o Rendimento em Líquido Condensado (RLC) e diminuiu os Materiais Voláteis (MV) do sabiá, enquanto na aroeira aumentou a Densidade Básica (DB) e Materiais Voláteis (MV), com diminuição do Rendimento Gravimétrico (RG).

- O efluente de esgoto deve ser utilizado com cautela no sabiá para que não ocorra danos à espécie, necessitando de estudos para estabelecer o melhor manejo. Para a aroeira o efluente é indicado em áreas degradadas no semiárido brasileiro.

REFERENCIAS

ALMEIDA, J. P.; FREITAS, R. M.; NOGUEIRA, N. W.; OLIVEIRA, F. D. A. D.; FERREIRA, H.; LEITE, M. D. S. Production of *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke seedlings irrigated with fish farming wastewater. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 21(6), 386-391. 2017.

ARAÚJO, B. A.; DANTAS NETO, J.; LIMA, V. D.; SANTOS, J. S. Uso do esgoto doméstico tratado na produção de mudas de espécies florestais da caatinga. **Principia**, João Pessoa, 2(15), 48-53, 2007.

ARAUJO, L. M. N.; MOLION, L. C. B.; ARAUJO ABDALAD, M.; MOREIRA, D. M.; SANCHEZ, A.; BARBOSA, H. A.; ROTUNNO FILHO, O. C. Historical analysis of interannual rainfall variability and trends in southeastern Brazil based on observational and remotely sensed data. **Climate Dynamics**, 1-24, 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR-11941: madeira: determinação da densidade básica. São Paulo; 2003.

AYOUB, S.; AL-SHDIEFAT, S.; RAWASHDEH, H.; BASHABSHEH, I. Utilization of reclaimed wastewater for olive irrigation: Effect on soil properties, tree growth, yield and oil content. **Agricultural Water Management**, 176, 163-169, 2016.

BESSA, M. C.; LACERDA, C. F.; AMORIM, A. V.; BEZERRA, A. M. E.; LIMA, A. D. Mechanisms of salt tolerance in seedlings of six woody native species of the Brazilian semi-arid. **Revista Ciência Agronômica**, 48(1), 157-165, 2017.

BOWMAN, D. M. J. S.; BRIENEN, R. J. W.; GLOOR, E.; PHILLIPS, O. L.; PRIOR, L. D. Detecting trends in tree growth: not so simple. **Trends in Plant Science**, 18(1), 11–17, 2013. doi:10.1016/j.tplants.2012.08.005

BRITO, R. F. D.; FERREIRA NETO, M. I. G. U. E. L.; MORAIS, M. A.; DIAS, N. D. S.; LIRA, R. B. D. Use of wastewater in the production of aroeira seedlings. **Revista Caatinga**, 31(3), 687-694 (2018).

CAMPOS, M. C. C.; QUEIROZ, S. B. Reclassificação dos perfis descritos no Levantamento Exploratório-Reconhecimento de solos do estado da Paraíba. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, 6(1), 45-50. 2006.

CARVALHO, P. E. R. Sabiá-*Mimosa caesalpiniiifolia*. Embrapa Florestas-Circular Técnica (INFOTECA-E), 2007.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. Carvão vegetal: aspectos técnicos, sociais, ambientais e econômicos. Nota técnica. 2008. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/notatecnica_x.pdf> Acesso em: 18 dez. 2019.

CORADIN, LIDIO; CAMILLO, JULCÉIA; PAREYN, FRANS GERMAIN CORNEEL (Ed.). Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: região Nordeste. Brasília, DF: MMA, 2018. (Série Biodiversidade; 51) Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/publicacoes/biodiversidade/category/142-serie-biodiversidade.html>>, Acesso em: 20 mar 2020.

COSTA, S. E. LIMA.; PATROCÍNIO, E. S. A.; RODRIGUES, I. C. B.; SANTO, C. P. S.; SILVA G. G. C. Efeito do método de cultivo no potencial energético da madeira de Sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth) implantada no semiárido potiguar. **II CONIDIS - Congresso Internacional da Diversidade do Semiárido**, Campina Grande, 2017.

FARAHAT, E.; LINDERHOLM, H. W. Nutrient resorption efficiency and proficiency in economic wood trees irrigated by treated wastewater in desert planted forests. **Agricultural Water Management**, 155, 67-75 (2015).

GONÇALVES, C. D. A.; LELIS, R. C. C.; ABREU, H. D. S. Caracterização físico-química da madeira de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.). **Revista Caatinga**, 23(1), 54-62, 2010.

Instituto Nacional do Semiárido – INSA. Disponível em: <http://www.insa.gov.br/sigsab/basico>. Acesso em: 10 de Jan de 2020.

LIRA, R.; SANTOS, A.; SILVA, J.; BARNABÉ, J.; BARROS, M.; SOARES, H. A utilização de água de qualidade inferior na agricultura irrigada. **Revista GEAMA (Online)**, v. 3, n. 1, p. 62-83, 2015.

LÜ, X.-T., HAN, X.-G. Nutrient resorption responses to water and nitrogen amendment in semi-arid grassland of Inner Mongolia, China. **Plant Soil** 327, 481–491. 2010

MACHADO, F. A. *Mimosa caesalpiniiifolia* Sabiá. In: Coradin, L.; Camillo, J.; Pareyn, F. G. C. (Ed.). Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: região Nordeste. Brasília, DF: MMA, 2018. (Série Biodiversidade; 51) Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/publicacoes/biodiversidade/category/142-serie-biodiversidade.html>>, Acesso em: 30 fev 2020.

MEDEIROS, S. S.; SOARES, ANTÔNIO A.; FERREIRA, PAULO A.; NEVES, JÚLIO C. L.; SOUZA, JOSÉ A. Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: estudo do estado nutricional do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online)**, v. 12, p. 109-115, 2008.

MINHAS, P. S.; YADAV, R. K.; LAL, K.; CHATURVEDI, R. K. Effect of long-term irrigation with wastewater on growth, biomass production and water use by Eucalyptus (*Eucalyptus tereticornis* Sm.) planted at variable stocking density. **Agricultural Water Management**, 152, 151-160, 2015.

MORO, M. F.; MACEDO, M. B.; MOURA-FÉ, M. M.; FARIAS-CASTRO, A. S.; COSTA, R. C. Vegetação, unidades fitoecológicas e diversidade paisagística do estado do Ceará. **Rodriguésia**, 66 (3), 717-743, 2015.

MOURA, O. N.; PASSOS, M. A. A.; FERREIRA, R. L. C.; MOLICA, S. G.; LIRA-JÚNIOR, M. D. A.; LIRA, M. D. A.; SANTOS, M. D. Distribuição de biomassa e nutrientes da parte aérea de *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. **Revista Árvore**, 30(6), 877-884. 2006.

NASCIMENTO, M. P. S. C. B.; OLIVEIRA, M. E. A.; NASCIMENTO, H. T. S.; CARVALHO, J. D.; ALCOFORADO-FILHO, F. G.; SANTANA, C. D. Forrageiras da Bacia do Parnaíba: usos e composição química. Teresina: EMBRAPA-CPAMN/ Recife: Associação Plantas do Nordeste, 1996. 86 p. (EMBRAPA-CPAMN. Documentos, 19).

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. D. C.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, J. F.; ALVES, S. M.; BATISTA, R. O.; COSTA, M. S.; QUEIROZ, J. L.; LIMA, V. I. Avaliação de mudas de sabiá e mororó fertirrigadas com esgoto doméstico tratado. **Agropecuária Científica no Semiárido**, 9(4), 46-52. 2013.

OLIVEIRA, P. C. P. D.; GLOAGUEN, T. V.; GONÇALVES, R. A. B.; SANTOS, D. L.; COUTO, C. F. Soil Chemistry after Irrigation with Treated Wastewater in Semiarid Climate. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016.

PAREYN, F. G.; PEREIRA, W. E.; SALCEDO, I. H.; RIEGELHAUPT, E. M.; GOMES, E. C.; MENECHIELI, H. T.; SKUTSCH, M. What controls post-harvest growth rates in the caatinga forest? **Agricultural and Forest Meteorology**, 284, 107906, 2020.

REBOUÇAS, J. R. L.; NETO, M. F.; SILVA, D. N.; GOMES, J. W. S.; SOUSA, G. G. C.; QUEIROZ, I. S. R. Qualidade de mudas de Sabiá irrigadas com efluente doméstico. **Floresta**, 48(2), 173-182, 2018.

RIBASKI, J.; LIMA, P. C. F.; OLIVEIRA, V. R.; DRUMOND, M. A. Sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia*) árvore de múltiplo uso no Brasil. Embrapa Florestas-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2003.

RICHARDS, F. J. A flexible growth function for empirical use. **J. Exp. Bot.** 10:290 –300. 1959.

RUFINO, I. A. A.; SILVA, S. T. Análise das relações entre dinâmica populacional, clima e vetores de mudança no semiárido brasileiro: Uma abordagem metodológica. **Boletim de Ciências Geodésicas**, 23(1), 166-181. (2017).

SAMPAIO, E. V. S. B.; SALCEDO, I. H. Matéria orgânica do solo no bioma Caatinga. In: SANTOS, G. A.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Eds). Fundamentos de Matéria Orgânica do Solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. 2ªEd. Porto Alegre, Metrópole, p. 419-441, 2008.

SILVA, M. B. R.; VIÉGAS, R. A.; NETO, J. D.; FARIAS, S. A. R. Estresse salino em plantas da espécie florestal sabiá. **Caminhos de Geografia**, 10(30), 2009.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, 38(3), 543-549, 2014.

SOUSA, E. C.; SILVA, D. V.; SOUSA, D. M.; TORRES, S. B.; OLIVEIRA, R. R. Physiological changes in *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. seeds from different sources and submitted to abiotic stresses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 22(6), 383-389, 2018.

STEWART, H. T. L.; FLINN, D. W. Establishment and early growth of trees irrigated with wastewater at four sites in Victoria, Australia. **Forest Ecology and Management**, 8(3-4), 243-256, 1984.

TAVARES, R. C.; MENDES FILHO, P. F.; LACERDA, C. F. D.; SILVA, J. Colonização micorrízica e nodulação radicular em mudas de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.) sob diferentes níveis de salinidade. **Revista Ciência Agronômica**, 43(3), 409-416, 2012.

VALE, A. T. D.; DIAS, Í. S.; SANTANA, M. A. E. Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. **Ciência Florestal**, 20(1), 137-145, 2010.

WEISKITTEL, A. R.; HANN, D. W.; KERSHAW JR, J. A.; VANCLAY, J. K. Forest growth and yield modeling. **John Wiley & Sons**, 2011.