

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

PARÂMETROS DE TRATABILIDADE EM SISTEMAS DE ALAGADOS CONSTRUÍDOS APLICADO AO REUSO DE RESÍDUOS DE DESSALINIZAÇÃO

* Marina Gadens Berton Zaika ¹
Marcos Rogério Széliga ¹
Ana Carolina B. Kummer ¹
Giovana K. Wiecheteck ¹
Luiza C. Campos ²
Gabriel Carranza ³
Miguel Acevedo ⁴

TRATABILITY PARAMETERS IN CONSTRUCTED WETLANDS APPLIED TO THE REUSE OF DESALINATION RESIDUES

Recibido el 20 de agosto de 2018; Aceptado el 28 de agosto 2019

Abstract

The aim of this research was to evaluate the treatability parameters, which were defined as variables, factors, hydraulic and operating configurations, which, by hypothesis, could potentially influence the process of improving the quality of brine resulting from desalination by reverse osmosis, through the application of Constructed Wetland Systems, cultivated with elephantgrass (*Pennisetum purpureum*, Schum). The studies were conducted on bench scale, within a semi-heated agricultural greenhouse. Twelve experimental units were established, and four treatment configurations were established with three replicates each, operated and monitored for five months, varying according to the operation of the system, whether continuous or static, and also in the hydraulic retention time of three or four days. Water samples were collected at the entrance and exit of each unit, and were analyzed in the laboratory for the physicochemical characterization and, monitoring of parameters: pH, turbidity, salinity, hardness, calcium, chlorides, electrical conductivity and total dissolved solids. The results were submitted to analysis of variance and Tukey's test, at a 95% confidence level, using the statistical program SISVAR. The systems that were submitted to the static regime, with hydraulic retention time of four days, during the first three weeks of operation, showed to be more efficient in the average removal of salinity (53.1%), hardness (69.2%), calcium (66.7%), chloride (44.5%), electrical conductivity (40.7%) and total dissolved solids (86.7%). The plant was able to absorb 0.25% of the sodium ions by its roots for its nutrition, according to the results from the scanning electron microscopy.

Keywords: brine, desalination, effluent treatment, reuse, constructed wetlands.

¹ Programa de pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Brasil.

² Dept. Civil, Environmental & Geomatic Engineering, University College London, Reino Unido.

³ University of Louisiana Lafayette, USA.

⁴ Electrical Engineering Department, University of North Texas, Denton, Texas, USA.

*Autor correspondente: Universidade Estadual de Ponta Grossa, Avenida General Carlos Cavalcanti, 4748, Uvaranas, Ponta Grossa, Paraná. CEP.:84030-900. Brasil. Email: marina_gadens@hotmail.com

Resumo

A pesquisa teve como objetivo a avaliação dos parâmetros de tratabilidade, designados assim, como as variáveis, fatores, configurações hidráulicas e de operação, que por hipótese, potencialmente oferecessem influência no processo de melhoria da qualidade da água residuária (concentrado salino) decorrente da dessalinização por osmose reversa, através da aplicação de Sistemas Alagados Construídos, cultivados com capim-elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.). Os estudos foram conduzidos em escala de bancada, dentro de uma casa de vegetação semi-climatizada. Foram confeccionadas doze unidades experimentais, e estabelecidos quatro configurações de tratamento com três repetições cada, operadas e monitoradas durante cinco meses, variando em função da operação do sistema, se de fluxo contínuo ou de regime estático, e também no tempo de detenção hidráulica de três ou quatro dias. Amostras de água foram coletadas na entrada e na saída de cada unidade, e foram analisados em laboratório para a caracterização físico-química e monitoramento dos parâmetros: pH, turbidez, salinidade, dureza, cálcio, cloretos, condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais. Os resultados foram submetidos à análise de variância e teste de Tukey, em nível de 95% de confiança, utilizando-se o programa estatístico SISVAR. Os sistemas que foram submetidos ao regime estático, com tempo de detenção hidráulica de quatro dias, nas três primeiras semanas de operação, mostraram ser mais eficientes na remoção média de salinidade (53.1%), dureza (69.2%), cálcio (66.7%), cloreto (44.5%), condutividade elétrica (40.7%) e sólidos dissolvidos totais (86.7%). As plantas absorveram o íon Sódio em 0.25% do peso dos elementos totais detectados em microscopia eletrônica de varredura em suas raízes.

Palavras chave: alagados construídos, concentrado salino, dessalinização, reúso, tratamento de efluente.

Introdução

A utilização da água tratada sempre foi feita pensando como um bem infinito, porém, nada mais é do que uma visão ilusória em que sua disponibilidade depende de como o homem faz uso dela (Quirie *et al.*, 2013). A dessalinização de água é uma das grandes alternativas para solucionar o problema de abastecimento hídrico no mundo (Morillo *et al.*, 2014).

O processo de dessalinização refere-se ao tratamento de água salgada, onde os sais são removidos por processos físico-químicos, tornando essa água doce e/ou potável (Jibril and Ibrahim, 2001). Deste tratamento é gerada uma água de boa qualidade (permeado) e uma água residuária, denominada de rejeito salino, com elevada concentração de sais altamente poluentes, cujo descarte é um dos grandes dilemas da dessalinização, representando um problema ambiental (Soares *et al.*, 2006).

Dentre as alternativas para descarte do rejeito salino, destacam-se: despejo no mar (Einav *et al.*, 2002), injeção em poços de grande profundidade (Torquemada e Lizaso, 2009), sistemas de esgoto sanitário (Mickey, 2004), sistemas hidropônicos ou de irrigação (Soares *et al.*, 2006), bacias de evaporação, redução de volume do rejeito por plantas aquáticas e bacias de percolação (Porto *et al.*, 2001).

O presente estudo foi realizado com o rejeito salino de uma estação piloto de dessalinização, composta por sistemas de osmose reversa, localizada na estação de tratamento de água de Praia de Leste – Pontal do Sul – Paraná. O estudo deste sistema visa embasar soluções para eventuais problemas relacionados às intrusões salinas no manancial de abastecimento - Rio das Pombas. A intrusão salina foi simulada por meio de mistura de água doce bruta e água do mar em diferentes proporções para a pesquisa operacional e de viabilidade de aplicação da tecnologia de osmose reversa. Neste sentido foram obtidos resultados satisfatórios para a qualidade da água tratada, entretanto, o processo proporciona a produção de um rejeito, o concentrado salino. Para complementar o ciclo físico operacional da instalação piloto, em termos de sustentabilidade, foi proposto o gerenciamento do resíduo salino através de sistemas de alagados construídos (SACs) para o reuso do efluente final em atividades de aquicultura e irrigação.

Os sistemas de alagados construídos aproveitam os recursos disponíveis como a vegetação da própria região, não dependem de máquinas, não utilizam produtos químicos, não exigem mão de obra especializada, são de fácil gerenciamento, podem ser incorporados à paisagem local e possuem elevada eficiência de tratamento (Zanela, 2008). Estudos sobre sistemas de alagados construídos indicam que esta ecotecnologia permite a produção de águas de reuso e biomassa vegetal que podem ser comercializadas gerando receita para o proprietário do sistema (Quege *et al.*, 2013).

Nesse sentido, o estudo em questão teve como objetivo avaliar os parâmetros de tratabilidade em sistemas de alagados construídos, cultivados com capim-elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.), aplicado ao reuso de resíduo salino de dessalinização por osmose reversa, a partir da análise de parâmetros físico-químicos no concentrado.

Metodologia

Ambiente do experimento

O experimento foi instalado e conduzido em escala de bancada, em uma casa de vegetação que possui “teto em arco”, com pé direito de 3 m, e é do tipo semiclimatizada com um sistema de exaustão de ar, que controla a temperatura interna em até 30°C.

O sistema de tratamento avaliado

Foram estabelecidas quatro configurações de SACs para tratabilidade do rejeito salino, totalizando doze unidades experimentais, monitoradas durante cinco meses, com iguais condições de preenchimento, variando os parâmetros de operação do sistema, os tempos de detenção hidráulica e os períodos secos, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Tratamentos estudados

Tratamento	Repetições	Parâmetro de operação do sistema	Tempo de Detenção Hidráulica	Período seco
1	3 SACs	Fluxo contínuo	3 dias	4 dias
2	3 SACs	Estático	3 dias	4 dias
3	3 SACs	Fluxo contínuo	4 dias	3 dias
4	3 SACs	Estático	4 dias	3 dias

Fonte: Os autores

Composição do sistema

Os SACs foram confeccionados com caixas d'água de polietileno com capacidade para 100 L. Como meio suporte para o preenchimento do leito filtrante de cada sistema de alagado construído foram utilizados brita nº1 com diâmetro entre 11 e 20 mm (base), pedrisco com diâmetro entre 6.3 e 11 mm (sub-base) e areia grossa com diâmetro entre 2 e 4 mm (superfície), em camadas superpostas de 30, 3 e 8 cm, respectivamente. O volume de vazios do leito de brita foi em média de 30 L. O capim-elefante da variedade roxa foi a espécie vegetal empregada nos SACs do experimento. O corte esquemático do sistema pode ser visualizado na Figura 1.

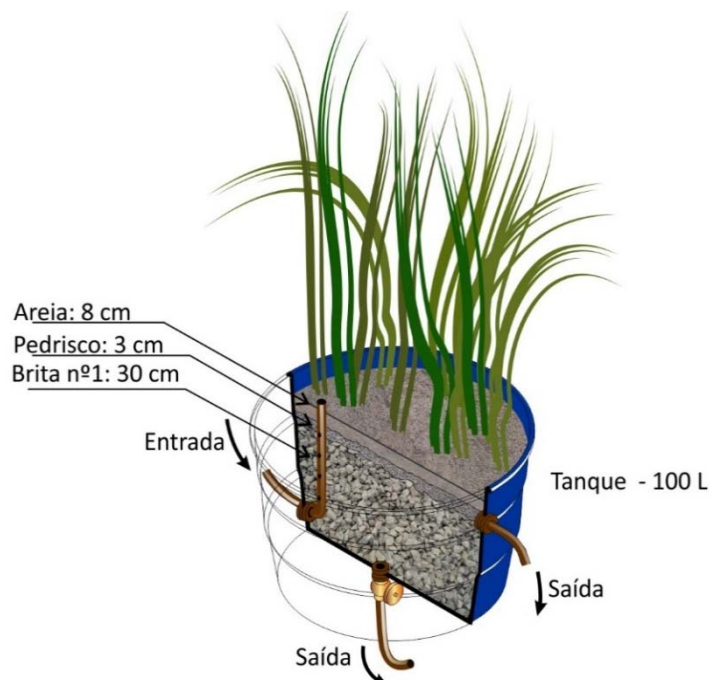


Figura 1. Corte esquemático da bancada do Sistema de Alagados Construídos.

Fonte: Adaptado de Kummer, Wiecheteck e Széliga, 2016

Parâmetros de operação do sistema

A distribuição dos afluentes foi realizada em uma linha lateral vertical na zona de entrada de cada SAC por meio de mangueiras plásticas de ½ polegada, verticais e perfuradas no interior no SAC, ligadas ao reservatório de 30 L locado acima do leito. O rejeito salino escoava por gravidade, percorrendo o leito, atingindo a saída e sendo coletado em um reservatório de recepção. Os SACs eram alimentados de forma subsuperficial. As vazões para abastecimento eram controladas no início e no final de cada dia nos períodos de tempo de detenção hidráulica (TDH) e foram diferenciadas em cada sistema.

Dois dos quatro tratamentos (T1 e T3) foram operados em regime de fluxo contínuo, ou seja, o método empregado na operação destes SACs foi realizado por meio de uma adaptação da operação por bateladas, onde o rejeito salino, ao ser aplicado na zona de entrada dos leitos, escoava através da zona de raízes, com manutenção de nível e proporcionando o efluente tratado. Para o tratamento do tipo T1 o TDH adotado foi de 3 dias e para o tratamento do tipo T3 o TDH adotado foi de 4 dias. Os leitos dos sistemas trabalharam em fluxo subsuperficial com escoamento horizontal ascendente, conforme demonstrado na Figura 2.

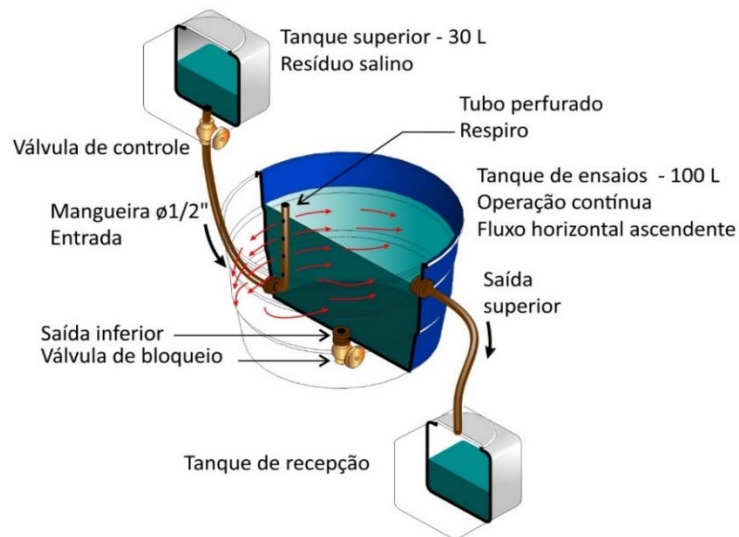


Figura 2. Corte esquemático do SAC – Operação em regime de fluxo contínuo horizontal ascendente.

Fonte: Adaptado de Kummer, Wiecheteck e Széliga, 2016

Os outros dois tratamentos (T2 e T4) foram operados em regime estático, ou seja, os leitos dos sistemas foram preenchidos com o rejeito salino até atingir a altura da camada dos pedriscos, chegando ao nível de 32 cm (região onde estão as raízes do capim-elefante). O rejeito salino foi mantido em repouso nas unidades dos tratamentos dos tipos T2 e T4 em TDH de 3 e 4 dias,

respectivamente. Após a manutenção do TDH, o volume tratado era retirado pela saída inferior, conforme mostrado na Figura 3.

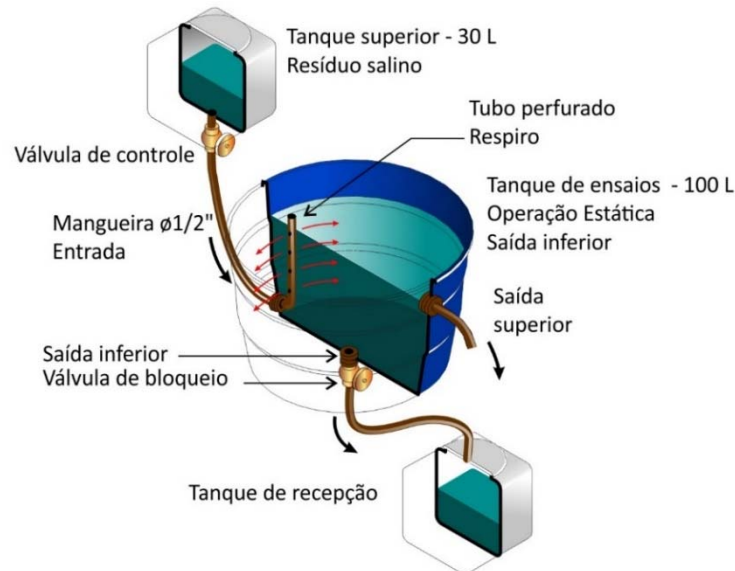


Figura 3. Corte esquemático do SAC – Operação em regime estático.

Fonte: Adaptado de Kummer, Wiecheteck e Széliga, 2016

Implantação do sistema

As doze unidades foram construídas e preenchidas com os meios suportes e durante quinze dias consecutivos, foi realizada a lavagem visando desobstruir os poros dos materiais particulados existentes no meio da brita nº1. Logo após, ocorreu o plantio com um adensamento de 68 mudas por m². Os colmos utilizados como mudas, foram retirados de plantas de capim-elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum) cultivar roxo.

Em seguida os SACs foram saturados com água. Efetuaram-se adubações de cobertura com a formulação 13:40:13 (N,P,K), avaliados a uma grama por planta por semana a fim de auxiliar o crescimento e a adaptação ao ambiente. Após 22 dias do plantio dos colmos, o rejeito salino foi introduzido nos sistemas.

Características do rejeito salino

O rejeito salino proveniente da estação piloto era armazenado em um tanque de equalização, a partir do qual eram feitas as coletas para a caracterização inicial. Desta forma foram verificadas variações nas características relativas à condutividade elétrica (CE) e aos sólidos dissolvidos totais (SDT), razão pela qual optou-se por padronizar os valores de CE (3500µScm⁻¹) e SDT (4500mgL⁻¹) efetuando-se a homogeneização com adição de água doce.

Descrição do tratamento e operação

Adotou-se uma adaptação da operação em bateladas, utilizando o mesmo volume de rejeito. Às sextas feiras, todos os reservatórios de alimentação (Figura 4(1)) eram abastecidos com o rejeito salino do tanque de equalização, em volume padronizado de 30 L cada. Logo após, abria-se lentamente os registros dos reservatórios, permitindo o escoamento do efluente pelas mangueiras (Figura 4 (2)) por gravidade até os SACs (Figura 4 (3)). Após a finalização dos TDHs os efluentes tratados eram transferidos para os reservatórios de coleta (Figura 4 (4)). Para cada tratamento operava-se um controle na vazão de entrada em cada SAC, que estava diretamente ligado ao TDH de cada tratamento. Posteriormente, iniciava-se o período seco dos sistemas.



Figura 4. Distribuição do efluente nos SACs- Sequência do tratamento.

Fonte: Os autores

Amostragem e análises laboratoriais

As coletas, o preparo e as análises laboratoriais das amostras seguiram as metodologias recomendadas no Standard Methods (APHA, 1998). As amostras dos efluentes foram coletadas no final do TDH de cada tratamento, para monitoramento dos parâmetros físico-químicos (pH, turbidez, salinidade, dureza, cálcio, CE e SDT), através do ponto de coleta (reservatório de descarga) de cada sistema.

Delfrate (2017) realizou as avaliações biométricas semanais nas plantas, ao longo das doze semanas de operação dos SACs, que incluiu os parâmetros como: a altura das plantas (cm), o diâmetro dos colmos (cm), números de folhas e massas fresca (g) e seca das folhas (g).

Foi realizada uma análise nas raízes que estavam em contato direto com o rejeito salino através de microscopia eletrônica de varredura. Este ensaio é utilizado para avaliar a morfologia dos materiais, identificando elementos químicos presentes nas amostras, produzindo imagens de alta resolução e grande ampliação de detalhes. As amostras das raízes foram preservadas para posterior visualização da estrutura no microscópio eletrônico, conforme orientações de Jungles (2011).

Medições micrometeorológicas

No decorrer do período experimental, diariamente foram registrados os dados de temperatura (°C) e umidade relativa do ar (URar, %), através de um termo higrômetro digital instalado dentro da casa de vegetação.

Análise estatística dos dados

As unidades amostrais (SACs) foram sorteadas aleatoriamente quanto à sua disposição dentro da casa de vegetação. Para a avaliação dos resultados utilizou-se o método do delineamento em blocos casualizados com repetições, aplicado a quatro tratamentos (T1, T2, T3 e T4), em 12 blocos (cada semana de operação) e três repetições para cada tratamento, perfazendo um total de 144 parcelas experimentais. Para comparar o desempenho entre SACs e o desempenho dos SACs durante cada semana de operação, utilizou-se a análise de variância (ANOVA, $p=0.05$) e o teste de Tukey ($p=0.05$). O processamento dos dados e sua análise estatística foi feito por meio do programa SISVAR (versão 5.6). Os resultados obtidos na análise das variáveis nos efluentes dos sistemas de tratamentos foram comparados com as condições e padrões de qualidade da água para águas salobras classe 1 segundo a Resolução CONAMA 357/2005 (Brasil, 2005).

Resultados e discussão

Caracterização do afluente

Para caracterização do rejeito salino proveniente do processo de osmose reversa, realizaram-se doze amostragens, sendo coletada uma amostra por semana, para determinação dos parâmetros físicos e químicos, conforme apresentado na Tabela 2.

É possível notar que os valores de pH estavam próximos a neutralidade. Os valores de turbidez indicam que o rejeito salino não é turvo. Os valores de salinidade definem o rejeito salino como água salobra, segundo a Resolução CONAMA 357/2005 (Brasil, 2005). O parâmetro dureza, segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2011), classifica como uma água muito dura, pois apresenta concentração em carbonato de cálcio superior a 180 mg.L^{-1} . Isto significa que o rejeito salino constitui uma fonte significativa de cálcio e magnésio (Kato, 1983). Os íons cloreto encontram-se em grande quantidade.

Tabela 2. Resultados da caracterização do afluente usado na alimentação dos sistemas

Parâmetros	N	Afluente - Rejeito Salino			
		x	DP	Min	Máx
pH	12	6.45	0.34	5.61	6.92
Turbidez (NTU)	12	0.84	0.47	0.33	1.89
Salinidade (PSU)	12	6.79	2.12	3.35	9.61
Dureza (mgL ⁻¹ de CaCO ₃)	12	821.18	107.53	650	988.37
Cálcio (mg L ⁻¹)	12	657.77	275.03	400	1262.6
Cloreto (mg L ⁻¹ de Cl ⁻)	12	1602.34	388.6	1110.76	2175.3
Condutividade Elétrica (µScm ⁻¹)	12	3500	0	3500	3500
Sólidos Dissolvidos Totais (mg L ⁻¹)	12	4500	0	4500	4500

Legenda: N: n° de amostras; x: média aritmética; DP: desvio padrão; Mín: valor mínimo; Máx: valor máximo.

Fonte: Os autores

Condição do ambiente – temperatura e umidade relativa do ar

Na quarta semana da operacionalização dos sistemas, houve uma queda brusca nas temperaturas, em virtude da frente fria associada a um forte sistema de baixa pressão atmosférica. As temperaturas nas madrugadas chegaram a ficar abaixo dos 5°C. Referente à umidade relativa, o valor máximo foi de 99% e o mínimo 65%.

Desempenho dos SACs - caracterização dos efluentes

Os alagados construídos são capazes de tolerar melhor as mudanças, se tiverem tempo para se estabilizar. Por isso, o rejeito salino foi introduzido no experimento após um mês de adaptação da planta ao novo habitat.

Foram avaliados os resultados obtidos nos quatro tratamentos, com coletas semanais de amostras. Os resultados correspondem às variações de pH, turbidez, salinidade, dureza, cálcio, cloretos, CE, SDT nas amostras dos efluentes dos sistemas T1, T2, T3 e T4. Totalizaram-se 12 do afluente bruto (rejeito salino) e 144 amostras do efluente tratado (12 amostras semanais, sendo uma amostra por SAC).

A Figura 5 apresenta a variação dos valores médios do pH, turbidez, salinidade e dureza nos efluentes dos SACs, avaliados durante doze semanas de monitoramento. A Figura 6 apresenta a variação dos valores médios de cálcio, cloretos e CE nos efluentes dos SACs, avaliados durante doze semanas de monitoramento.

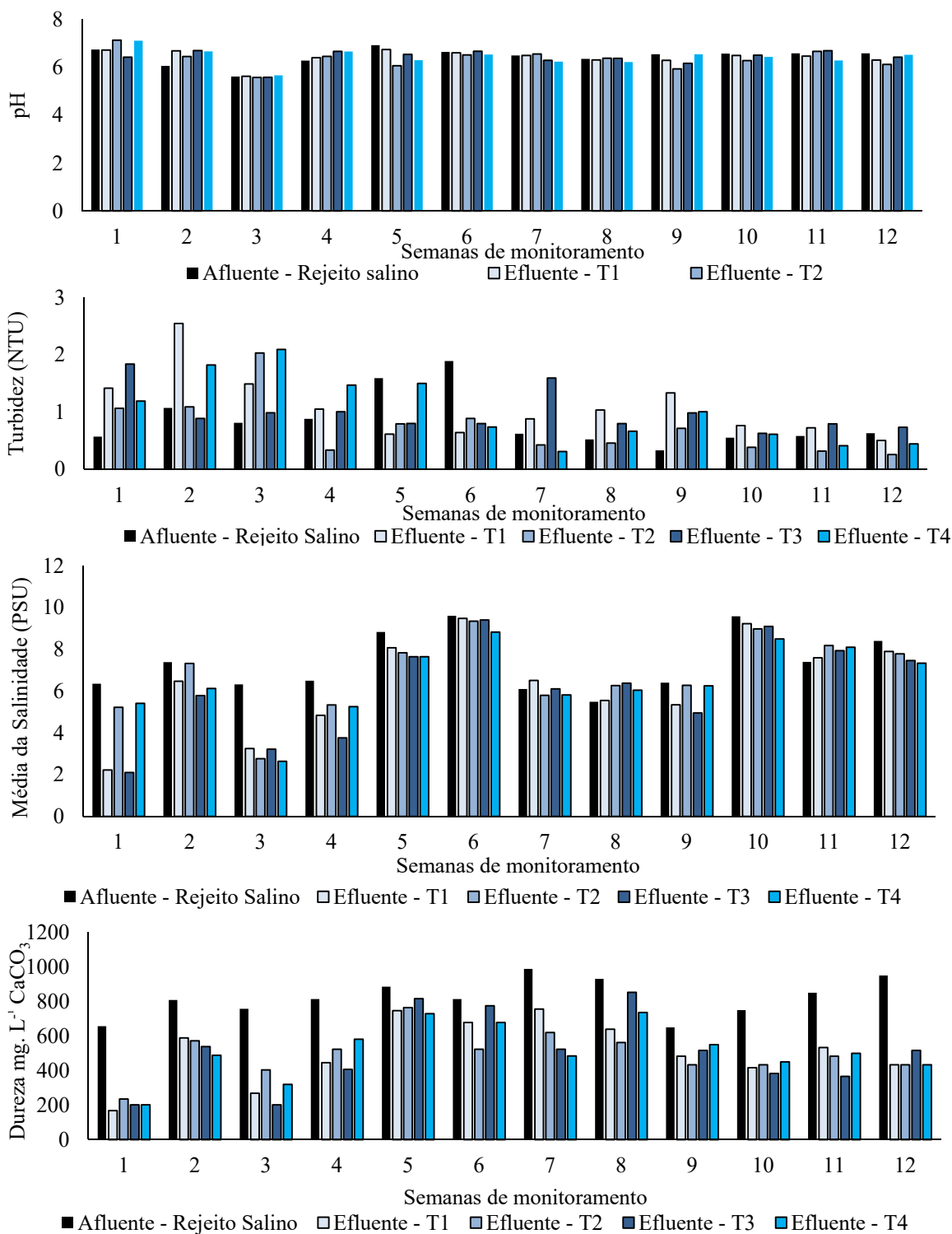


Figura 5. Variação dos valores médios de pH, turbidez, salinidade e dureza nos efluentes dos SACs, avaliados durante doze semanas de monitoramento. *Fonte: Os autores*

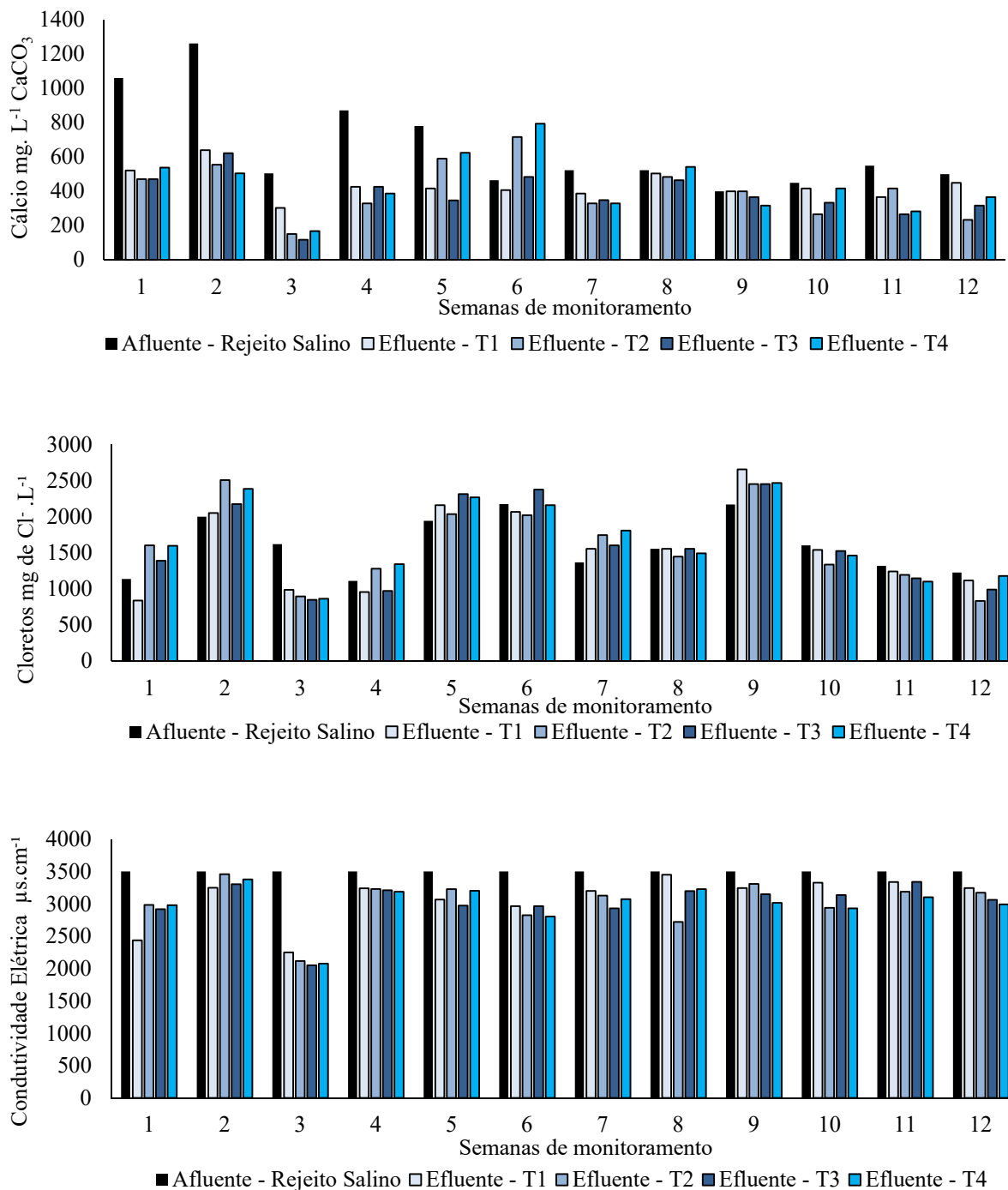


Figura 6. Variação dos valores médios de cálcio, cloretos e CE nos efluentes dos SACs, avaliados durante doze semanas de monitoramento. *Fonte: Os autores*

A Figura 7 apresenta a variação dos valores médios de SDT, nos efluentes dos SACs, avaliados durante doze semanas de monitoramento.

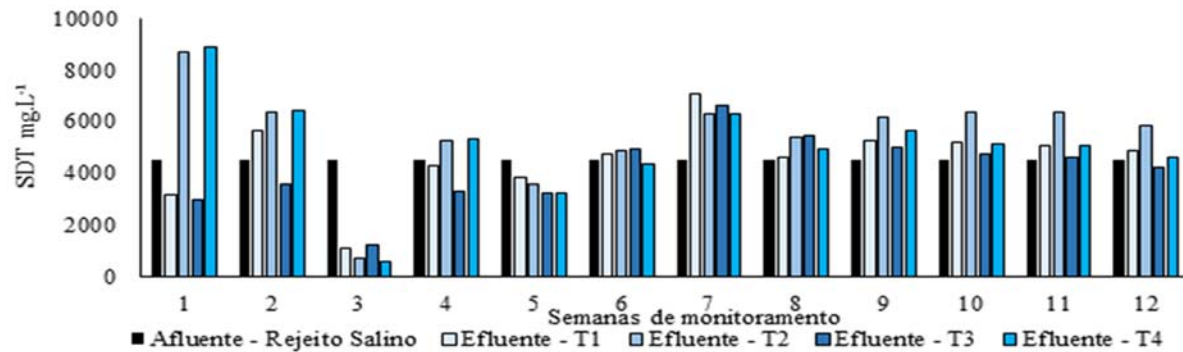


Figura 7. Variação dos valores médios de SDT nos efluentes dos SACs, avaliados durante doze semanas de monitoramento. *Fonte: Os autores*

De maneira geral os valores de pH resultaram próximos à neutralidade, sendo maiores nos efluentes dos tratamentos T4 e T2. Houve diferença estatística significativa ($p < 0.05$) entre as semanas de operação dos SACs e não entre os tratamentos. Os valores de pH encontrados para os efluentes tratados pelos doze sistemas situam-se dentro dos limites de 5 a 9 estabelecidos pela Resolução nº 357/2005 do CONAMA (Brasil, 2005), que estabelece padrões de lançamento de efluentes em curso d'água em território nacional.

A turbidez não foi removida devido à quantidade de sólidos suspensos e outros fatores em amostras pontuais. A variabilidade do sistema diminuiu nos SACs que operaram em regime estático. Houve diferença estatística significativa ($p < 0.05$) entre as semanas de operação dos SACs, e não entre os tratamentos. As últimas semanas de operação (da 10ª a 12ª semana) apresentaram valores médios de turbidez baixos se comparados aos das três primeiras semanas, isso porque o material orgânico presente em cada sistema foi removido em maior quantidade no início da operação. Pode-se dizer que houve influência das vegetações e do material das camadas filtrantes como areia, pedrisco e brita, nos SACs, sobre o controle deste parâmetro. Os valores obtidos ao longo das análises de turbidez nos efluentes finais ficaram dentro do estabelecido pela Resolução CONAMA 357/05 (Brasil, 2005), que determina uma turbidez de até 40 NTU para águas salobras de classe 1, destinadas à irrigação de hortaliças, irrigação de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto.

Para a variável salinidade houve diferença significativa ($p < 0.05$) entre os tratamentos. A vegetação e as camadas filtrantes que compunham os leitos de cada tratamento apresentaram influência sobre o controle deste parâmetro. Para análise estatística entre as médias de salinidade

em função das semanas que ocorreram os tratamentos, houve diferença estatística significativa ($p < 0.05$). A remoção de salinidade ocorreu com maior eficiência da 1ª à 4ª semana, como pode ser observado na Figura 8. Entre a 5ª e a 12ª semana, houve uma perda considerável de eficiência de remoção deste parâmetro. Os valores pouco significativos nas últimas semanas de operação se explicam devido à acumulação da salinidade nos leitos, tendo em vista que o capim-elefante produziu menor quantidade de biomassa, diminuiu a capacidade de absorção de nutrientes pelas raízes e contribuiu para o acúmulo deste no sistema. Mesmo assim, os efluentes se enquadram como água salobra pela Resolução nº 357/2005 do CONAMA (Brasil, 2005).

O tratamento T2 apresentou menor média para valores de dureza, enquanto nos efluentes que passaram pelo tratamento T1 apresentaram a maior média. Houve diferença estatística significativa ($p < 0.05$) dos valores médios da dureza em função das semanas que os tratamentos foram operados, e não entre os tratamentos. As eficiências médias de remoção de dureza do rejeito salino nos efluentes analisados, podem ser visualizadas na Figura 8. Ao longo dos períodos de monitoramento do experimento a maior eficiência de remoção nos SACs ocorreu na primeira semana de operação, com valor médio de 69.20%. A terceira semana também mostrou ser eficiente na remoção de dureza do afluente com valor médio de 60.60%. Essa redução aconteceu pela assimilação dos íons cálcio e magnésio pela microbiota e pelo capim-elefante, uma vez que estes íons tem um importante papel nas reações de troca catiônica e na produtividade global (Kadlec *et al.*, 2000).

As amostras de efluentes, coletados dos SACs dos quatro tratamentos, apresentaram uma redução gradual nas concentrações de cálcio a partir da primeira semana de operação, chegando, na terceira semana, ao menor valor médio de concentração de cálcio para o tratamento T3 de 117.85 mgL^{-1} de CaCO_3 . Pelo Teste de Tukey a 5%, houve diferença significativa ($p < 0.05$) entre os tratamentos. O regime de operação e os tempos de detenção hidráulicas interferiram nos resultados. Também houve diferença significativa ($p < 0.05$) entre as semanas que ocorreram os tratamentos. A partir da quarta semana houve uma instabilidade de eficiência de remoção de cálcio. Entre a 8ª e a 11ª semana houve um aumento gradual na eficiência de remoção de CaCO_3 . O aumento da concentração de cálcio que ocorreu na sexta semana, nos SACs dos tratamentos T2 e T4 (com 4 dias de TDH), foi observado no desenvolvimento do capim-elefante, por hipótese, presume-se elevação de rigidez da parede do caule, impondo resistência para o alongamento celular como apresentado por Delfrate (2017).

A maior concentração média de cloretos, durante as doze semanas de estudos, foi encontrada nos efluentes dos SACs do tratamento T4 e a menor nos efluentes dos SACs do tratamento T1. Com um nível de significância de 5%, pode-se afirmar que houve diferença significativa entre os tratamentos e entre as semanas de operação dos sistemas. Após a passagem do afluente pelos SACs houve uma redução da concentração de cloretos nos efluentes que foram coletados na terceira semana. A eficiência de remoção variou entre 39% (SACs do tratamento T1) e 47.6% (SACs

do tratamento T3). A remoção pode ter ocorrido pela absorção dos íons pela microbiota e pelo capim elefante. Com relação às 8^a, 10^a, 11^a e 12^a semanas apresentaram uma eficiência baixa de remoção, exceto a 8^a semana nos tratamentos T1 e T3, que não removeram cloreto do afluente. Nas demais semanas a eficiência foi negativa, com um acréscimo que variou entre 2.40% na quarta semana e 22.70% na sétima semana. As variações detectadas nas concentrações de cloretos podem ser decorrentes de deposições internas nos SACs, saturação da capacidade adsorvente e/ou absorvente dos elementos constituintes dos leitos de tratamento, como as britas e as próprias raízes do sistema.

De maneira geral os valores de condutividade elétrica foram reduzidos ao longo do experimento em todos os tratamentos, possivelmente devido ao consumo dos nutrientes pela planta. Isso ocorreu devido à precipitação do afluente e a baixa evapotranspiração durante o período das coletas, provocada pelas baixas temperaturas, proporcionando a diminuição na concentração iônica no rejeito salino como sulfatos e cloretos. A semana que apresentou o menor valor médio de condutividade elétrica entre os tratamentos foi a terceira semana. Portanto, com um nível de significância de 5%, pode-se afirmar que houve diferença significativa entre as semanas de operação dos sistemas. A remoção pode ter ocorrido pela absorção dos íons pelas camadas filtrantes e pelo capim-elefante, como também pelos processos de adsorção e troca catiônica. A partir da quarta semana os resultados foram menos satisfatórios, um fator a ser considerado é a solubilização de materiais orgânicos e de sólidos ao longo do sistema. Este fato sugere a hipótese de que nas primeiras semanas os SACs tinham maiores quantidades de nutrientes para o vegetal. E com a menor produção de biomassa nas últimas semanas diminuiu a capacidade de absorção do capim-elefante aumentando a concentração de nutrientes.

Ao observar o comportamento do parâmetro sólidos dissolvidos totais foi possível verificar que os menores valores foram encontrados nas amostras dos efluentes que passaram pelo tratamento T3 e as maiores nos efluentes que passaram pelo tratamento T2. Segundo o teste estatístico há diferença significativa entre os tratamentos. A semana que apresentou a menor concentração média de sólidos dissolvidos totais entre os tratamentos foi a terceira. Enquanto que a maior média deste parâmetro foi observada na sétima semana de operação. Portanto, com um nível de significância de 5 %, pode-se afirmar que houve diferença significativa entre as semanas de operação dos sistemas. A remoção dos sólidos dissolvidos totais ocorre através da sedimentação, filtração pelas raízes das plantas e pelo substrato (Kadlec *et al.*, 2000). Deste modo, acredita-se que pelo fato do rejeito salino passar nos leitos dos sistemas de alagados construídos (brita, pedrisco, areia, raízes), o efluente coletado deve possuir maiores quantidades de constituintes químicos dissolvidos e, possivelmente, esse processo possa ser o maior contribuinte para a concentração de SDT.

A Tabela 3 mostra o comparativo da eficiência de remoção para os parâmetros amostrados entre os quatro tratamentos estudados, durante a terceira semana de operação. A Figura 8 mostra a

eficiência de remoção dos diversos parâmetros analisados durante todo o experimento, ou seja, nas 12 semanas e a terceira semana foi a mais eficaz entre as semanas de operação, com um nível de significância de 5%. Por este motivo, foi a semana escolhida para comparar os valores de eficiência de remoção para os quatro tratamentos testados.

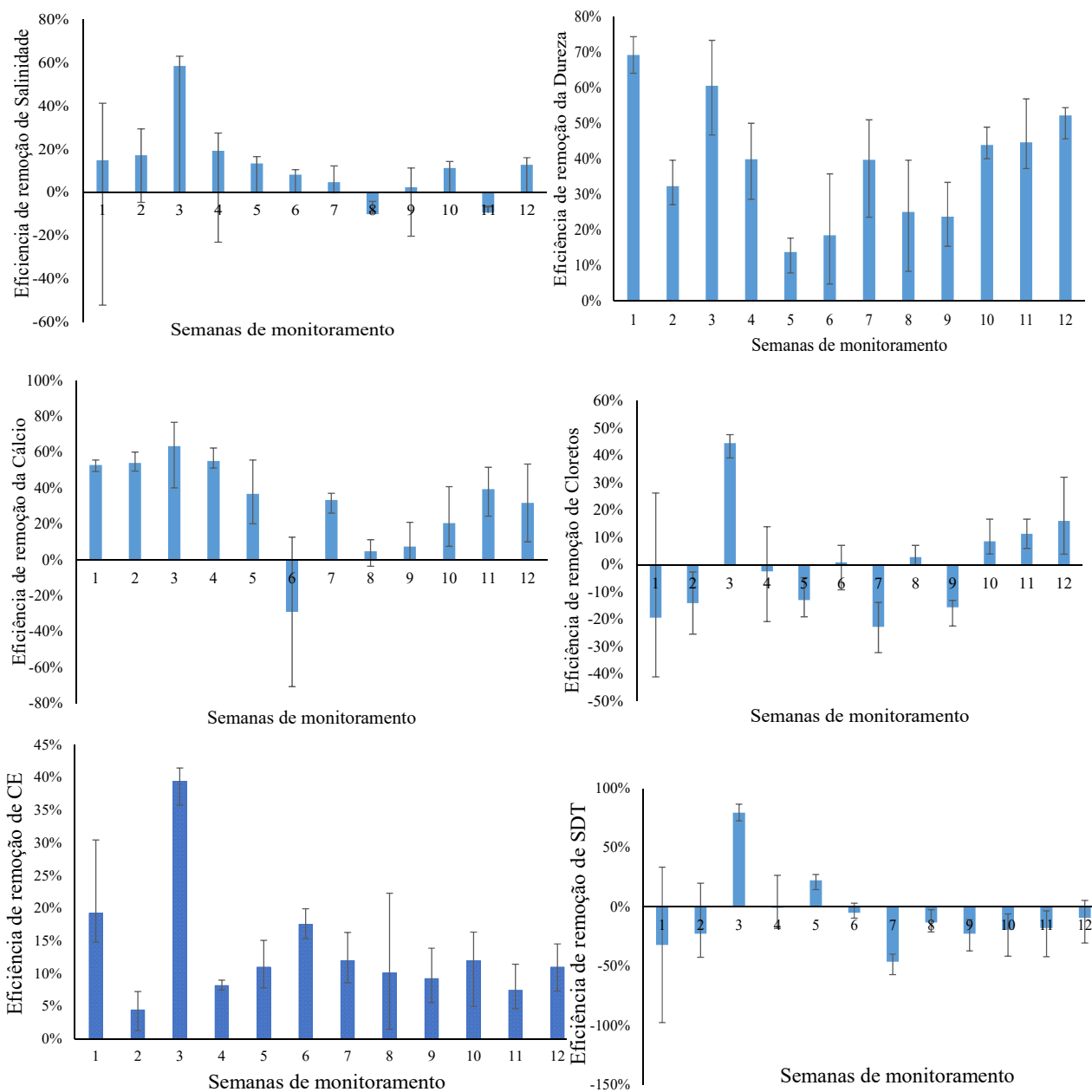


Figura 8. Eficiência média de remoção de salinidade, dureza, cálcio, cloreto, CE e SDT, entre os tratamentos nas semanas de operação dos SACs. *Fonte: Os autores*

Tabela 3. Comparativo da eficiência de remoção entre os tratamentos testados (T1, T2, T3 e T4) na terceira semana de operação

Parâmetro	Eficiência de Remoção (%)			
	T1	T2	T3	T4
Salinidade	48.6	56.3	49.2	58.3
Dureza	64.4	46.7	73.3	57.8
Cálcio	40	70	76.7	66.7
CE	35.8	39.6	41.5	40.7
SDT	75.5	83.7	72.5	86.7

Fonte: Os autores

A remoção de salinidade ocorreu com maior eficiência no tratamento T4 (58.3%) operado em regime estático com 4 dias de TDH. O tratamento T2 foi o segundo tratamento mais eficiente (56.3%), operado em regime estático com 3 dias de TDH. Com isso, a maior remoção de salinidade aconteceu nos sistemas trabalhados em regime estático.

A remoção de dureza ocorreu com maior eficiência no tratamento T3 (73.3%) que foi operado em regime dinâmico com 4 dias de TDH. O tratamento T1 foi o segundo tratamento mais eficiente (64.4%), operado em regime dinâmico com 3 dias de TDH. A maior remoção de dureza aconteceu nos sistemas trabalhados em regime dinâmico.

A remoção de cálcio ocorreu com maior eficiência no tratamento T3 (76.7%) que foi operado em regime dinâmico com 4 dias de TDH. E o tratamento T2 foi o segundo tratamento mais eficiente (70.0%), operado em regime estático com 3 dias de TDH. E o T4 foi o terceiro tratamento mais eficiente (66.7%) operado em regime estático com 4 dias de TDH. Por isso, a maior remoção de cálcio aconteceu nos sistemas trabalhados em regime estático e com 4 dias de TDH.

A remoção de condutividade elétrica ocorreu com maior eficiência no tratamento T3 (41.5%) que foi operado em regime dinâmico com 4 dias de TDH. O tratamento T4 foi o segundo tratamento mais eficiente (40.7%), operado em regime estático com 4 dias de TDH. A maior remoção de CE aconteceu nos sistemas trabalhados com TDH de 4 dias.

A remoção de sólidos dissolvidos totais ocorreu com maior eficiência no tratamento T4 (86.7%) que foi operado em regime estático com 4 dias de TDH. E o tratamento T2 foi o segundo tratamento mais eficiente (83.7%), operado em regime estático com 3 dias de TDH. Então, a maior remoção de SDT aconteceu nos sistemas trabalhados em regime estático.

Foram coletadas amostras de raízes de capim-elefante, cultivados nos sistemas de alagados construídos, sendo uma amostra de cada tratamento, escolhidos aleatoriamente. Uma amostra de raiz de uma planta que não foi submetida às condições de abastecimento do rejeito salino foi utilizada como base (branco) para análise dos resultados (raiz virgem).

Os resultados das microestruturas foram revelados no microscópio eletrônico para as cinco amostras, conforme Figura 9.

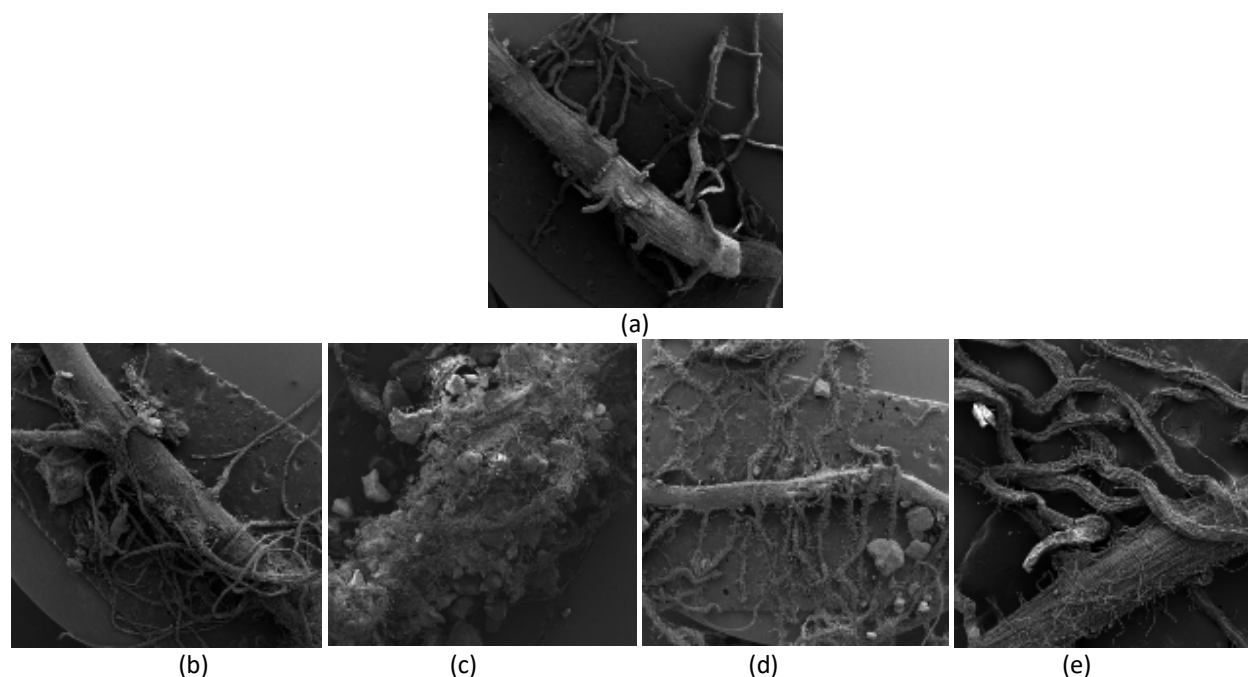


Figura 9. Imagens de microscopia eletrônica das raízes do capim-elefante.

- (a) Imagem de microscopia eletrônica da raiz do capim-elefante virgem;
- (b) Imagem de microscopia eletrônica da raiz do capim-elefante do SAC T1R3 (tratamento T1 repetição 3);
- (c) Imagem de microscopia eletrônica da raiz do capim-elefante do SAC T2R2 (tratamento T2 repetição 2);
- (d) Imagem de microscopia eletrônica da raiz do capim-elefante do SAC T3R2 (tratamento T3 repetição 2);
- (e) Imagem de microscopia eletrônica da raiz do capim-elefante do SAC T4R2 (tratamento T4 repetição 2).

Fonte: Os autores

As raízes do capim elefante que passaram pelo SAC do tratamento T1 (fluxo contínuo e TDH de 3 dias) e T4 (regime estático e TDH de 4 dias) apresentaram pelos absorventes esparsos, comprimento maior e diâmetro menor que os da “raiz virgem”, o que caracteriza um sistema mais aerado. Já as raízes do capim elefante que passaram pelo SAC do tratamento T2 (fluxo contínuo e TDH de 4 dias) e T3 (regime estático e TDH de 3 dias) apresentaram comprimento menor e diâmetro maior, comparado aos da “raiz virgem”, pelos absorventes em abundância, isto também caracteriza um sistema menos aerado. Em todas as raízes dos tratamentos observou-se a presença de elementos protuberantes que representam elementos químicos que associados com outros cátions não ficam disponíveis para absorção das plantas e acabam se solidificando.

Os resultados obtidos para a composição química dos elementos detectados nas microestruturas observadas antes do tratamento (raízes virgens) e pós-tratamento (raízes nos SACs) estão indicados na Figura 10 em peso percentual que consiste na parcela em peso de cada elemento em relação ao peso total dos elementos.

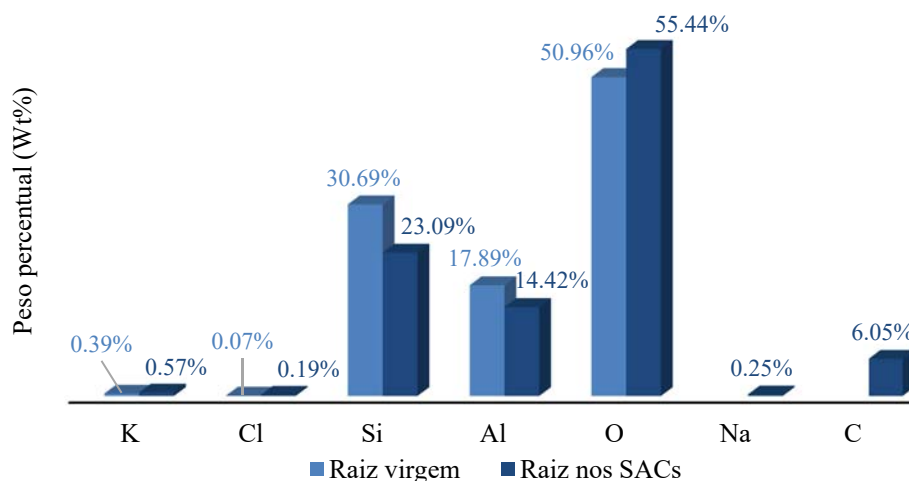


Figura 10. Peso percentual dos elementos químicos (média dos tratamentos T1, T2, T3 e T4) detectados na microscopia eletrônica para as raízes que passaram pelos SACs. *Fonte: Os autores*

Observa-se que houve um aumento na composição química da estrutura da raiz de 0.18% de potássio (K), 0.12% de cloro (Cl) e 4.48% de oxigênio (O). Este aumento de percentual em peso de oxigênio ocorreu devido aos períodos secos a que os SACs foram submetidos. Houve uma redução de 7.6% de silício (Si) e 3.47% de alumínio (Al). O elemento carbono apareceu na análise com um percentual em peso de 6.05% e o elemento sódio com peso percentual de 0.25%. Pode-se dizer que após a introdução do rejeito salino nos sistemas as raízes conseguiram absorver o íon sódio para a sua nutrição.

Comparando os resultados obtidos da microscopia eletrônica entre as raízes das plantas, é possível afirmar que suas raízes colaboraram na ação da filtragem biológica, pois, aumentou a superfície de contato, o que estabilizou o meio suporte, liberando oxigênio, que facilitou a absorção de nutrientes e proporcionou a liberação de exsudatos radiculares importantes para as reações.

Conclusão

Os resultados obtidos neste trabalho indicaram que os sistemas de alagados construídos podem ser utilizados para o tratamento de rejeito salino, proveniente do processo de dessalinização por osmose reversa, com melhoria nos índices de qualidade da água até a terceira semana de operação com um nível de significância de 5%. A partir da quarta semana, as plantas apresentaram características de saturação e déficit nutricional, trabalhando de forma lenta e menos eficiente.

O TDH de 4 dias e operação em regime estático, mostrou ser eficiente na remoção das variáveis analisadas, como salinidade, cálcio, cloreto, CE, SDT. Também foi mais eficaz para o desenvolvimento da planta, para que houvesse a depuração do rejeito salino.

No geral, a água tratada se enquadrou dentro dos limites e padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005 para águas salobras classe 1, águas que podem ser destinadas: à recreação de contato primário, à proteção das comunidades aquáticas; à aquicultura e à atividade de pesca; ao abastecimento para consumo humano após tratamento convencional ou avançado; à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película, e à irrigação de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto.

Agradecimentos

Ao U.S. State Department e British Council pelos recursos financeiros obtidos por meio do Global Innovation Initiative para o desenvolvimento do projeto Implementing and monitoring a sustainable desalination pilot plant, em parceria com a Companhia de Saneamento do Paraná, a University of North Texas, a University College London e a Universidade Estadual de Ponta Grossa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e à Fundação Araucária pelo auxílio ao projeto.

Ao Engenheiro Agrônomo Willian Roger Zaika pelas orientações quanto ao plantio e adubação do capim elefante nos sistemas de alagados construídos.

Ao Setor de Ciências Agrárias e de Tecnologia da Universidade Estadual de Ponta Grossa pelo espaço cedido dentro da casa de vegetação para a realização do experimento.

Referências

- APHA AWWA, WPCF Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998) Washington, 20 ed.
- BRASIL Ministério do Meio Ambiente Resolução CONAMA 357/05 (2005) Acesso em 03 de março de 2017, disponível em: <http://www.mma.gov.br>
- Delfrate B.C. (2017) Desenvolvimento e parâmetros fisiológicos de capim-elefante cultivado sobre rejeito salino em sistema alagado construído. Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Agrônoma na UEPG. Ponta Grossa. 50 pp.
- Elnav R., Harussi K., Perry D. (2002) The footprint of the desalination processes on the environment. Israel. *Desalination*, **152**, 141-154.
- Jibril, B. E.-Y.; Ibrahim, A. A. (2001) Chemical conversions of salt concentrates from desalination plants. *Desalination*, **139**, 287-295.
- Jungles M.K. (2011) Desenvolvimento de grânulos aeróbios o trataemnto de esgoto sanitário em reatores operados em bateladas sequenciais (RBS). Tese de doutorado em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 133 pp.
- Kadlec, R. H. (2000) Constructed Wetlands for Pollution Control: process, performace, design and operation. *Scientific and Technical Report*, (8), 156 pp.
- Kato, M. T. "Dureza" (1983) Curso Qualidade da Água, do Ar e do Solo. Escola de Engenharia Mauá., São Caetano do Sul/SP.
- Kummer A.C.B., Wiechietek G.K., Széliga M.R. (2016) Sistema de alagados construídos aplicado ao tratamento e reúso do resíduo concentrado de dessalinização. Em: Juliana Heloisa Pinê Américo-Pinheiro; Sandra Medina Benini; Maria Betânia Moreira Amador. (Org.). *Recursos hídricos: gestão e sustentabilidade. 1ed.Tupã/SP.*, **1**(1), 160-173.
- Morillo, J. (2014) Comparative study of brine management technologies for desalination plants. *Desalination*, Spain, **336**, 32-49.
- Mickey M.C. (2004) Desalination concentrate management and issues in the United States. Acesso em 20 de março de 2017, disponível em: <http://www.twdb.state.tx.us/Desalination/Desal/proceedings/Mickey.pdf>
- Porto, E. R. (2001) Uso de rejeito da dessalinização de água salobra para irrigação da erva-sal (*Atriplex nummularia*). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **5**(1),111-114 pp.
- Quege K. E., Almeida R. A., Ucker F.E. (2013) Utilização de plantas de Bambu no tratamento de esgoto sanitário pelo Sistema de Alagados Construídos. *Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, **10**(10), 2069-2080.
- Quirie, M. (2013) Inland Treatment of the Brine Generated from Reverse Osmosis Advanced Membrane Wastewater Treatment Plant Using Epuvalisation System. *International Journal of Molecular Sciences*, **14**, 13808-13825.
- Soares, T. M. (2006) Destinação de águas residuárias provenientes do processo de dessalinização por osmose reversa. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, **10**, 730-737.
- Torquemada Y.F., Lizaso J.L.S. (2009) Mixing behavior of brine discharge from a SWOR desalination plant. IDA World Congress. Dubai.
- WHO (2011) Guidelines for Drinking - Water Quality, four edition, Geneva.
- Zanela L. (2008) Plantas ornamentais no pós-tratamento de efluentes sanitários: wetlands-construídos utilizando brita e bambu como suporte. Faculdade Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. 189 Dib p.