

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
CURSO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS

***WETLANDS* CONSTITUÍDOS COM MEIO SUPORTE DE SOLO E FIBRA DE**
COCO PLANTADOS COM AS CULTURAS PRODUTORAS DE GRÃOS PARA
REMOÇÃO DE SAIS DE ESGOTO DOMÉSTICO

MAIANE COSTA FERREIRA

CRUZ DAS ALMAS - BA

junho/2025

**WETLANDS CONSTITUÍDOS COM MEIO SUPORTE DE SOLO E FIBRA DE
COCO PLANTADOS COM AS CULTURAS PRODUTORAS DE GRÃOS PARA
REMOÇÃO DE SAIS DE ESGOTO DOMÉSTICO**

Maiane Costa Ferreira

Engenheira Civil

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Dissertação apresentada ao Colegiado do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo
da Bahia, como requisito para obtenção do Título
de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Profa. Dra. Selma Cristina da Silva

CRUZ DAS ALMAS - BA

junho/2025

FICHA CATALOGRÁFICA

F383w

Ferreira, Maiane Costa.

Wetlands constituídos com meio suporte de solo e fibra de coco plantados com as culturas produtoras de grãos para remoção de sais de esgoto doméstico / Maiane Costa Ferreira. – Cruz das Almas, BA, 2024.

121f.; il.

(Dissertação) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas, Mestrado em Engenharia Agrícola.

Orientadora: Profa. Dra. Selma Cristina da Silva.

1.Esgotos – Projetos e construção. 2.Solo – Manejo – Qualidade. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas. II.Título.

CDD: 628.24

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
CURSO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS

***WETLANDS* CONSTITUÍDOS COM MEIO SUPORTE DE SOLO E FIBRA DE
COCO PLANTADOS COM AS CULTURAS PRODUTORAS DE GRÃOS PARA
REMOÇÃO DE SAIS DE ESGOTO DOMÉSTICO**

Comissão examinadora de defesa de dissertação

Maiane Costa Ferreira

Aprovada em: 04 de abril de 2025

Prof. Dr^a. Selma Cristina da Silma

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
(Orientadora)

Prof. Dr. Eduardo Henrique Borges Cohim Silva

Universidade Federal de Feira de Santana
(Examinador externo)

Prof. Dr. Mairton Gomes da Silva

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
(Examinador externo)

DEDICATÓRIA

À minha mãe (in memoriam), que nunca mediu esforços para me proporcionar todas as oportunidades. Por sempre colocar seus filhos em primeiro lugar, por me ensinar a ser forte, por mostrar a importância da educação e por estar ao meu lado em todos os momentos. Não teria ingressado no mestrado sem o seu apoio. Esteve presente, acompanhando-me em cada passo, fazendo-me companhia e dando-me força para continuar durante o primeiro ano desta jornada. E à minha Aurora, luz que Deus me enviou após a partida da mãe que tanto amei, e que agora me ensina, com seu sorriso, a seguir em frente com coragem. Mesmo ausente em corpo, minha mãe segue cuidando de mim — e em Aurora, encontrei o amor que renovou minhas forças para concluir esta caminhada.

.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela força e sabedoria que me guiaram em cada etapa desta jornada acadêmica. Ao meu marido Ewerton, pela parceria incondicional, pelo apoio incansável e por ser meu alicerce nos momentos mais desafiadores.

Minha profunda gratidão à minha irmã Carlane, por cada conselho acertado e por suas palavras que sempre me motivaram a continuar. Ao meu irmão Jô, pelas risadas que aliviaram a pressão do mestrado e pelos muitos filmes e series que assistimos juntos. E ao meu pai, pelo cuidado, carinho e dedicação.

Ao meu querido afilhado Bernardo, cuja pureza e alegria me faziam esquecer qualquer problema. À tia Tânia, pela companhia inestimável, pelos cuidados e pelos deliciosos almoços na Paraty.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pelo apoio financeiro fundamental (Pedido de Bolsa Nº: 335 / Termo de Outorga de Bolsa Nº: BOL0116/2023). À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB) e ao programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola – PPGEA, meu sincero agradecimento por terem me proporcionado a estrutura necessária para meu crescimento acadêmico e pessoal.

Aos professores que compartilharam seus conhecimentos e enriqueceram minha formação. À minha orientadora, pela dedicação exemplar, pela paciência e pelo cuidado em orientar cada etapa deste trabalho.

Minhas colegas Tainan, Kelly e Luma (minha dupla de todas as horas) e a Carol, que me salvou incontáveis vezes no laboratório - vocês foram minha rede de apoio essencial.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta conquista - cada gesto de apoio fez parte dessa trajetória.

RESUMO

No Brasil, os índices de coleta e tratamento de esgoto ainda são baixos, embora seja essencial para a sustentabilidade dos recursos hídricos e para a proteção da saúde pública. Apenas 61,42% da população urbana tem acesso à rede de esgoto, e cerca de 18,8% dos efluentes coletados não recebem tratamento adequado e apenas 60,73% dos esgotos gerados são coletados. Portanto, se faz necessária a busca de soluções eficazes e de baixo custo para reduzir o déficit no atendimento desse serviço. Neste contexto, os *wetlands* construídos surgem como uma alternativa promissora, por se tratar de um sistema natural e eficiente no tratamento dos esgotos domésticos e agregar benefícios, como o uso de solo da própria região e por possibilitar o cultivo simultâneo de grãos de base alimentar e humana. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho dos WCFV na remoção de sais de esgoto doméstico pós-reator UASB, utilizando culturas de feijão (*Phaseolus vulgaris*) e sorgo (*Sorghum*) e meio suporte composto de solo misturado com areia grossa, com e sem o uso de fibra de coco. O sistema experimental era composto de três unidades de WCFV montados em caixas d'água de polietileno de 250 L e um reservatório de alimentação. O sistema foi operado de forma intermitentes com taxa de aplicação hidráulica de $0,08\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}^1$. Foram monitorados os parâmetros cor, turbidez, cálcio, magnésio, potássio, sódio e condutividade elétrica, além da qualidade do solo antes e após cada ciclo para avaliar possíveis efeitos de salinização e sodificação. Os resultados demonstraram que a unidade com fibra de coco manteve desempenho estável ao longo dos ciclos, alcançando remoções médias de 58,09% para cor e 42,05% para turbidez no segundo ciclo, indicando que a fibra de coco contribuiu para a estabilidade do sistema. Entre as culturas, o feijão destacou-se na remoção de cor (61%) e turbidez (73%) no primeiro ciclo, enquanto o sorgo apresentou maior eficiência na redução da condutividade elétrica (19% no primeiro ciclo) e do potássio (50% no segundo ciclo). No entanto, ambos os sistemas apresentaram limitações na remoção de cálcio e magnésio, observando-se inclusive aumento das concentrações desses íons nos efluentes. Assim, os resultados indicam que os WCFV com meio suporte de solo e fibra de coco possuem potencial para aplicação em áreas com recursos limitados, especialmente para a clarificação de esgotos. Contudo, recomenda-se a realização de estudos complementares para avaliar a viabilidade a longo prazo do uso da fibra de coco e a eficácia na remoção de sais específicos.

Palavras-chaves: remoção de sais; tratamento de esgotos; salinização e sodificação; solos.

ABSTRACT

In Brazil, sewage collection and treatment rates are still low, despite being essential for the sustainability of water resources and the protection of public health. Only 61.42% of the urban population has access to the sewage network, and about 18.8% of the collected effluents do not receive adequate treatment, while only 60.73% of the generated sewage is collected. Therefore, there is a need to seek effective and low-cost solutions to reduce the service gap in sanitation. In this context, constructed wetlands emerge as a promising alternative, as they are natural and efficient systems for treating domestic sewage and offer additional benefits, such as the use of locally available soil and the possibility of cultivating food and grain crops simultaneously. Thus, this study aimed to evaluate the performance of horizontal subsurface flow constructed wetlands (HSSF CWs) in the removal of salts from domestic sewage after UASB reactor treatment, using common bean (*Phaseolus vulgaris*) and sorghum (*Sorghum*) crops, with a support medium composed of soil mixed with coarse sand, with and without the addition of coconut fiber. The experimental system consisted of three HSSF CW units assembled in 250 L polyethylene water tanks and a feeding reservoir. The system was operated intermittently with a hydraulic loading rate of $0.08 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{day}$. The parameters monitored were color, turbidity, calcium, magnesium, potassium, sodium, and electrical conductivity, in addition to soil quality before and after each cycle to assess potential salinization and sodification effects. The results showed that the unit with coconut fiber maintained stable performance throughout the cycles, achieving average removals of 58.09% for color and 42.05% for turbidity in the second cycle, indicating that the coconut fiber contributed to system stability. Among the crops, beans stood out in the removal of color (61%) and turbidity (73%) in the first cycle, while sorghum showed higher efficiency in reducing electrical conductivity (19% in the first cycle) and potassium (50% in the second cycle). However, both systems showed limitations in the removal of calcium and magnesium, with increases in the concentrations of these ions observed in the effluents. Therefore, the results indicate that HSSF CWs with soil and coconut fiber support media have potential for application in areas with limited resources, especially for sewage clarification. However, further studies are recommended to assess the long-term feasibility of using coconut fiber and its effectiveness in removing specific salts.

Keywords: salt removal; wastewater treatment; salinization and sodification; soils.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Classificação dos wetlands construídos segundo as macrófitas e tipo de fluxo.	20
Figura 2. Esquema representativo do perfil longitudinal do wetland construído de Fluxo horizontal (a), de fluxo vertical (b) e de fluxo superficial (c).	23
Figura 3. Raízes de uma planta de feijão em detalhes.	39
Figura 4. Planta de sorgo com suas raízes.	43
Figura 5. Camada inferior de nivelamento (a); Tubo de drenagem forrado com bidim (b); Sistema de drenagem completo (c); tela de malha fina que receberá o solo (d).	51
Figura 6. Casca de coco verde desfiada (a); Lavagem da fibra de coco já seca (b).	51
Figura 7. Perfil dos leitos filtrantes e camada de drenagem das unidades experimentais WCFV.	52
Figura 8. Leito filtrante e local onde foi instalado o último piezômetro (a); Leito totalmente preenchido e com a camada superficial de brita (b).	53
Figura 9. Sistema de distribuição dos WCFV-1 (a), WCFV-2 (b) e WCFV-3 (c); Sistema experimental completo (d).	54
Figura 10. Mistura de solo e adubo orgânico (a); solo adubado com covas para receber as sementes de sorgo (b) e de feijão (c); Feijão transplantado no WCFV-1 (d) e WCFV-3 (f) e do sorgo no WCFV-2 (e).	55
Figura 11. Eficiências médias de remoção (%) de cor (a) e turbidez (b) das unidades WCFV plantadas com feijão (WCFV3) e com sorgo (WCFV2), no primeiro e segundo ciclo das culturas.	62
Figura 12. Remoção média de cor (%) pelas unidades experimentais WCFV com meio suporte de solo sem fibra, plantado com as culturas de feijão (WCFV3) e sorgo (CVFV2), no primeiro ciclo (a) e no segundo (b) ciclo das culturas.	62
Figura 13. Remoção média de turbidez (%) pelos WCFV com meio suporte de solo sem fibra, plantados com as culturas de feijão (WCFV2) e sorgo (WCFV3), no primeiro ciclo (a) e no segundo (b) ciclo das culturas.	63
Figura 14. Gráfico box plot das concentrações de cor do afluente (UASB) e dos efluentes dos WCFV plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2), no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	63

Figura 15. Gráfico box plot das concentrações de Turbidez do afluyente (UASB) e dos efluentes dos WCFV plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2), no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	64
Figura 16. Eficiências médias de remoção (%) de cor (a) e turbidez (b) das unidades com fibra (WCFV1) e sem fibra de coco (WCFV3), no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	67
Figura 17. Remoção de cor (%) do efluente dos WCFV e dos efluentes dos wetlands de solo com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3), no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	67
Figura 18. Remoção de turbidez (%) do efluente dos WCFV e dos efluentes dos wetlands de solo com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3), no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	68
Figura 19. Gráfico <i>box plot</i> das concentrações de cor do afluyente (UASB) e dos efluentes dos WCFV com meio suporte de solo com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3), no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	68
Figura 20. Gráfico box plot das concentrações de turbidez do afluyente (UASB) e dos efluentes dos wetlands de solo com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3), no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	69
Figura 21. Eficiências médias de remoção (%) da condutividade elétrica (CE) pelos WCFV com meio suporte de plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2), no primeiro e segundo ciclos das culturas.....	75
Figura 22. Eficiências médias de remoção (%) de Ca^{+2} (a) e Mg^{+2} (b) pelos WCFV com meio suporte de solo plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2), no primeiro e segundo ciclos.	76
Figura 23. Eficiências médias e remoção (%) de Na^{+} (a) e K^{+} (b) nos WCFV com meio suporte de solo, plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2), no primeiro e no segundo ciclo.	77
Figura 24. Remoção de CE (%) dos efluentes das unidades WCFV com meio suporte de solo, plantados com as culturas de feijão (WCFV3) e do sorgo (WCFV2), ao longo do primeiro (a) e do segundo (b) ciclo das culturas.	78

Figura 25. Remoção de Ca^{+2} (%) do efluente dos WCFV com meio suporte de solo plantado com as culturas de feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) ao longo do primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.....	78
Figura 26. Remoção de Mg^{+2} (%) do efluente dos WCFV com meio suporte de solo sem fibra, plantados com as culturas de feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) ao longo do primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	79
Figura 27. Remoção de Na^{+} (%) do efluente dos WCFV com meio suporte de solo sem fibra, plantados com as culturas de feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) ao longo do primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	79
Figura 28. Remoção de K^{+} (%) do efluente dos WCFV com meio suporte de solo sem fibra, plantados com as culturas de feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) ao longo do primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	80
Figura 29. Gráfico box plot da CE (dS/cm) do afluente e do efluente dos WCFV plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	81
Figura 30. Gráfico box plot da Ca^{+2} (mg/L) do afluente e do efluente dos WCFV plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	81
Figura 31. Gráfico box plot da Mg^{+2} (mg/L) do afluente e do efluente dos WCFV plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	82
Figura 32. Gráfico box plot do Na^{+} (mg/L) do afluente e do efluente dos WCFV plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	82
Figura 33. Gráfico box plot da K^{+} (mg/L) do afluente e do efluente dos WCFV plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	83
Figura 34. Eficiências médias de remoção (%) da condutividade elétrica (CE) pelos WCFV com meio suporte sem fibra (WCFV3) e com fibra (WCFV2), no primeiro e segundo ciclos das culturas.	86
Figura 35. Eficiências médias de remoção (%) de Ca^{+2} (a) e Mg^{+2} (b) pelos WCFV com meio suporte sem fibra (WCFV3) e com fibra (WCFV1), no primeiro e segundo ciclos...	87
Figura 36. Eficiências médias e remoção (%) de Na^{+} (a) e K^{+} (b) nos WCFV com meio suporte sem fibra (WCFV3) e com fibra (WCFV1), no primeiro e no segundo ciclo.	87
Figura 37. Remoção de CE (%) dos efluentes das unidades WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3), ao longo do primeiro (a) e do segundo (b) ciclo das culturas.	89

Figura 38. Remoção de Ca^{+2} (%) do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV2), ao longo do primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	89
Figura 39. Remoção de Mg^{+2} (%) do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3), ao longo do primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	90
Figura 40. Remoção de Na^{+} (%) do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3), ao longo do primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	90
Figura 41. Remoção de K^{+} (%) do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3), ao longo do primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	91
Figura 42. Gráfico box plot da CE (dS/cm) do afluente e do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	93
Figura 43. Gráfico box plot da Ca^{+2} (mg/L) do afluente e do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	93
Figura 44. Gráfico box plot da Mg^{+2} (mg/L) do afluente e do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	94
Figura 45. Gráfico box plot do Na^{+} (mg/L) do afluente e do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	94
Figura 46. Gráfico box plot da K^{+} (mg/L) do afluente e do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.	95

TABELAS

Tabela 1. Diferenças entre os <i>wetlands</i> de fluxo Subsuperficial horizontal (WCFH) e vertical (WCFV) e Escoamento superficial de fluxo horizontal (WCFH).	21
Tabela 2. Espécies de macrófitas mais utilizadas em <i>wetlands</i> construídos.....	24
Tabela 3. Vantagens e desvantagens de <i>wetlands</i> construídos.....	26
Tabela 4. Eficiências de remoção de poluentes encontradas por diferentes autores utilizando diferentes macrófitas aquáticas e meios suportes.	27
Tabela 5. Ranking dos dez países maiores produtores de feijão do mundo no ano de 2022.	38
Tabela 6. Ranking dos dez estados maiores produtores de feijão no Brasil no ano de 2023.	39
Tabela 7. Principais características de cada tipo de sorgo.	44
Tabela 8. Ranking dos dez países maiores produtores de sorgo do mundo no ano de 2022.	44
Tabela 9. Ranking dos dez estados maiores produtores de sorgo no Brasil no ano de 2023.	45
Tabela 10. Ranking dos dez países maiores produtores de coco no mundo no ano de 2022	46
Tabela 11. Ranking dos dez Estados maiores produtores de coco no Brasil, no ano de 2023	46
Tabela 12. Propriedades físico-químicas da fibra da casca do coco verde in natura.	48
Tabela 13. Parâmetros de qualidade e seus respectivos métodos, aparelhos e procedimentos de análise	57
Tabela 14. Concentrações de cor e turbidez dos esgotos afluente e efluente das unidades WCFV com meio suporte de solo sem fibra de coco, no 1º e 2º ciclos das culturas do feijão e do sorgo.....	61

Tabela 15. Concentrações de cor e turbidez dos esgotos afluentes e efluentes das unidades WCFV em dois ciclos das culturas do feijão com meio suporte de solo com e sem fibra de coco.....	66
Tabela 16. Características dos esgotos afluente e efluente das unidades de <i>wetland</i> com as culturas do feijão (WCFV3) e do sorgo (WCFV2).	71
Tabela 17. Concentrações de sais nas camadas de 0-5 cm dos solos da unidade WCFV3 com a cultura do feijão, antes e após a aplicação dos esgotos para tratamento no final dos dois ciclos da cultura.	71
Tabela 18. Concentrações de sais nas camadas de 0-5 cm dos solos da unidade WCFV2 com a cultura do sorgo, antes e após a aplicação dos esgotos para tratamento no final dos dois ciclos da cultura.	72
Tabela 19. Características físico-químicas nas camadas de 0-5 cm dos solos da unidade WCFV3 (feijão), antes e após a aplicação dos esgotos para tratamento após dois ciclos das culturas.	72
Tabela 20. Características físico-químicas nas camadas de 0-5 cm dos solos da unidade WCFV2 (sorgo), antes e após a aplicação dos esgotos para tratamento após dois ciclos das culturas.	72
Tabela 21. Características dos esgotos afluente e efluente das unidades de <i>wetland</i> com as culturas do feijão (WCFV3) e do sorgo (WCFV2).	84
Tabela 22. Concentrações de sais nas camadas de 0-5 cm dos solos da unidade WCFV3, plantado com a cultura do feijão, antes e após a aplicação dos esgotos para tratamento no final do 1º e 2º ciclos da cultura.	96
Tabela 23. Concentrações de sais nas camadas de 0-5 cm dos solos da unidade WCFV2 plantados com a cultura do sorgo, antes e após a aplicação dos esgotos para tratamento no final do 1º e 2º ciclos da cultura.	97
Tabela 24. Valores médios de condutividade hidráulica (K) dos solos das unidades de WCFV no fim do primeiro e segundo ciclo	98

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
TABELAS	12
1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVO GERAL.....	18
3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
4.1. <i>WETLANDS</i> CONSTRUÍDOS (WCs)	19
4.2. SALINIZAÇÃO E SODIFICAÇÃO DOS SOLOS	30
4.3. COLMATAÇÃO DO SOLO	33
4.4. FERTILIDADE DOS SOLOS.....	36
4.5. O FEIJÃO	38
4.6. O SORGO.....	42
4.7. O COCO	45
4.8. SUBPRODUTO DO COCO (ENDOCARPO E MESOCARPO).....	47
4.8.1. Característica do mesocarpo	48
5. METODOLOGIA.....	50
5.1. MONTAGEM DO SISTEMA EXPERIMENTAL	50
5.2. O SOLO.....	54
5.3. PLANTIO E TRANSPLANTIO DAS MUDAS	55
5.4. OPERAÇÃO E MONITORAMENTO.....	56
5.4.1. Qualidade físico-químicas dos afluentes e efluentes	56
5.4.2. Determinação de sódio (Na ⁺) e potássio (K ⁺).....	57

5.4.3.	Dureza Total.....	58
5.4.4.	Monitoramento da qualidade do solo	59
5.4.5.	Razão de Adsorção de Sódio (RAS).....	59
5.4.6.	Condutividade hidráulica do solo (K)	60
5.5.	ANÁLISE ESTATÍSTICA	60
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
6.1.	PLANTAS DO FEIJÃO E DO SORGO NA REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ 61	
6.2.	SOLO COM E SEM FIBRA DE COCO NA REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ 66	
6.3.	REMOÇÃO DE SAIS	71
6.3.1.	Plantas do feijão e do sorgo na remoção de sais.....	71
6.3.2.	Meio suporte com e sem fibra de coco na remoção de sais.....	84
6.4.	SALINIZAÇÃO E SODIFICAÇÃO DOS SOLOS	96
6.5.	COLMATAÇÃO.....	98
7.	CONCLUSÃO.....	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

1. INTRODUÇÃO

O tratamento dos esgotos é essencial não apenas para assegurar a sustentabilidade dos recursos hídricos, mas também para proteger a saúde pública. Porém, no Brasil, os índices de coleta e tratamento de esgotos são baixos. De acordo com o SNIS (2022), apenas 60,73% dos esgotos gerados no Brasil são coletados, e, desse total, 81,64% recebem tratamento adequado. Esses dados evidenciam que, além da baixa de cobertura universal na coleta de esgoto, uma parte dos efluentes coletados ainda não passa por tratamento apropriado, reforçando a necessidade de ampliação dos serviços de saneamento básico no país.

Os esgotos domésticos podem ser tratados por processos biológicos ou químicos. Geralmente os biológicos são mais utilizados devido aos menores custos envolvidos. Porém, os processos biológicos convencionais, mesmo tendo menores custos em relação aos químicos, são complexos e tem custos elevados comparados aos sistemas simplificados. Entre os sistemas simplificados se encontram os *wetlands* construídos (WCs), também conhecidos como zonas úmidas construídas ou filtros plantados com macrófitas.

Os WCs se constituem uma alternativa atraente aos métodos tradicionais de tratamento de esgotos e tem como vantagens: baixos custos de construção e operação, facilidade de manutenção, efeitos paisagísticos significativos, sem agredir o meio ambiente (Muduli *et al.*, 2023); produção de biomassa vegetal, que podem gerar atividade econômica (Zanella, 2008), baixo consumo de energia, relacionado ao bombeamento do efluente, quando necessário (Perondi *et al.*, 2020).

Os WCs são baseados em sistemas naturais e possuem características construtivas que proporcionam a degradação da matéria orgânica, retenção e transformação de nutrientes. Além disso, promovem a redução do número de patógenos, requerem pouca manutenção e se integram ao ambiente (Teske; Wartchow, 2017). São construídos artificialmente em condições operacionais controladas para simular ciclos biogeoquímicos, semelhantes aos observados em ambientes naturais (Mancuso; Fioreze, 2018).

Esses sistemas podem ser utilizados para tratamento de esgotos brutos (Sistema Francês) ou para pós-tratamento de efluentes de um digestor anaeróbio (UASB, tanques sépticos). São classificados quanto ao sistema hidráulico em dois grupos: escoamento superficial (SF-WCs), que possui uma superfície de água exposta, semelhante a um pântano

natural e; escoamento subsuperficial (ESS-WCs), no qual a maioria do fluxo corre através do meio poroso abaixo da superfície (Fonder; Headley, 2013).

Os WCs de escoamento subsuperficial são compostos basicamente pela associação das plantas e de meio de suporte ou filtrante, o qual tem função de filtrar e servir de suporte para o desenvolvimento das plantas. Os meios suportes comumente utilizados em *wetlands* construídos incluem areia grossa, cascalho, pedregulho e brita (Silva, 2007).

As plantas utilizadas no processo são as macrófitas que auxiliam na remoção de contaminantes, absorvendo nutrientes, disponibilizando grande área superficial para aderência de poluentes e proporcionando redução na velocidade e adsorção de poluentes (Avelar; Matos; Matos, 2019).

A escolha da macrófita está relacionada à tolerância da planta quanto a ambientes saturados com água ou esgoto. A macrófita *Typha* spp. se destaca como a mais empregada, seguida por *Eleocharis* spp e *Zizaniopsis* spp. (Sezerino *et al.*, 2015). Outra planta comumente utilizada é o capim-vetiver, para ração animal, pois apresenta elevado crescimento em condições úmidas.

Raramente se utiliza solo como meio suporte de WCs e culturas produtoras de grãos de base alimentar humana e animal, como planta auxiliar no tratamento. Silva (2007) estudou WCs com essa configuração e obteve resultados satisfatórios.

Diante do exposto, este trabalho buscou aplicar a metodologia elaborada por Silva (2007), que avaliou o desempenho e os mecanismos de remoção de poluentes de sistemas *wetlands* construídos de fluxo vertical (WCFV) descendente com meio suporte de solo misturado com areia média, na proporção 1:1,5, plantados com a cultura do arroz (*Oryza sativa* L.) aplicando diferentes taxas hidráulicas de esgoto domésticos primário, provenientes de um decantador primário.

Uma das preocupações com o uso do solo como meio suporte de WCFV é a salinização e sodificação, que podem comprometer o desenvolvimento das plantas. De acordo com o *Global Map of Salt-Affected Soils*, da FAO (2021), cerca de 833 milhões de hectares de solos ao redor do mundo são afetados por salinidade e sodicidade, o que representa uma ameaça significativa à produção agrícola. A irrigação com águas residuais, muitas vezes com altos teores de sais, pode intensificar esses problemas ao longo do tempo (FAO, 2021), e, portanto, precisa ser melhor investigada.

Dessa forma, esse trabalho, aplicando a metodologia de Silva (2007), utilizou como meio suporte de WCFV o solo (Argissolo amarelo) misturado com areia média, com e sem uma camada de fibra de coco (*Cocos nucifera*) verde seca, plantados com as culturas do feijão (*phaseolus vulgaris*) e do sorgo (*sorghum*), de forma a realizar o tratamento de esgotos domésticos e, simultaneamente, a produção de grãos de base alimentar humana e animal. A camada de fibra de coco verde seca foi introduzida para verificar a possibilidade do uso como adsorvente de sais e de substâncias que conferem cor a água, mesmo com a fibra em condições naturais.

A escolha das culturas produtoras de grãos em substituição às macrófitas aquáticas e o uso da fibra de coco é justificada pela necessidade de alternativas sustentáveis no tratamento de esgoto, que não apenas tratem os efluentes, mas também gerem produtos de valor econômico, como os grãos. Além disso, visa dar um destino adequado à fibra de coco, um resíduo agrícola gerado em grande volume e que sobrecarrega os aterros sanitários. A utilização da fibra de coco como meio suporte em *wetlands* construídos é uma forma de aproveitar esse resíduo que pode potencializar a melhoria da eficiência do tratamento dos efluentes.

O estudo considerou a influência das culturas do feijão e do sorgo na clarificação dos efluentes, bem como a eficácia da fibra de coco verde seca como adsorvente na remoção de sais. Além disso, analisou os impactos da aplicação do esgoto tratado na salinização e sodificação do solo, verificando possíveis efeitos negativos de sais e sódio acumulados ao longo do processo.

2. OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho dos *wetlands* construídos de fluxo vertical (WCFV) no tratamento de esgoto doméstico proveniente de um reator UASB, utilizando meio suporte de solo e fibra de coco, plantado com as culturas do feijão e sorgo na clarificação dos esgotos e na remoção de sais.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a influência das culturas do feijão e do sorgo e da fibra do coco como parte do meio suporte na remoção de cor e turbidez dos efluentes do UASB;

- Verificar a aplicabilidade da fibra de coco (epicarpo e mesocarpo) verde seca lavada como adsorvente para remoção de sais;
- Verificar se os teores de sais acumulados no solo devido à aplicação do esgoto doméstico causam a salinização e a sodificação dos solos.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. *WETLANDS* CONSTRUÍDOS (WCs)

O termo *wetland* é empregado para designar áreas alagadas ou inundáveis. Estes ambientes nos quais se desenvolvem espécies vegetais adaptadas à saturação de água, apresentam-se com enorme diversidade biológica. Neles a água, os vegetais e o solo se integram favorecendo a reciclagem de nutrientes obtida através de processos químicos, físicos e biológicos (Lima, 2016). É possível encontrar na literatura diversas denominações para *wetlands* construído, tais como: zonas úmidas, sistemas alagados, leitos filtrantes, entre outros. Os *wetlands* construídos (WCs) são sistemas artificiais operados em condições controladas para simular ciclos biogeoquímicos, semelhantes aos ambientes naturais (Mancuso; Fioreze, 2018). Trata-se de módulos escavados no solo, ou construídos sob estes, com faces laterais e o fundo impermeabilizados, preenchidos com materiais filtrantes cujos índices físicos favorecem o escoamento (Sezerino; Silva, 2021).

Os WCs podem ser associados a outros tipos de tratamento voltados para de diversos tipos de águas residuárias, tais como: industriais, lixiviados de aterros, escoamento superficial urbano, drenagem ácida, e, até lodos de esgoto. No Brasil a maior aplicabilidade é para tratamento de esgotos domésticos, no entanto, novas unidades de *wetlands* construídos vem sendo empregados para tratamento do lodo de unidades decanto-digestoras tipo tanque séptico (Silva, 2020).

O princípio básico dos WCs é a formação de um biofilme ligado ao meio poroso e às raízes das plantas que promove a formação de microzonas aeróbias próximas às raízes envoltas por um ambiente anaeróbio predominando a ação de microrganismos que promoverão a degradação da matéria orgânica e a remoção de nitrogênio por meio de processos de nitrificação e desnitrificação (Silva, 2020).

Os WCs são sistemas de tratamento de esgoto versáteis que podem variar em função do tamanho, *design*, espécies plantadas e tipo de material que compõe o leito filtrante (Neves, 2022).

Utilizando como referência o sistema hidráulico, os WCs podem ser classificados em dois tipos escoamento superficial (WCs-ES) e escoamento subsuperficial (WCs-ESS). Nos WCs-ES, a água se move sobre a superfície exposta, similar a um pântano natural. No WCs-ESS, a água escoar em uma camada abaixo da superfície do leito filtrante e pode ter fluxo horizontal (FH), vertical (FV) ou híbrido (FH + FV), cada um com diferentes configurações, como fluxo ascendente ou descendente, e regimes de saturação permanentes ou intermitentes (Fonder; Headley, 2013).

Uma classificação mais detalhada dos *wetlands* construídos pode ser observada na **Figura 1**.

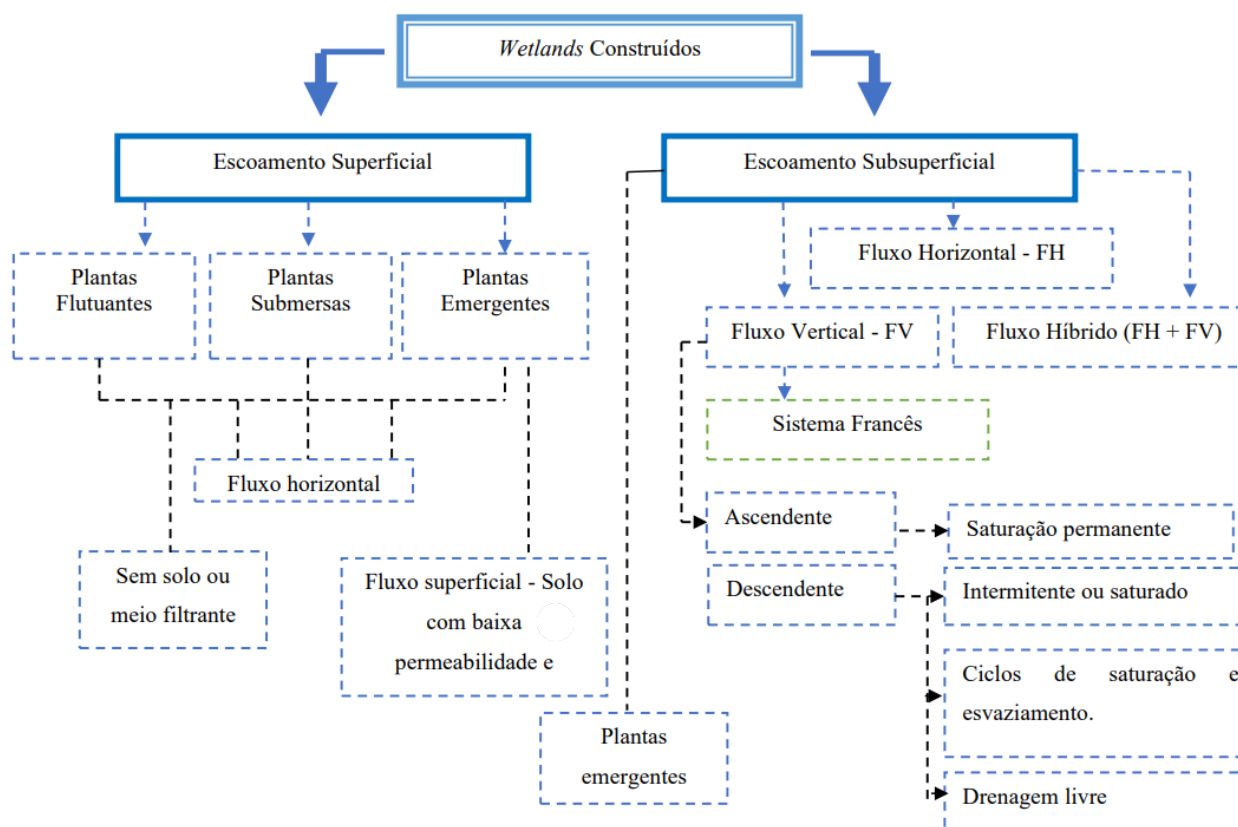


Figura 1. Classificação dos *wetlands* construídos segundo as macrófitas e tipo de fluxo.

Fonte: Lima (2024) adaptado Immich (2023).

Na **Tabela 1** é possível ver as principais diferenças entre os *wetlands* construídos de fluxo vertical (WCFV), os de fluxo horizontal (WCFH) e os de fluxo superficial (ES).

Tabela 1. Diferenças entre os *wetlands* de fluxo Subsuperficial horizontal (WCFH) e vertical (WCFV) e Escoamento superficial de fluxo horizontal (WCFH).

	O efluente é distribuído intermitentemente sobre a superfície de um leito filtrante, geralmente composto por camadas de substratos como areia e brita, onde são plantadas as macrófitas. A água percola verticalmente através do leito, sendo filtrada à medida que se move em direção à zona radicular das plantas. O fluxo vertical proporciona maior aeração do leito, favorecendo a oxidação de compostos orgânicos e amônia, o que aumenta a eficiência de remoção de nutrientes e outros poluentes (Figura 2b);
WCFV	Módulos escavados ou construídos no solo, com impermeabilização e preenchidos com materiais filtrantes de alta permeabilidade; Esgoto é distribuído uniformemente e percola de forma intermitente pelo leito, em meio não saturado, promovendo oxigenação e processos de nitrificação e desnitrificação; Tem como vantagens a redução de contato direto com patógenos e dificulta proliferação de mosquitos; condições aeróbias favorecem remoção de matéria orgânica e redução de DBO
	O efluente é introduzido em um leito filtrante composto por materiais como brita, areia e outros substratos. As plantas utilizadas são espécies típicas de zonas úmidas, que crescem no leito filtrante. O fluxo do efluente se dá horizontalmente através da zona radicular das plantas, movido por uma leve inclinação no fundo
WCFH	do leito. O contato da água com a zona radicular e o meio filtrante permite a remoção de contaminantes por processos como adsorção, filtração e degradação biológica (Figura 2a); São módulos escavados ou construídos no solo, com impermeabilização lateral e de fundo, preenchidos com materiais filtrantes que favorecem o escoamento;

Possui tubulação para distribuição do esgoto afluyente e coleta do tratado, com escoamento horizontal longitudinal facilitado por uma inclinação de fundo (1%) e plantados com macrófitas emergentes;

O efluente percorre do início (zona de entrada) ao fim (zona de saída) do leito filtrante, em meio saturado, passando por zonas aeróbias e anaeróbias;

Tem como benefícios o fato de minimizar o risco de exposição de patógenos, pois a água não é exposta durante o tratamento; não oferece habitat para mosquitos quando operado corretamente; e, o ambiente anaeróbio no perfil vertical favorece bactérias heterotróficas que removem matéria orgânica carbonácea, reduzindo DBO.

Esses sistemas se caracterizam pela presença de áreas abertas com água se assemelhando a pântanos naturais, sendo povoados por macrófitas emergentes, como taboas e juncos (Solo com plantas emergentes); flutuantes (sem solo), como aguapés; e submersas;

São áreas alagadas de superfície livre que possuem zonas de água aberta, sendo semelhantes a pântanos naturais. Dependendo das regulamentações locais e das condições do solo, podem ser usados aterros, diques e revestimentos para controlar o fluxo e a infiltração;

ESFH Os sistemas de flutuantes também operam com fluxo horizontal e essas plantas reduzem a luz solar e as trocas gasosas, diminuindo a proliferação de algas e criando condições quase anaeróbias. Suas raízes, no entanto, liberam oxigênio, beneficiando microrganismos nas zonas próximas a elas. Além disso, essas plantas promovem a decomposição da matéria orgânica não apenas pela liberação de oxigênio, mas também pela criação de micro-habitat que favorecem a atividade microbiológica;

Nos sistemas de plantas emergentes, as raízes que se estendem abaixo do meio filtrante/suporte contribuem para a remoção de poluentes por adsorção, filtração e sedimentação. O solo utilizado nesses sistemas deve apresentar baixa permeabilidade, permitindo que o esgoto esco horizontalmente através do solo. Essas raízes também oxigenam a zona radicular de forma mais eficiente, o que, junto com outros processos físico-químicos e biológicos e a interação com

diferentes comunidades microbianas, favorece a decomposição da matéria orgânica.

Fonte: Kadlec; Wallace (2008); Neves (2022); Sezerino et al. (2015); Sezerino; Silva (2021); von Sperling; Sezerino (2018); Zanella (2008); Lima (2016).

O perfil longitudinal do *wetland* construído com escoamento subsuperficial de fluxo horizontal e o de fluxo vertical pode ser observado na **Figura 2**.

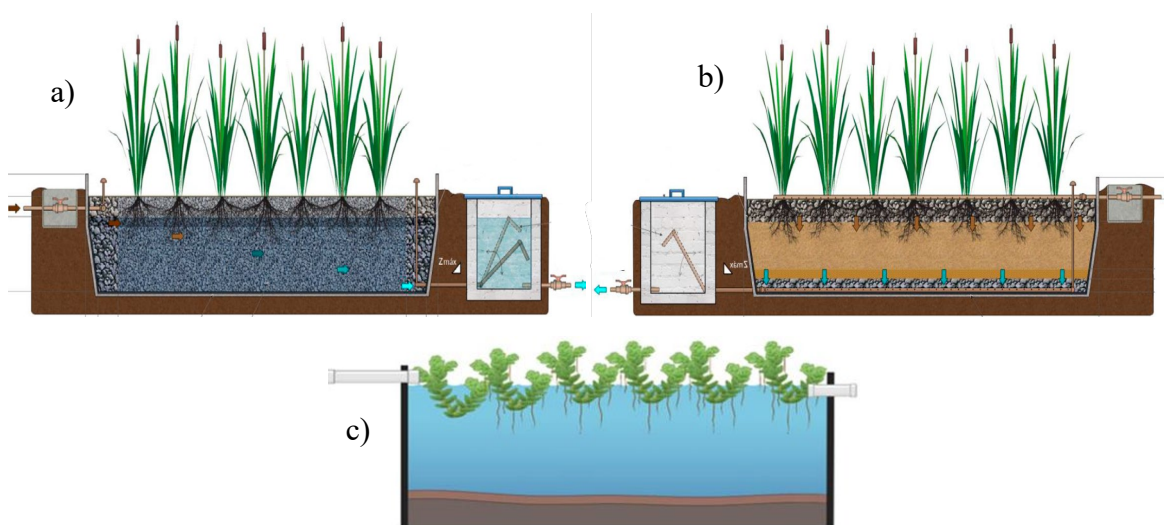


Figura 2. Esquema representativo do perfil longitudinal do *wetland* construído de Fluxo horizontal (a), de fluxo vertical (b) e de fluxo superficial (c).

Fonte: von Sperling; Sezerino (2018).

específicos, como compostos nitrogenados, ao promover zonas anaeróbicas no meio suporte. Esses sistemas permitem ajustes em vários parâmetros, incluindo o tipo de planta, o tamanho do sistema, o meio suporte e o fluxo (ascendente ou descendente, contínuo ou intermitente), possibilitando adequações conforme as exigências de tratamento necessárias (Mazucato *et al.*, 2020).

Nos WCs com plantas emergentes, as raízes das plantas ficam fixadas no leito filtrante, enquanto seus caules e folhas se estendem acima da superfície da água tratada. Esse tipo de sistema permite que as plantas estejam enraizadas diretamente no solo ou em um substrato específico (Lima, 2024; Machado *et al.*, 2017).

A escolha do material utilizado como meio suporte é de extrema importância. O meio filtrante deve ser composto por materiais inertes, de forma a não degradar, solubilizar e adicionar substâncias ao efluente tratado e, também, não deve ser tóxico aos microrganismos (Neves, 2022).

Os meios suportes utilizados podem variar de brita a solos com baixo teor de argila e devem apresentar alta permeabilidade, alta capacidade de troca catiônica e alta atividade microbiológica. Podem ser utilizados materiais de enchimento alternativos, como fibra de casca de coco e resíduos cerâmicos, que são amplamente disponíveis no Brasil devido às atividades econômicas locais, como a produção de cerâmica e o cultivo de coco. Além disso, a escória e outros resíduos industriais também têm sido empregados, destacando-se como opções sustentáveis para aplicação em *wetlands* construídos (Almeida; Oliveira; Kliemann, 2007; Santos; Lima; Michelan, 2023). Deve-se tomar cuidado no momento da escolha do meio suporte, pois, granulometrias menores propiciam melhor capacidade de filtração, mas conduzem a entupimentos (colmatação) mais rápidos, e, portanto, devem estar associadas a maiores alturas do meio suporte e a menores taxas de aplicação hidráulica (Von Sperling; Sezerino, 2018).

As plantas utilizadas no processo são macrófitas aquáticas, que possuem adaptações morfológicas e/ou fisiológicas que lhes permitem sobreviver em ambientes saturados. As macrófitas, ao proporcionar a oxigenação da zona da raiz, criam uma zona aeróbia junto ao sistema radicular. À medida que vai se afastando, forma-se uma zona facultativa, e quando todo o oxigênio é consumido, ela passa a ser anaeróbia. O tipo da espécie presente no sistema influencia no tamanho das zonas (Zanella, 2008).

A escolha das macrófitas para sistemas de tratamento está associada à sua capacidade de se desenvolver em ambientes saturados de água e/ou esgoto. Além disso, considera-se a presença natural dessas macrófitas nas áreas onde o sistema será implantado, garantindo que estejam adaptadas às condições climáticas locais (Sezerino *et al.*, 2015). Algumas das espécies utilizadas se encontram na **Tabela 2**.

Tabela 2. Espécies de macrófitas mais utilizadas em *wetlands* construídos.

Tipo de planta	Espécie	Nume popular
Emergentes	<i>Alternanthera ssp</i>	-

		<i>Brachiaria spp</i>	-
		<i>Canna generalis</i>	Biri
		<i>Canna L.</i>	Cana índica
		<i>Carex spp</i>	-
		<i>Chrysopogon zizanioides</i>	Capim vertiver
		<i>Colocasia esculenta</i>	-
		<i>Cynodon ssp</i>	Capim Tifton 85
		<i>Cyperus papyrus</i>	Papiro
		<i>Eleocharis spp</i>	-
		<i>Glyceria spp</i>	-
		<i>Heliconia spp</i>	-
		<i>Juncus spp</i>	Junco
		<i>Nelumbo spp.</i>	Lótus
		<i>Phalaris arundinacea</i>	-
		<i>Phragmites spp</i>	Caníço
		<i>Pennisetum purpureum</i>	Capim-elefante
		<i>Schoenoplectus</i>	-
		<i>Scirpus spp</i>	-
		<i>Typha spp</i>	Taboa
		<i>Zantedeschia aethiopica</i>	Copo de leite
		<i>Zizaniopsis bonariensis</i>	-
Flutuante livres		<i>Azolla spp</i>	-
		<i>Eichhornia crassipes</i>	Aguapé
		<i>Hydrocotyle umbellata</i>	-
		<i>Lagorsiphon major</i>	-
		<i>Lemna spp</i>	lentilha d'água
		<i>Pistia Stratiotis</i>	alface d'água
		<i>Salvinia molesta</i>	Salvinia
		<i>Spirodela polyrhiza</i>	erva de pato
		<i>Wolffia arrhiza</i>	-
Flutuantes enraizadas (fixas)		<i>Nymphaea spp</i>	ninfeia, lírio d'água
		<i>Nuphar spp</i>	-
Submersas		<i>Ceratophyllum demersum</i>	-
		<i>Egeria spp</i>	-
		<i>Elodea spp</i>	Elódea
		<i>Hydrilla spp</i>	-
		<i>Myriophyllum aquaticum</i>	-

	<i>Potamogeton spp</i>	-
--	------------------------	---

Fonte: Jesus (2016); von Sperling; Sezerino (2018); Zanella (2008).

A macrófitas possuem diversas funções físicas e ecológicas. As funções físicas incluem transpiração, resistência ao fluxo e captura de partículas, todas relacionadas ao tipo e densidade das plantas. A planta pode influenciar nos processos químicos do sistema, além de contribuir para a disponibilidade de oxigênio, essencial para o crescimento de microrganismos aeróbios. Ela também auxilia na degradação de substâncias orgânicas poluentes (Jesus, 2016; Kadlec; Wallace, 2008).

As principais vantagens e desvantagem da utilização dos *wetlands* construídos estão listadas na **Tabela 3**.

Tabela 3. Vantagens e desvantagens de *wetlands* construídos.

VANTAGENS	DESVANTAGENS
Alta eficiência na remoção de DBO, DQO, SST e coliformes	Necessidade de área para implantação maior que os sistemas convencionais
Simples implantação e manutenção	Possibilidade de colmatção do sistema
Sistema versátil, podendo ser adaptado para funcionar com os recursos disponíveis na região onde será implantado	Necessidade de manuseio da vegetação plantada
Não necessidade de acesso à rede coletora pública	Influência das condições climáticas
Pouco (caso necessite de bombas hidráulicas, associadas às estações elevatórias, por exemplo) ou nenhum gasto com energia	Pode atrair mosquitos
Custo de construção e operação relativamente baixo	
Boa remoção de nutrientes	

Fonte: Neves (2022); Silva (2007).

Não há um custo padrão para esse sistema, pois esse varia de acordo com diversos fatores, tais como: configuração, área a ser ocupada, região da implantação, macrófita utilizada e valor da energia local. Contudo, em comparação aos demais sistemas de tratamento de águas residuárias de semelhante eficiência, o *wetland* construído se destaca por seu reduzido custo de manutenção e operação (Kadlec; Wallace, 2008).

Tabela 4. Eficiências de remoção de poluentes encontradas por diferentes autores utilizando diferentes macrófitas aquáticas e meios suportes.

Tipo de Efluente	Tipo/espessura do meio suporte	Macrófita	Eficiências de remoção (%)	Referência
Viveiro de piscicultura	-	<i>Eichhornia crassipes</i>	Turbidez (95%); Nitrato (28%); Amônia (60%); Fósforo (70%).	Gomes <i>et al.</i> (2019)
		<i>Salvinia auriculata</i> ,	Turbidez (98%); Nitrato (28%); Amônia (60%); Fósforo (70%).	
		<i>Azolla filiculoides</i>	Turbidez (89%); Nitrato (32%); Amônia (95%); Fósforo (58%).	
Esgoto doméstico (filtro aerado)	-	<i>Eichhornia crassipes</i>	Fósforo (85%); Nitrogênio Total (91%)	Henrique <i>et al.</i> (2020)
Esgoto doméstico (Lagoas experimental de macrófita)	-	Lemnáceas	NTK (22,51%), nitrogênio amoniacoal (25,64%), DQO (41,40%)	Ribeiro (2016)
Águas residuárias da ETE de Botucatu/SP	-	Lemnáceas	Sólidos totais (92%), sólidos suspensos (59%), DBO (71%), DQO	Lima (2018)

			(74%), N (80%), P (86%)	
Esgoto Sanitário pré-tratado por fossa séptica e filtro anaeróbio	Pedregulho médio + fino + grosso + pedra de mão	<i>Zantedeschia aethiopica</i> ; <i>Typha spp.</i> ; <i>Juncus spp.</i> ; <i>Xanthosoma sp.</i> ; <i>Sagittaria montevidensis</i> ; <i>Canna indica</i> .	DQO = 75,3% / DBO ₅ = 71,56% / NTK = 72,6% / Amônia = 75,2% / Coliformes totais = 99,4% Turbidez = 97,6%	Teske; Wartchow (2017)
Águas cinzas (doméstico)	Brita nº 1 + areia grossa	<i>Cyperus alternifolius</i> ; <i>Typha sp.</i> ; <i>Cyperus papyrus</i>	Turbidez = 92% / Sólidos dissolvidos = 76% / DBO = 57% e DQO = 60% / Fósforo = 76% / Nitrogênio 52%	Zanella (2008)
Esgoto Sanitário - doméstico	Brita nº 2 + pedra de não	<i>Hedychium coronarium</i> ; <i>Typha domingensis</i>	DBO=83% / Sólidos totais= 85% / Nitrogênio 49,6% / Sólidos sedimentáveis = 99,9% / turbidez = 89,7%	Almeida; Oliveira; Kliemann (2007)
Esgoto doméstico – pré-tratado por reatores UASB	Brita nº 0 + areia grossa + brita nº 1	<i>Canna indica</i>	Amônia=96% / Nitrogênio=40% / Fósforo 82%	Mazucato et al. (2020)

Fonte: Elaboração própria (2024).

A **Tabela 4** resume as eficácias de remoção de poluentes em diferentes sistemas de tratamento de águas residuais utilizando macrófitas aquáticas e meios suportes variados. As informações nela contidas destacam como os *wetlands* construídos, especialmente com a presença de macrófitas como *Eichhornia crassipes*, *Azolla filiculoides*, *Typha spp.*, e *Lemnáceas*, podem ser eficientes na remoção de poluentes, como turbidez, nitrato, amônia,

fósforo e outros, com resultados de remoção que variam de 52% a 99,4%, dependendo do tipo de efluente e da combinação de planta e meio suporte.

É importante destacar que a remoção dos nutrientes do esgoto tratado nos *wetlands* construídos não deve ser atribuída exclusivamente à incorporação desses nutrientes nos tecidos vegetais das macrófitas. Como as concentrações de nutrientes nas águas residuárias são muito superiores às demandas de crescimento das plantas, a função mais eficaz das macrófitas é o suporte à microfauna e ao desenvolvimento de biofilmes (Zanella, 2008). Isso reflete nas diversas eficiências de remoção encontradas na Tabela 4, em que as macrófitas não estão apenas absorvendo nutrientes, mas contribuindo para a criação de um ambiente que favorece processos biológicos de purificação.

Além dos nutrientes, a tabela evidencia a eficiência dos *wetlands* construídos na remoção de outros parâmetros, como turbidez, sólidos totais e sólidos suspensos, com eficiência que chegam a 99,9%. A alta eficiência na remoção de turbidez, observada em sistemas com plantas como *Eichhornia crassipes* e *Typha spp.*, reflete a combinação de processos físicos, como sedimentação e filtração, e biológicos, como o desenvolvimento de biofilmes aderidos aos meios suportes e às raízes das macrófitas.

Práticas como a poda regular das macrófitas intensificam a absorção de nutrientes. No entanto, é crucial remover a vegetação cortada para evitar a liberação de nutrientes de volta ao leito filtrante. Em grandes instalações, essa biomassa pode ser reutilizada na compostagem, o que contribui para o ciclo sustentável de nutrientes (von Sperling; Sezerino, 2018).

Outro ponto relevante que pode ser observado na Tabela 4 é o uso das lemnáceas, como *Lemna* e *Azolla*, que não só promovem o tratamento do esgoto, mas também podem ser utilizadas como recurso alimentar na aquicultura. Mohedano (2004) observou que a substituição da farinha de peixe por farinha de lemnas em dietas para tilápias não resultou em alterações significativas no ganho de peso dos peixes, mas gerou uma redução de 35% nos custos de produção. Isso reforça a viabilidade do cultivo de organismos aquáticos com águas residuárias, contribuindo para a reciclagem dos nutrientes presentes nas águas tratadas. Essa abordagem oferece uma alternativa vantajosa não apenas pela redução dos custos de produção, mas também pela proteção dos recursos hídricos, conforme apontado por Torres (2000).

Esses resultados reforçam a eficácia dos sistemas de *wetlands* construídos no tratamento de águas residuais, ao mesmo tempo em que demonstram a relevância das macrófitas aquáticas como elementos multifuncionais, que não só removem poluentes, mas também contribuem para a reciclagem de nutrientes e a sustentabilidade de outros sistemas, como a aquicultura.

4.2. SALINIZAÇÃO E SODIFICAÇÃO DOS SOLOS

A salinização do solo é o processo de acúmulo de sais solúveis nos horizontes superiores do solo, resultando em impactos negativos para o desenvolvimento das plantas e a produtividade agrícola. Esse acúmulo pode ocorrer naturalmente, pela intemperização de minerais ou de forma antrópica, principalmente através de práticas inadequadas de irrigação (Pedrotti *et al.*, 2015).

O estudo da salinidade e sodicidade do solo é de grande importância, pois a presença de sais influencia significativamente as características do solo e da água, alterando os atributos físicos e químicos do solo, afetando o seu ambiente microbiológico e diretamente o rendimento das culturas agrícolas (Cordeiro, 1983; Pimentel, 2021).

Solos afetados por sais podem ser classificados como salinos, sódicos e salino-sódicos. Os solos salinos apresentam condutividade elétrica (CE) superior a 4 dS/m e alta concentração de sais solúveis, o que reduz a capacidade das plantas em absorverem água além de restringir o seu crescimento. Nos solos sódicos e salino-sódicos, a elevada presença de sódio trocável (PST) prejudica a estrutura do solo, comprometendo a porosidade, infiltração de água e aeração (Coelho, 2013; FAO, 2021). Além disso, a salinidade afeta negativamente a disponibilidade de nutrientes essenciais como cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}) e potássio (K^{+}), que se tornam menos acessíveis devido ao aumento de sódio (Na^{+}), provocando desequilíbrios nutricionais e agravando a deficiência de micronutrientes. Íons tóxicos como Na^{+} prejudicam o metabolismo das plantas, reduzindo a absorção de nutrientes e resultando em menor produtividade agrícola (Coelho, 2013; FAO, 2021; Figueiredo, 2013; Pimentel, 2021).

Segundo Cordeiro (1983) e FAO (2021) os efeitos de altos conteúdos de sais no solo são:

- Alterações no pH do solo, que podem torná-lo mais ácido ou alcalino, prejudicando a solubilidade e a disponibilidade de nutrientes para as plantas;
- Diminuição da produtividade agrícola e da qualidade do solo, levando à redução da biodiversidade e ao aumento da erosão do solo;
- Diminuição da capacidade de atuar como tampão e filtro contra contaminantes, resultando em uma estrutura do solo degradada;
- Redução das funções dos sistemas ecológicos, como os ciclos hidrológicos e de nutrientes.

A interação entre os sais, especialmente o sódio (Na^+), e as partículas de argila afeta diretamente a estrutura do solo quando em altas concentrações. No caso do sódio (Na^+), causa a desfloculação das partículas, o que diminui a aeração, a infiltração de água e a condutividade hidráulica, prejudicando ainda mais o crescimento vegetal (Holanda; Amorim, 1997 apud Figueiredo, 2013).

Quando o Na^+ , está presente em concentrações elevadas nas águas de irrigação, pode ser absorvido pelas argilas levando a uma série de problemas como a diminuição de sua permeabilidade e perdas de sua capacidade de fertilização. A sodificação do solo pode afetar a germinação e o desenvolvimento vegetativo das plantas, reduzindo sua produtividade ou até inviabilizando a produção (Luiz *et al.*, 2017).

Em solos sódicos, o excesso de sódio trocável causa a expansão das argilas quando úmidas e a contração quando secas, o que pode levar à fragmentação das partículas e à dispersão da argila. Esse processo deteriora a estrutura do solo, diminuindo sua permeabilidade e resultando em encharcamento superficial, que compromete a germinação das sementes e o crescimento das plantas devido à falta de aeração. A dispersão das partículas de argila é explicada pela interação eletroquímica entre os cátions e a argila, onde cátions bivalentes, como cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), são mais fortemente atraídos pela superfície das partículas do que os monovalentes, como sódio (Na^+), resultando em uma estrutura de solo mais estável (Dias; Blanco, 2010).

Teores excessivos de sais dissolvidos também reduzem a pressão osmótica do solo e aumentam a CE, diminuindo a disponibilidade de água para as plantas. Em solos salinos, a CE superior a 2 dS/m já é prejudicial para plantas mais sensíveis (Coelho, 2013).

A recuperação de solos salinos e sódicos é essencial para mitigar os impactos desse acúmulo de sais e sódio trocável, desta forma, segundo Silveira (2015), são indispensáveis:

- o controle da condutividade elétrica via lixiviação;
- o uso de corretivos químicos como gesso;
- a implementação de drenagem adequada;
- o monitoramento contínuo da salinidade;
- a adequação da qualidade da água de irrigação.

Estudos sobre a aplicação de efluentes tratados na irrigação mostram que, embora eles possam fornecer nutrientes valiosos, é necessário um manejo cuidadoso para evitar a salinização e sodificação do solo. Barbosa *et al.* (2018) destacaram o risco de salinização e sodificação em decorrência do uso de águas residuais, observando aumento da CE e da porcentagem de sódio trocável (PST). Por outro lado, Cavalcante e Cavalcante (2018) observaram que, apesar dos riscos, efluentes tratados podem substituir parcialmente a irrigação e a adubação, desde que sua qualidade atenda aos padrões recomendados. De forma semelhante, Barroso e Wolff (2011), reforçaram a importância de um manejo adequado no uso de esgoto tratado para garantir a sustentabilidade agrícola a longo prazo.

Estudos adicionais, como Garayo Junior *et al.* (2017), Melo *et al.* (2023), Santana *et al.* (2003) e Santos (2015), também investigaram os impactos da irrigação com água salina em solos cultivados, enfatizando as consequências para a produtividade e estrutura do solo. Santana *et al.* (2003) avaliaram o uso de água salina no cultivo de feijão (*Phaseolus vulgaris*), observando aumento da salinidade e sodicidade do solo, o que prejudicou o desenvolvimento e rendimento da cultura. Santos (2015) examinou o efeito da irrigação com água de alta salinidade proveniente da Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) de Jaboticabal, SP, em áreas com *Brachiaria*. Os resultados indicaram que a aplicação contínua dessa água aumentou as concentrações de sais e sódio no solo, comprometendo suas propriedades físicas, como estrutura e capacidade de infiltração, e ressaltando a necessidade de manejo adequado para evitar a degradação dos solos agrícolas.

Por outro lado, Barbosa *et al.* (2018), avaliaram o risco de salinização e sodificação de solo fertirrigado com águas residuais ao longo de quatro anos. Os resultados indicaram que, apesar do aumento nas concentrações de sódio (Na^+), condutividade elétrica (CE) e razão de adsorção de sódio (RAS), o risco de salinização e sodificação do solo foi considerado baixo.

Em um estudo com água residuária tratada (ARDT) para irrigação de Moringa oleífera, Melo *et al.* (2023) observaram aumento dos teores de Na^+ e da CE do solo, o que

levou à dispersão de coloides do solo, diminuindo a permeabilidade e a capacidade de infiltração de água, além de elevar a acidez do solo e a disponibilidade de alumínio, que pode ser tóxico para as raízes das plantas. O estudo enfatiza a importância do monitoramento da qualidade da água de irrigação para minimizar os impactos na produtividade a longo prazo.

Assis Júnior *et al.* (2007) conduziram experimentos usando uma solução salina com cloreto de sódio (NaCl) com diferentes salinidades, para irrigação de *Vigna unguiculata* (feijão-de-corda), com condutividade elétrica (CE) de 0,8 e 5,0 dS/m sem fração de lixiviação; e de 5,0 dS/m com frações de lixiviação de 0,14 e 0,28, a fim de observar os efeitos da salinidade da água no acúmulo de sais no solo e na produtividade da planta. Os resultados indicaram que a irrigação com água salina elevou significativamente a CE e o teor de Na⁺ no solo, o que promoveu um aumento da salinidade e da sodicidade nas camadas mais superficiais do solo, especialmente entre 0,3 e 0,6 m de profundidade. Embora o feijão tenha mostrado certa tolerância inicial à salinidade, o aumento progressivo da concentração de sais causou estresse na planta, afetando negativamente seu crescimento e produtividade. Esses achados reforçam a importância de um manejo cuidadoso da qualidade da água, visando prevenir danos à saúde do solo e à viabilidade das culturas agrícolas.

4.3. COLMATAÇÃO DO SOLO

A colmatação é o entupimento dos poros de um meio filtrante, resultando na redução dos espaços vazios por onde a água residuária escoar, e conseqüentemente a permeabilidade do substrato, o que pode comprometer a eficiência na remoção de poluentes. Isso porque o solo colmatado tem a sua condutividade hidráulica reduzida à medida que há uma porosidade do meio filtrante (Freitas, 2003; Pucher; Langergraber, 2019). A colmatação pode causar escoamento superficial em *wetlands* construídos de fluxo horizontal e empoçamento em unidades de fluxo vertical. Esse fenômeno ocorre devido ao acúmulo de sólidos, sejam eles orgânicos ou inorgânicos, provenientes tanto do afluente quanto do próprio funcionamento do leito, resultando na perda de eficiência do meio suporte/filtrante (Correia, 2016; Seraphim, 1999; Vasconcellos, 2020).

A colmatação, se refere ao entupimento dos poros do solo, e exerce um impacto significativo na condutividade hidráulica, ou seja, na capacidade do solo de permitir a passagem de água. Esse fenômeno resulta do acúmulo de partículas finas e de matéria orgânica nos poros, levando à diminuição da porosidade e, conseqüentemente, à redução da

movimentação da água através do solo. Estudos indicam que a colmatção pode reduzir a condutividade hidráulica em até 54% em solos com areia fina e 41% em solos com areia grossa. Além disso, a presença de biofilmes nos poros pode intensificar ainda mais essa redução (Matos, 2015; Soares; Pizzolatti, 2020).

A condutividade hidráulica (K_s) em sistemas alagados construídos (SAC) para tratamento de esgoto doméstico pode ser afetada por fatores como acúmulo de sólidos, degradação das raízes das plantas e obstrução da porosidade ao longo do tempo. Inicialmente alta, a K_s tende a diminuir, especialmente no primeiro terço do leito, devido à acumulação de resíduos e aumento da perda de carga, o que pode levar ao escoamento superficial indesejado e comprometer a eficiência do sistema. O controle da K_s é essencial para manter a eficiência do tratamento, sendo recomendável utilizar valores conservadores ao dimensionar o sistema. Além disso, fatores como condições meteorológicas e a evapotranspiração também influenciam o comportamento hidráulico e a eficiência do tratamento (Brasil; Matos, 2008).

A colmatção pode ser física ou biológica e ocorre sequencialmente ou simultaneamente nas diferentes profundidades do solo (Silva, 2007). A causa física mais comum da colmatção é devido a ação de um gradiente hidráulico sob o solo que provoca o fluxo unidirecional, além do acúmulo de sólidos nos poros do meio de enchimento dos leitos e cargas excessivas de matéria orgânica e de sólidos suspensos (Correia, 2016; Freitas, 2003). Matos *et al.* (2018) discute que, além desses fatores, a interação entre as características do substrato e as condições operacionais também pode afetar a intensidade da colmatção, destacando a importância da escolha do substrato adequado para reduzir o risco de entupimento dos poros.

A colmatção química ocorre devido a reações entre elementos dissolvidos no fluido percolante, formando precipitados que reduzem o espaço disponível para a passagem do fluido. A alta concentração de Na^+ também é uma questão química, pois a dissolução de sais de sódio, como o cloreto de sódio, ou a troca iônica que leva à adsorção desse cátion nas partículas do solo, podem contribuir para o entupimento do meio poroso. Além disso, carbonatos e sulfatos presentes no efluente podem gerar cristais de sais, agravando o processo de colmatção (Freitas, 2003).

Correia (2016) avaliou a colmatção em *wetlands* construídos de fluxo sub-superficial horizontal, e destacou que isso é um problema operacional grave que pode

aumentar o risco de disseminação de doenças e que também pode diminuir a eficiência de tratamento. Ele também destacou que a intervenção em um leito colmatado acontece quando surgem sintomas visíveis tais como o escoamento superficial e o empoçamento.

As principais medidas para prevenir a colmatção incluem um tratamento prévio eficiente, a concepção de um sistema de distribuição adequado, a escolha apropriada do meio de enchimento, substrato, suporte ou filtrante, e o cumprimento rigoroso das ações de monitorização e manutenção. As medidas convencionais de remediação incluem a limpeza e/ou melhoria de tubulações e canais de distribuição, lavagem ou substituição do meio suporte, oxidação da matéria orgânica acumulada com peróxido de hidrogênio, e recirculação do efluente para reduzir a carga orgânica. Como alternativa à limpeza, a introdução de minhocas pode ser eficaz, pois elas se alimentam dos sólidos acumulados e ajudam a arejar e drenar o meio de enchimento (Correia, 2016). Para Favretto *et al.* (2018) a recirculação do efluente e a remoção periódica de biomassa, contribui para a mitigação dos efeitos da colmatção e melhora a longevidade do sistema. O autor reforçou que a monitorização constante é essencial para detectar a colmatção precocemente e permitir intervenções eficazes, evitando a perda de eficiência do tratamento de águas residuárias.

Matos *et al.* (2015) observou que a escolha do substrato é crucial para a prevenção da colmatção. Ele afirma que materiais com maior porosidade e resistência à degradação biológica tendem a reduzir o entupimento dos poros, prolongando a vida útil do sistema. Esses materiais permitem uma percolação mais eficaz e minimizam o risco de colmatção causado por resíduos orgânicos.

Xu *et al.* (2022) observou o acúmulo de sólidos totais, especialmente de partículas finas e materiais orgânicos, como um fator crítico na colmatção de *wetlands* construídos. Apesar da colmatção, os autores relataram que ela teve pouco impacto na remoção da demanda química de oxigênio (DQO), mas influenciou a remoção de fósforo em função da menor eficiência do substrato. Eles enfatizam a importância de uma distribuição adequada dos tamanhos das partículas no substrato, especialmente aumentando o tamanho na camada intermediária, para mitigar a colmatção e melhorar a eficiência do sistema.

Pucher e Langergraber (2019) em uma revisão ampla de literatura, identificaram como principais fatores para a colmatção: a composição do substrato, a quantidade de sólidos suspensos nos efluentes e a produção de biomassa microbiana. Os autores destacam

que a colmatação pode prejudicar a remoção de nutrientes, reforçando a importância de estratégias de manejo adequadas, como a seleção de substratos apropriados.

Favretto *et al.* (2018) investigaram o impacto da colmatação nos sistemas de *wetlands* construídos de fluxo vertical e concluíram que a escolha de substratos com alta capacidade de drenagem e porosidade, bem como a adequação das condições operacionais, são fundamentais para minimizar os efeitos negativos da colmatação. O estudo revelou que a colmatação, ao reduzir a infiltração e a oxigenação do meio, compromete a eficiência geral do sistema na remoção de nutrientes.

4.4. FERTILIDADE DOS SOLOS

A fertilidade do solo se refere à sua capacidade de suportar o crescimento saudável das plantas, visto que fornece os nutrientes essenciais necessários e mantém as condições químicas, físicas e biológicas adequadas do solo. Esses nutrientes incluem nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, cálcio e magnésio (macronutrientes), e boro, cloro, cobre, ferro, manganês, molibdênio e zinco (micronutrientes) (FAO, 2024).

O solo é a camada de material biologicamente ativa onde as plantas crescem. Ele é formado por transformações complexas que incluem intemperismo de rochas e minerais, a ciclagem de nutrientes e a produção e decomposição de biomassa. Manter o solo em boas condições é essencial para garantir a capacidade produtiva dos sistemas agrícolas. A qualidade do solo também é crucial para preservar outros serviços ambientais importantes, como o fluxo e a qualidade da água, a biodiversidade e o equilíbrio dos gases atmosféricos (Lopes; Guilherme, 2007).

As plantas são organismos autotróficos, que vivem entre dois ambientes inteiramente inorgânicos, retirando CO₂ da atmosfera e água e nutrientes minerais do solo. A absorção dos nutrientes da solução do solo dependerá das características químicas e físicas deste, tendo grande influência a disponibilidade de íons e pH, principalmente na faixa de 5,5 a 6,5 (Barros, 2020).

A presença de nutrientes é um dos aspectos fundamentais que garantem a boa qualidade dos solos e o seu bom uso e manejo. A fertilidade do solo pode advir de causas naturais ou ser criada pela adição de nutrientes aos solos durante o cultivo. As fontes de nutrientes incluem fertilizantes químicos e minerais, esterco animal, compostos orgânicos e nutrientes reciclados. Essas práticas ajudam a manter e melhorar a fertilidade do solo,

essencial para a agricultura sustentável e para a saúde do solo a longo prazo (FAO, 2024; Lopes; Guilherme, 2007).

A fertilidade do solo é fundamental para a produtividade agrícola e, consequentemente, para a segurança alimentar global. A manutenção ou o aumento da fertilidade do solo pode ser alcançada através de diversas práticas de manejo. Para otimizar a fertilidade e a saúde do solo, os agricultores devem adotar estratégias que maximizem os retornos econômicos, minimizem tanto a depleção e perdas de nutriente como os impactos ambientais negativos. Essas práticas incluem a gestão eficiente dos nutrientes do solo, garantindo que as necessidades das culturas sejam atendidas enquanto se preserva a qualidade do solo e se promove a sustentabilidade a longo prazo (FAO, 2024).

Além de fornecer nutrientes essenciais, a fertilidade do solo depende de atributos físicos, químicos e biológicos adequados. Em regiões semiáridas, o processo de salinização, com alta concentração de sais e Na^+ trocável, prejudica a fertilidade, dificultando a absorção de nutrientes pelas plantas e comprometendo a produtividade agrícola. Práticas de manejo, como o uso de corretivos, ajudam a reduzir esses impactos, mas equilibrar a composição iônica e recuperar completamente solos salinizados continuam sendo desafios importantes para a agricultura sustentável nessas áreas (Santos *et al.*, 2016).

O investimento em técnicas para a melhoria da qualidade dos solos no Brasil aumenta a produção. O manejo da fertilidade do solo por meio do uso eficiente de corretivos e fertilizantes é responsável, dentre diversos fatores, por cerca de 50% dos aumentos de produção e produtividade das culturas (Lopes; Guilherme, 2007).

A fertilidade do solo está intimamente relacionada à capacidade de fornecer nutrientes essenciais para as plantas, o que pode ser severamente comprometido pela presença excessiva de sais, especialmente em solos salinos e sódicos. A alta concentração de sais solúveis eleva a condutividade elétrica e altera a composição iônica da solução do solo, com destaque para os ânions como cloretos, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos e boratos. Além disso, condições sódicas, associadas a elevados valores de pH ($> 8,5$), resultam em toxicidade de íons específicos e deficiências nutricionais. Compreender a dinâmica desses íons e a reação do solo é essencial para evitar desequilíbrios e otimizar a fertilidade. Solos salinos e salino-sódicos exigem práticas específicas de manejo, como o uso de corretivos, para melhorar a estrutura do solo, reduzir a sodicidade e recuperar a fertilidade. Esses

cuidados são fundamentais para otimizar a produtividade agrícola e garantir a sustentabilidade do solo (Santos *et al.*, 2016).

4.5. O FEIJÃO

O feijão é uma das culturas mais importantes no Brasil, tanto pelo seu valor nutricional quanto pelo seu apelo alimentar, mercadológico e agrônômico. Ele contém quantidades significativas de proteínas, carboidratos e aminoácidos fundamentais na dieta alimentar. Por sua relevância na agricultura nacional, o feijão desempenha um papel fundamental no planejamento do calendário agrícola. Seu ciclo fenológico é considerado adequado, permitindo o plantio em uma janela menor sem comprometer a produção de outros grãos no mesmo ano-safra (Conab, 2024; Costa; De Carvalho; Lopes, 2022).

Com uma produção de 2.842.395 toneladas em 2022, o Brasil ocupa a segunda posição dos dez maiores produtores de feijão do mundo, correspondendo a 10,03% da produção mundial (28.346.199 ton), ficando atrás apenas da Índia (**Tabela 5**). Em 2023, a Bahia ocupou a quarta posição nacional na produção de feijão com 238.820 toneladas, ficando atrás de Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso (**Tabela 6**).

Tabela 5. *Ranking* dos dez países maiores produtores de feijão do mundo no ano de 2022.

Posição	País	Produção (t/ano)
1	Índia	6.610.000
2	Brasil	2.842.395
3	Mianmar	2.663.278
4	República Unida da Tanzânia	1.347.585
5	Uganda	1.304.563
6	China	1.283.994
7	Estados Unidos da América	1.172.400
8	México	1.002.448
9	Argentina	679.744
10	Etiópia	619.096
	MUNDO	28.346.199

Fonte: Adaptado FAO (2022).

Tabela 6. *Ranking* dos dez estados maiores produtores de feijão no Brasil no ano de 2023.

Posição	Estado	Produção (t/ano)
1	Minas Gerais	578.800
2	Goiás	357.150
3	Mato Grosso	295.167
4	Bahia	238.820
5	São Paulo	234.294
6	Paraná	201.081
7	Santa Catarina	115.595
8	Rio Grande do Sul	68.703
9	Ceará	68.683
10	Pernambuco	50.024
TOTAL		
BRASIL		2.951.728

Fonte: Adaptado IBGE (2023).

De acordo com sua classificação taxonômica, o feijão carioca é pertencente à família Fabaceae, gênero *Phaseolus* e espécie *Phaseolus vulgaris* L. As folhas do feijão apresentam duas formas distintas. É composta por folhas simples, que são as primeiras a se desenvolverem a partir do embrião, são as únicas folhas simples na planta e caem antes do fim do ciclo; e as folhas compostas (trifoliadas), que possuem três folíolos, onde o folíolo central é simétrico enquanto os dois laterais são assimétricos. O sistema radicular tem em média 30 cm e 80% está situado nos primeiros 20 cm do perfil do solo (Santos, 2021).



Figura 3. Raízes de uma planta de feijão em detalhes.

Fonte: Gonçalves; Lynch (2014)

O sistema radicular do feijão carioca é reconhecido por sua adaptabilidade a diferentes condições de solo, incluindo solos ácidos e de baixa fertilidade. Práticas como a calagem promovem o crescimento radicular, melhorando a absorção de nutrientes essenciais, como cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}). Em solos com elevada acidez, observa-se uma redução no diâmetro das raízes e um aumento no comprimento, o que permite uma exploração mais eficiente do perfil do solo (Silva *et al.*, 2004).

Estruturalmente, o sistema radicular do feijoeiro segue o padrão das dicotiledôneas **Figura 3**, caracterizando-se por uma raiz principal pivotante que origina ramificações laterais. Essas raízes secundárias emergem do periciclo, permitindo uma maior exploração do solo e sendo essenciais para a absorção de água e nutrientes. Além disso, formam-se raízes basais a partir do hipocótilo, que também geram ramificações. A raiz principal pode ainda produzir raízes adventícias, localizadas no hipocótilo, acima das raízes basais. Anatomicamente, as raízes basais têm origem no periciclo, entre a base do hipocótilo e a porção superior da raiz principal, e não são consideradas adventícias em termos anatômicos ou genéticos. Essa diferenciação estrutural reflete a complexidade do sistema radicular do feijão, que combina diversos tipos de raízes para otimizar a absorção de recursos (Gonçalves; Lynch, 2014).

O feijão (*Phaseolus vulgaris*) realiza o metabolismo fotossintético do tipo C3, caracterizado pela fixação de dióxido de carbono (CO_2). Esse tipo de metabolismo é típico de plantas que se desenvolvem em condições de temperatura moderada e com disponibilidade adequada de água. O feijão apresenta muita eficiência na fotossíntese, especialmente em ambientes onde a intensidade luminosa e a umidade do solo são otimizadas, permitindo um crescimento saudável e produtivo. Contudo, o metabolismo C3 pode ser menos eficiente em condições de estresse hídrico ou altas temperaturas, quando a taxa de fotorrespiração aumenta, levando à perda de eficiência na captura de carbono (Pimentel *et al.*, 2011).

O feijão tem ciclo curto (60 a 120 dias) e sua produção no Brasil ocorre em três épocas distintas, no entanto, o principal período de plantio é na entressafra da soja, o que favorece uma oferta sazonal do grão que vem sendo intensificada pelo melhoramento de novas cultivares de ciclo precoce e super precoce (Santos, 2022).

O Brasil possui três épocas distintas de plantio de feijão, a primeira safra semeando entre agosto e dezembro, a segunda entre janeiro e abril e a terceira semeado de maio a julho, favorecendo assim uma oferta constante do produto ao longo do ano (Conab, 2024).

Não há muitos registros de trabalhos sobre o uso de feijão em *wetlands* construídos na literatura. Silva, Ramos e Bernardes (2021) avaliaram o desempenho de *wetlands* construídos de fluxo vertical com meio suporte de solo misturado com areia na remoção de coliformes termotolerantes, utilizando as culturas de arroz, feijão e milho, com a prática de rotação de culturas. Eles concluíram que a rotação de culturas contribuiu para a remoção eficiente dos coliformes termotolerantes, com o feijão apresentando bons resultados nesse contexto. Araújo *et al.* (2024) observaram que a fertirrigação com esgoto sanitário pode promover um desempenho positivo no desenvolvimento do feijão. Os resultados mostraram que a irrigação com esgoto sanitário promoveu melhorias nas características das plantas como altura, número de folhas e massa seca.

Um estudo realizado por Susilawati e Lakitan (2019) investigou a tolerância do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) a diferentes profundidades de lençol freático em *wetlands* riparianos em Sumatra do Sul, Indonésia. O feijão mostrou ser sensível a altos níveis de água no solo. O estudo concluiu que o feijão pode tolerar um lençol freático até 15cm abaixo da superfície do solo sem impacto significativo no crescimento, mas quando a profundidade era de 10 cm, o crescimento e a produção foram negativamente afetados. A viabilidade do cultivo de feijão em *wetlands* riparianos depende de manter o lençol freático a pelo menos 15 cm de profundidade, especialmente durante a transição entre as estações chuvosa e seca.

Como o feijão não é cultivado em ambiente alagado, o seu uso em *wetlands* construídos não é comum, o arroz, por sua adaptabilidade a ambientes alagados, tem sido amplamente empregado em sistemas *wetlands* construídos. Diversos estudos, como os de Matamoros *et al.* (2020) e Kantawanichkul; Duangjaisak (2011), evidenciam a eficácia do arroz em *wetlands* construídos, destacando não apenas sua capacidade de remoção de poluentes, mas também sua boa produtividade, graças à adaptação a solos saturados.

Silva, Ramos e Bernardes (2021) investigaram o uso do feijão e do arroz em *wetlands* construídos, para o tratamento de águas residuais domésticas. Seus resultados sugerem que o feijão também pode ser uma opção promissora, o que abre possibilidades para novas pesquisas nesse campo.

4.6. O SORGO

O sorgo é uma planta de origem africana. No Brasil é amplamente utilizada para alimentação animal, apresentando boa adaptação a regiões semiáridas, visto ser uma cultura que se desenvolve bem em regiões de clima quente, muito utilizada em sucessão de culturas (cultivo de uma espécie após a colheita de outra em uma mesma área, no mesmo ano agrícola) na segunda safra (Souza Filho, 2017). O sorgo é uma planta de ciclo fotossintético C4 que requer temperaturas superiores a 21° C para um bom desenvolvimento e crescimento. Tolerância mais o *déficit* de água e o excesso de umidade no solo do que a maioria dos outros cereais e pode ser cultivada numa ampla faixa de condições de solo (Magalhães; Durães; Rodrigues, 2008).

Plantas C4 são adaptadas a *habitats* ensolarados, utilizando altos níveis de luz mais eficientemente que plantas C3. A denominação C3 e C4 refere-se ao número de átomos de carbono presentes no primeiro produto da fixação de CO₂. Enquanto as plantas C3 saturam com cerca de 25% da luz solar em climas temperados, as plantas C4 como milho, cana-de-açúcar e sorgo, mantêm alta fotossíntese sob luz plena em regiões tropicais. Elas superam a limitação de CO₂ que afeta plantas C3, aumentando a taxa de crescimento em altas temperaturas e luminosidades (Kluge; Tezotto-Uliana; Silva, 2015).

Segundo Lanza *et al.* (2016) o sorgo é uma planta de dias curtos e com altas taxas e um ciclo de desenvolvimento que varia entre 90 e 120 dias, dependendo das condições climáticas e da cultivar. Esse ciclo pode ser dividido em três fases: a primeira inclui germinação, aparecimento da plântula e estabelecimento do sistema radicular; a segunda, entre 30 e 59 dias após a emergência, abrange a diferenciação do meristema apical em floral até a antese (quando a flor está totalmente desenvolvida); e a terceira, a partir de 61 dias após a emergência, vai da floração até a maturação fisiológica e senescência das folhas, sendo crucial para o enchimento dos grãos.

O sorgo apresenta características xerófilas e mecanismos eficientes de tolerância a seca. Por pertencer ao grupo de plantas C4, o sorgo suporta elevados níveis de radiação solar. Assim, o aumento da intensidade luminosa implica em maior produtividade, sempre que as demais condições sejam favoráveis (Landau; Sans, 2010).

A temperatura, o *déficit* de água e as deficiências pelos nutrientes, afetam as taxas de expansão das folhas, altura da planta e duração da área foliar. A insuficiência de água é uma das causas mais comuns de redução de área foliar e está relacionada com a expansão das

células. Um dos motivos de atraso de desenvolvimento nos estágios dois e três é a temperatura noturna do ar mais baixa. O florescimento do sorgo, que abrange polinização, fertilização, desenvolvimento e maturação do grão, é influenciado principalmente pelo fotoperíodo e pela temperatura (Magalhães; Durães; Rodrigues, 2008).

O sorgo é uma cultura tolerante a diversas condições de solo, se desenvolvendo satisfatoriamente em solos que variam de argilosos a ligeiramente arenosos, tendo como preferência solos bem-preparados, com acidez corrigida, ricos em matéria orgânica, pH entre 5,5 e 6,5, topografia plana e sem excesso de umidade (Lanza *et al.*, 2016).

O crescimento das raízes do sorgo está relacionando com a temperatura e é limitado pela falta de umidade do solo. Em seu sistema radicular, encontram-se raízes primárias e secundárias. A profundidade do sistema radicular chega a até 1,5 m de profundidade e em extensão lateral pode alcançar 2 metros. A altura pode variar de 40 cm a 4 metros, dependendo do tipo de sorgo (Magalhães; Durães; Rodrigues, 2008), que pode ser granífero, sacarino, forrageiro, vassoura e biomassa.

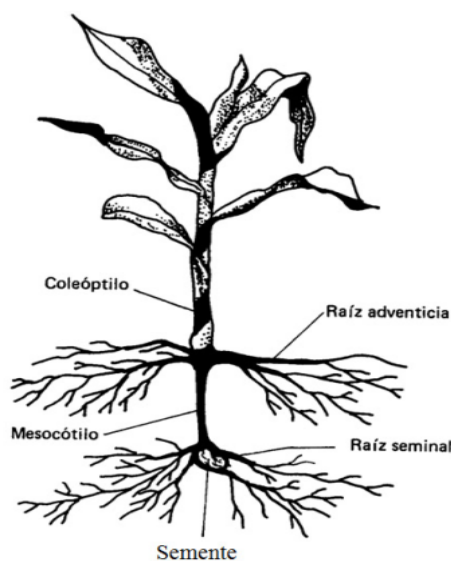


Figura 4. Planta de sorgo com suas raízes.

Fonte: Vitar (2023)

As principais características de cada tipo de sorgo podem ser observadas no **Tabela 7**.

Tabela 7. Principais características de cada tipo de sorgo.

Tipo de sorgo	Características
Granífero	Adaptado à colheita mecânica, é usado principalmente na alimentação animal.
Sacarino	Possui alto teor de açúcar e é usado na produção de etanol e biocombustível.
Forrageiro	Utilizado para pastejo, complemento alimentar, fenação e cobertura morta.
Vassoura	Usado na fabricação de vassouras.
Biomassa	Destinado à produção de energia, com poder calorífico similar ao da cana e do eucalipto.

Fonte: Embrapa (2015); Souza *et al* (2005); Magalhães; Durães; Rodrigues (2003).

Em 2022, o Brasil foi o oitavo maior produtor de sorgo do mundo, com uma produção anual de 2.923.318 toneladas, representando 5,08% da produção mundial de 57.581.942,77 toneladas (**Tabela 8**). A Nigéria liderou a produção mundial com 6.806.370 toneladas, e ainda à frente do Brasil, estão países como Sudão, EUA, México, Etiópia, Índia e China. A Argentina e a Austrália completaram o *ranking* dos dez maiores produtores.

Tabela 8. *Ranking* dos dez países maiores produtores de sorgo do mundo no ano de 2022.

Posição	País	Produção (t/ano)
1	Nigéria	6.806.370
2	Sudão	5.248.000
3	EUA	4.769.960
4	México	4.754.169
5	Etiópia	4.200.000
6	Índia	4.150.570
7	China	3.180.000
8	Brasil	2.923.318
9	Argentina	2.883.301
10	Austrália	2.648.069
MUNDO		57.581.943

Fonte: Adaptado FAO (2022).

Em 2023, a Bahia ocupou a oitava colocação na produção de sorgo entre os estados brasileiros, com uma produção anual de 113.520 toneladas (**Tabela 9**). Goiás foi o maior produtor nacional, com 1.397.800 toneladas, seguido por Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Tocantins, Mato Grosso, e Piauí. O Pará e o Distrito Federal completaram o ranking dos dez maiores produtores de sorgo no Brasil, totalizando uma produção nacional de 4.307.118 toneladas.

Tabela 9. *Ranking* dos dez estados maiores produtores de sorgo no Brasil no ano de 2023.

Posição	Estado	Produção (t/ano)
1	Goiás	1.397.800
2	Minas Gerais	1.354.143
3	Mato grosso do Sul	466.462
4	São Paulo	358.829
5	Tocantins	206.500
6	Mato grosso	151.992
7	Piauí	116.983
8	Bahia	113.520
9	Para	65.765
10	Distrito Federal	46.800
TOTAL		
BRASIL		4.307.118

Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

4.7. O COCO

O coco é proveniente da palmeira coqueiro (*Cocos nucifera*) e seu cultivo se dá em mais de 90 países que destinam o fruto, principalmente, para a produção de copra e óleo, que são os principais derivados do coco comercializados no mercado internacional. Em 2018, o Brasil ocupava a quinta posição em produção de coco tendo 1,7% da área cultivada e 3,8% da produção mundial. Diferente dos maiores produtores mundiais, os cultivos brasileiros se destinam à produção de coco seco *in natura*, coco ralado, leite de coco, óleo de coco e água de coco (Brainer, 2018). Em 2022, o Brasil ocupava a quarta posição do *ranking* de

produtores de coco no mundo (**Tabela 10**), com produção de 2.744.418 ton/ano, o que corresponde a, aproximadamente, 4,40% da produção mundial (62.409.431).

Tabela 10. *Ranking* dos dez países maiores produtores de coco no mundo no ano de 2022

Posição	País	Área (1000 hac/ano)	Produção (t/ano)
1	Indonésia	2.790	17.190.328
2	Filipinas	3.604	14.931.158
3	Índia	2.154	13.317.000
4	Brasil	184	2.744.418
5	Sri Lanka	460	2.204.150
6	Vietnã	173	1.930.182
7	Papua-Nova Guiné	197	1.258.149
8	Mianmar	47	1.217.442
9	México	125	1.117.487
10	Tailândia	131	679.232
TOTAL MUNDIAL		11.049	62.409.431

Fonte: Adaptado de FAO (2022).

No Brasil, o estado da Bahia ocupa o segundo lugar na produção de coco (**Tabela 11**), tendo produzido 340.941 toneladas em 2022 (IBGE, 2023), o correspondente a 18,63% da produção nacional.

Tabela 11. *Ranking* dos dez Estados maiores produtores de coco no Brasil, no ano de 2023

Ranking	Estado	Produção (t/ano)	Área colhida (ha)	Valor da produção (R\$ x 1000)
1	Ceará	572.328	42.520	430.937
2	Bahia	340.941	36.706	200.097
3	Pará	175.022	17.424	215.701
4	Pernambuco	142.875	7.151	98.069
5	Sergipe	140.245	20.989	135.363
6	Espírito Santo	123.954	8.838	131.677
7	Alagoas	105.201	22.969	127.908
8	Rio Grande do Norte	74.507	17.624	65.613
9	Paraíba	53.613	6.297	50.500
10	Rio de Janeiro	27.461	2.036	44.088

BRASIL	1.829.612	189.525	1.600.093
---------------	------------------	----------------	------------------

Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

O consumo de água de coco verde no Brasil é crescente e significativo, principalmente, pela extração da água *in natura*. No ano de 2000 havia no país cerca de 80 indústrias de pequeno e grande porte envasando água de coco para comercialização (Melo *et al.*, 2015)

O coco verde tem como vantagem sua utilização em diversos segmentos dedicados a alimentação e saúde humana, sendo comercializado *in natura* ou vendido para indústrias de alimentos que produzem leite/água de coco e/ou coco ralado (Teixeira, 2020).

Segundo Narita (2020), o resíduo do coco após o consumo de sua água pode ser dividido em 4 partes:

- Epicarpo – parte externa, composta por uma película fina, lisa e cerosa;
- Mesocarpo – parte fibrosa do coco;
- Endocarpo – casca dura que envolve a polpa;
- Albúmen sólido – a polpa do coco que envolver a sua água.

Os albumens são os principais produtos do coco por serem utilizados para consumo humano. As cascas que protegem a polpa (endocarpo) e as fibras (mesocarpo) são utilizadas para a produção de muitos itens como tecidos e utensílios, além de serem utilizados na construção (Giraldelli *et al.*, 2021). O endocarpo do coco seco é amplamente utilizado em indústrias processadoras como combustível sólido para a geração de energia térmica. Esse uso se deve ao alto teor de lignina e fibras presentes nas cascas de coco, o que aumenta seu poder calorífico, tornando-o uma alternativa interessante para a produção de calor (Marafon; Amaral; Lemos, 2019)

4.8. SUBPRODUTO DO COCO (ENDOCARPO E MESOCARPO)

A casca de coco verde, como subproduto do uso e da industrialização da água de coco, é depositada em lixões e às margens de estradas e demora mais de 8 anos para se decompor, por isso a sua utilização, além da importância socioeconômica, é uma alternativa para redução do impacto ambiental (Carrijo; Liz; Makishima, 2002).

A fibra (endocarpo) de coco, é um dos tipos de fibras naturais mais empregadas atualmente, como alternativa ao desenvolvimento de tecnologias que gerem menor impacto

ambiental (Wearn; Montagna; Passador, 2020). Essas fibras, são vegetais oriundas de subproduto da agricultura, sendo extraídas após a utilização principal do fruto, podendo ser retiradas tanto do coco verde como do coco seco (Giraldelli *et al.*, 2021)

4.8.1. Característica do mesocarpo

A fibra de coco já vem sendo empregada como substrato no cultivo de diversas espécies. As características físico-químicas da fibra da casca do coco verde *in natura* estão na **Tabela 12**.

Tabela 12. Propriedades físico-químicas da fibra da casca do coco verde *in natura*.

Componente	Concentração
Celulose (%)	24,7
Hemicelulose (%)	12,26
Lignina (%)	40,1
Cinzas (%)	2,56
Extrativos (%)	2,63
Carbono total (%)	22,79
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1280
pH	4,55
Quantidade de água absorvida (%)	5,2
Capacidade de aeração (%)	45,5
Porosidade (%)	95,6

Fonte: Cabral et al. (2017); Carrijo; Liz; Makishima (2002); Corradini et al. (2009).

A fibra da casca de coco apresenta uma quantidade significativa de lignina, com um valor médio de 40,10%, o que confere alta durabilidade e resistência ao material. Em comparação com outros materiais lignocelulósicos, essa biomassa também contém uma quantidade relevante de celulose (24,70%), característica que favorece sua aplicação na produção de etanol de segunda geração. Essas propriedades tornam a casca de coco um recurso viável para diversos usos industriais, especialmente na produção de biocombustíveis (Cabral *et al.*, 2017).

Segundo Carrijo, Liz e Makishima (2002) para uso na agricultura, é essencial que o material possua, entre outras características, uma porosidade acima de 85%, uma capacidade de aeração entre 10 e 30% e água facilmente assimilável de 20 a 30%. Com base nos dados da Tabela 10, nota-se que a fibra do coco apresenta uma porosidade de 95,6%, superando o valor mínimo recomendado, e uma excelente capacidade de aeração de 45,5%, bem acima da faixa ideal. No entanto, a quantidade de água absorvida, de 5,2%, está abaixo do intervalo considerado ideal, o que indica uma menor retenção de água facilmente disponível para as plantas. Assim, embora a fibra de coco atenda bem aos critérios de porosidade e aeração, pode ser limitada quanto à retenção de água e, portanto, pode exigir combinações com outros materiais ou maior frequência de irrigação para compensar essa característica.

Almeida, Oliveira e Kliemann (2007) estudaram a eficiência de espécies vegetais (taboa, lírio do brejo, conta-de-lágrima e capim Angola) na purificação de esgoto sanitário. Em seu experimento, utilizaram uma camada de fibra seca de casca de coco verde na drenagem de um sistema do tipo zona de raízes com fluxo subsuperficial descendente para o tratamento de esgoto sanitário. Os resultados mostraram que os sistemas contendo fibra de coco foram mais eficientes na remoção de fósforo do que os que utilizavam substrato de areia. No entanto, esses sistemas foram menos eficientes na redução da demanda por oxigênio, nitrogênio amoniacal e coliformes.

Azevedo *et al.* (2008) utilizaram colunas preenchidas com fibra de coco como meio suporte para avaliar sua eficiência no tratamento de efluentes. Os resultados mostraram que a fibra de coco é um material promissor, com remoção média de 70% para DQO, 65% para DBO, atendendo aos limites ambientais para lançamento nos corpos d'água. A remoção de nitrogênio amoniacal foi de 3,45% e de fósforo de 18%. Apesar da remoção limitada de cádmio (56%) e dos nutrientes, a fibra de coco demonstrou resistência mecânica e boa capacidade de retenção e estabilidade. Desta forma mostrou-se uma alternativa sustentável e viável para filtros biológicos, embora seja necessária a complementação com outros materiais ou tratamentos para alcançar maior eficiência na remoção de metais pesados e nutrientes.

5. METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos dessa pesquisa foram os mesmos utilizados por Silva (2007), com modificações do solo e adição de fibra de coco como meio suporte, das plantas auxiliares do tratamento e da forma operacional.

5.1. MONTAGEM DO SISTEMA EXPERIMENTAL

O sistema experimental foi montado com quatro reservatórios de polietileno com capacidade de 250 litros. Destes, três empregados como *wetlands* construídos de fluxo vertical (WCFV1, WCFV2 e WCFV3) e o quarto como reservatório de alimentação (RA).

Cada um dos três *wetlands* construídos foi equipado com um sistema de drenagem semelhante, composto por camadas estratificadas. Na base do reservatório, foi instalada uma camada de 5 cm de brita n.º 1 (1 a 2 cm) (Figura 5a), sobre a qual foi colocado um revestimento plástico (Figura 5b) para acomodação da tubulação de drenagem (Figura 5b). Essa tubulação foi coberta por uma sequência de materiais filtrantes, totalizando 10 cm de espessura: 5 cm de brita n.º 1 (1 a 2 cm), 3 cm de cascalho (0,5 a 1 cm) e 2 cm de pedras de aquário (0,1 a 0,5 cm) (Figura 5c). Sobre essa camada foi disposta uma tela de malha fina tipo sombrite (Figura 5d), que serviu de base para a aplicação da camada superior de 27 cm de solo filtrante.

Em um dos tanques (WCFV1), o leito filtrante (meio suporte) foi composto por 25 cm de solo e 2 cm de fibra de coco verde seca (**Figura 6a**). A fibra de coco foi obtida a partir do desfibramento da casca verde do coco (epicarpo e mesocarpo) e submetida à uma temperatura de 100 °C em uma estufa por 24h. Em seguida foi lavada para tirar o máximo de sua coloração (**Figura 6 b**).

Os leitos filtrantes dos três WCFV foram preparados com uma mistura de solo e areia lavada grossa na proporção, respectivamente, de 1:1,5. Antes de ser adicionada nas unidades experimentais WC, toda a mistura foi pesada, resultando em quantidades específicas de solo de, aproximadamente, 138 kg (WCFV-1) e 197 kg (WCFV2 e WCFV3). O WCFV1 recebeu uma quantidade menor de solo, devido à presença da camada de fibra de coco.

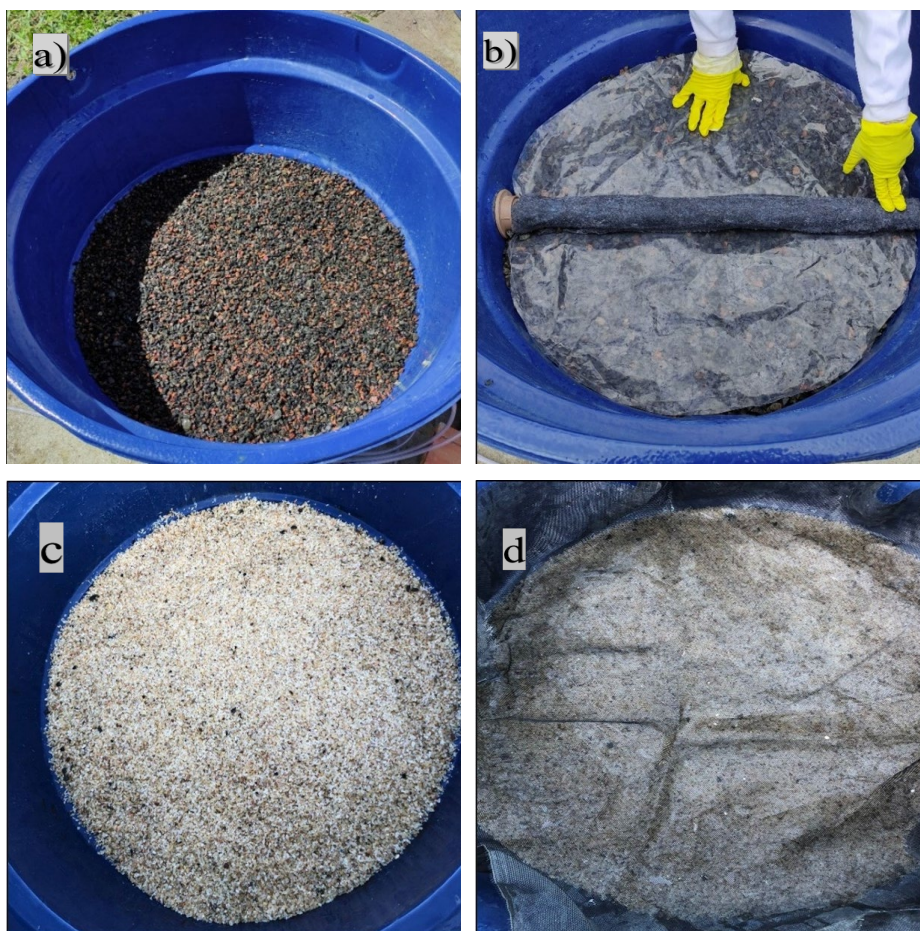


Figura 6. Camada inferior de nivelamento (a); Tubo de drenagem forrado com bidim (b); Sistema de drenagem completo (c); tela de malha fina que receberá o solo (d).

Fonte: Elaboração Própria (2024)



Figura 5. Casca de coco verde desfiada (a); Lavagem da fibra de coco já seca (b).

Fonte: Elaboração Própria (2024)

Os perfis dos leitos filtrantes e sistemas de drenagem dos WCFV podem ser vistos na **Figura 7**.

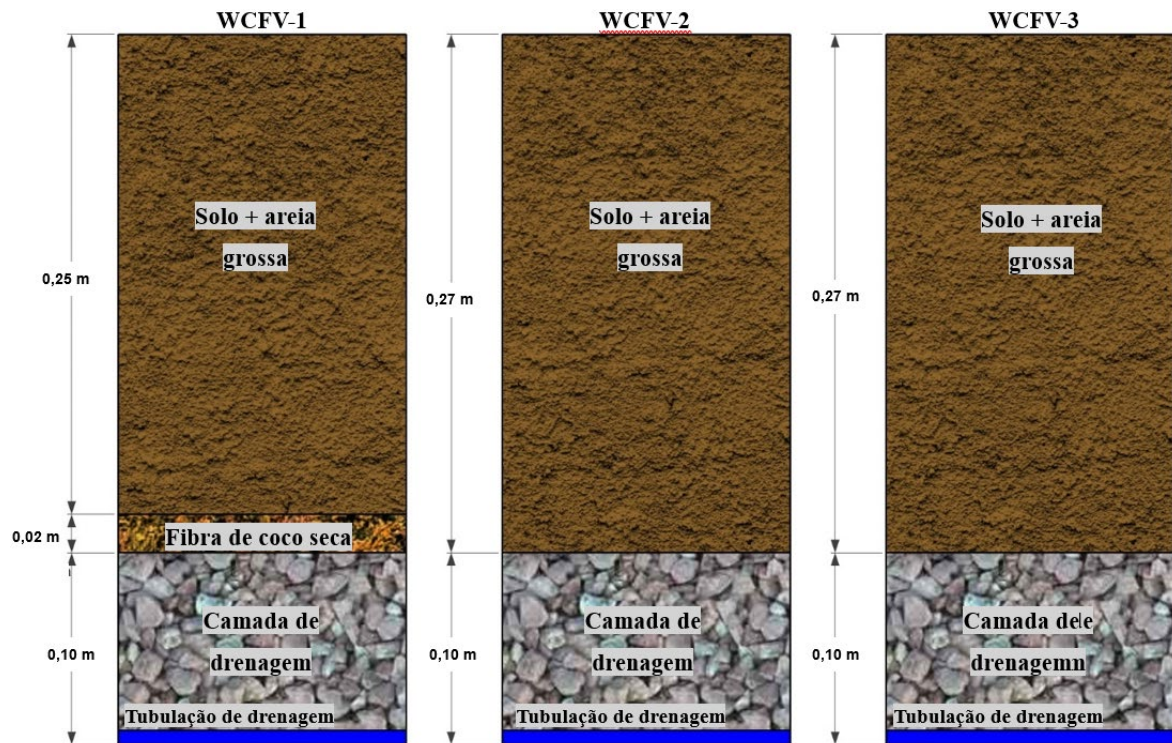


Figura 7. Perfil dos leitos filtrantes e camada de drenagem das unidades experimentais WCFV.

Fonte: Elaboração Própria (2024).

Em todos os *wetlands*, foram instaladas mangueiras (piezômetro) para medição de perda de carga. Em cada local de inserção das mangueiras, foi colocado uma camada de bidim e britas de diferentes granulometrias para impedir a passagem de solo para as mangueiras (**Figura 8a**). Após preenchimento de todos os WCFV com o solo, colocou-se brita na camada superior, a fim de evitar ressuspensão do solo durante a aplicação dos esgotos e da chuva, em períodos de grandes precipitações e, também, para distribuir de forma uniforme os esgotos no tanque e minimizar a formação de caminhos preferenciais (**Figura 8b**).

Sobre os leitos filtrantes foram instaladas as tubulações de PVC de 40 mm para distribuição dos efluentes para tratamento (**Figura 9 a, b, c**). O sistema experimental completo pode ser observado na (**Figura 9d**). Este sistema permite a irrigação de cada *wetland* de forma independente, através dos registros instalados em cada saída, garantido que cada um dos três recebam a mesma quantidade de efluente para tratamento.



Figura 8. Leito filtrante e local onde foi instalado o último piezômetro (a); Leito totalmente preenchido e com a camada superficial de brita (b).

Fonte: Elaboração Própria (2024)





Figura 9. Sistema de distribuição dos WCFV-1 (a), WCFV-2 (b) e WCFV-3 (c); Sistema experimental completo (d).

Fonte: Elaboração Própria (2024)

O solo para este estudo foi retirado do terreno da Universidade Federal do Recôncavo Baiano - UFRB, no município de Cruz das Almas na Bahia. A cidade está localizada na mesorregião geográfica da região metropolitana de Salvador e, microrregião geográfica de Santo Antônio de Jesus. Apresenta altitude média de 225 m e coordenadas geográficas 12° 48' 38" S e 39° 06' 26" O (IBGE, 2024). Nesse local predomina o solo Argissolo amarelo (Rodrigues *et al.*, 2009).

Argissolos amarelos são originados principalmente de materiais argilosos ou areno-argilosos. Tem como principal limitação sua fertilidade normalmente baixa e risco de erosão. Apresentam boas condições físicas de retenção de umidade e boa permeabilidade. São intensamente utilizados para culturas de cana-de-açúcar e pastagens e, em menor escala, para cultivo de mandioca, abacaxi, coco da baía e citros, além de grandes áreas de reflorestamento com eucalipto (Santos; Zaroni; Almeida, 2021).

A escolha do solo, do tipo Argissolo Amarelo, como meio filtrante do sistema experimental *wetlands* construídos ocorreu em função de ser próprio da região de Cruz das Almas-Ba, onde o experimento foi realizado. Para manter uma condutividade hidráulica elevada, de forma a evitar a rápida colmatção e perda de fluxo, o solo foi misturado com areia média lavada, na proporção de 1:1,5, conforme Silva (2007).

As características físico-químicas foram analisadas pelo laboratório de solos da Embrapa e podem ser observadas nas **Tabela 17** a **Tabela 20**, item 6.3.1.

5.3. PLANTIO E TRANSPLANTIO DAS MUDAS

Para o preparo das mudas, as sementes do feijão e do sorgo foram semeadas em sacos de mudas (**Figura 10**) e irrigadas apenas com água até o momento do transplântio. Após 7 dias da germinação, foram transplantadas para as unidades experimentais WCFV. Os sacos de mudas foram preenchidos com uma mistura de solo e adubo orgânico na proporção, respectivamente, de 2:1. Em covas com aproximadamente 1 cm de diâmetro e de profundidade, foram colocadas cinco sementes e foram produzidas 10 mudas de sorgo e 20 de feijão.

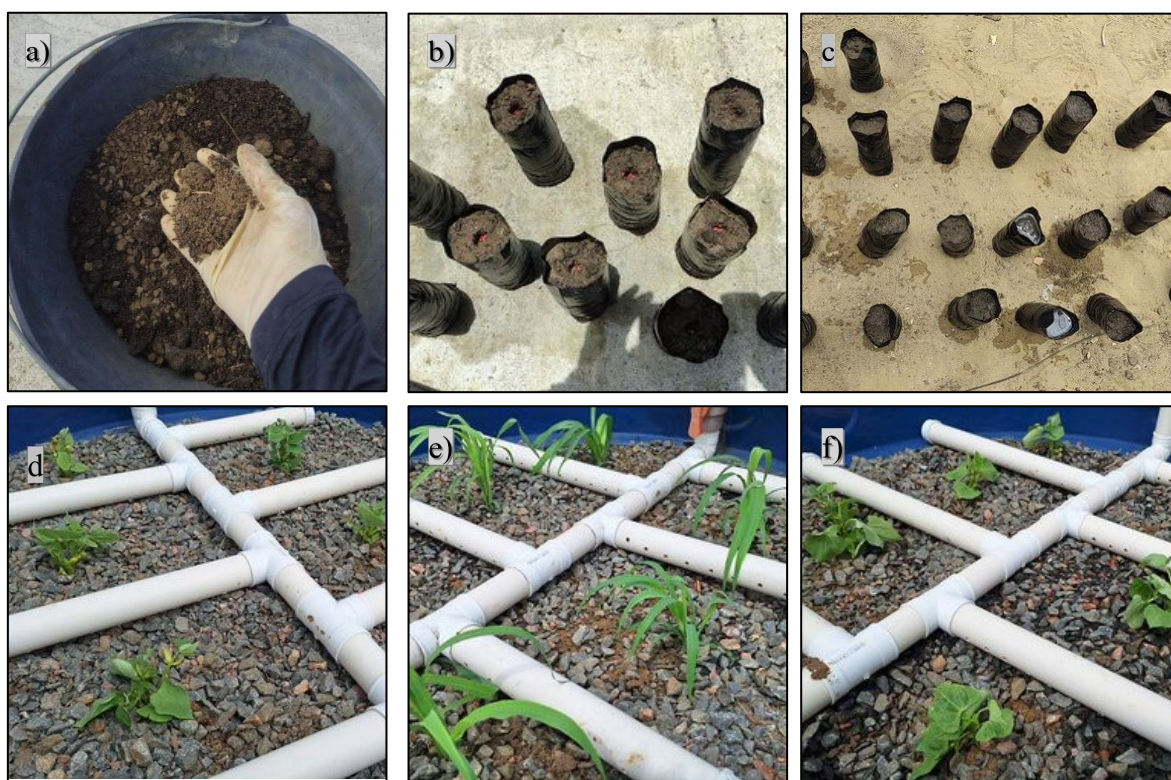


Figura 10. Mistura de solo e adubo orgânico (a); solo adubado com covas para receber as sementes de sorgo (b) e de feijão (c); Feijão transplantado no WCFV-1 (d) e WCFV-3 (f) e do sorgo no WCFV-2 (e).

Fonte: Elaboração Própria (2024)

Nas unidades experimentais WCFV, foram abertas seis covas com 5 cm de diâmetro e de 5 a 15 cm de profundidade, dependendo do tamanho do sistema radicular das mudas.

Em cada cova, foram plantadas cinco plantas, totalizando 30 mudas distribuídas em uma área de 0,85 m², resultando em uma densidade, aproximadamente, de 35,29 plantas/m². Os WCFV1 e WCFV3 foram destinados ao cultivo de feijão, enquanto o WCFV2 o de sorgo.

5.4. OPERAÇÃO E MONITORAMENTO

A operação do sistema experimental ocorreu com a aplicação de 50 litros de esgoto doméstico, coletado na saída do reator UASB da estação de tratamento da Embasa em Cruz das Almas/BA, para tratamento em cada unidade experimental WCFV, três vezes na semana (segundas, quartas e sextas-feiras), resultando em uma taxa de aplicação hidráulica de 0,08 m³/m²·dia¹. A aplicação ocorreu em dias alternados para promover a aeração do solo e controlar a colmatação.

As amostras para análises do afluente e do efluente de cada unidade de WCFV foram coletadas semanalmente, sempre às segundas-feiras. No entanto, a periodicidade das coletas e análises foi ajustada para quinzenal, com o objetivo de otimizar a logística e economizar os materiais e reagentes utilizados nas análises.

O primeiro ciclo das culturas do sorgo e do feijão durou 70 dias. Após esse período, houve um intervalo de descanso de 26 dias antes do início do segundo que durou 28 dias. O intervalo entre os ciclos das culturas foi fundamental para garantir a recuperação do solo e do sistema e durante esse período, realizaram-se as medições de perda de carga. Para isso, os tanques foram preenchidos com água até a saturação completa do meio filtrante, garantindo condições estáveis de fluxo. Em seguida, estabeleceu-se um regime de vazão constante, com igual fluxo de entrada e saída, para simular condições operacionais controladas. A perda de carga foi determinada por meio da diferença de nível observada nos piezômetros instalados ao longo do perfil dos tanques, utilizando a equação de Darcy.

5.4.1. Qualidade físico-químicas dos afluentes e efluentes

A qualidade dos afluentes e efluentes foi avaliada por meio dos parâmetros: pH, cor, turbidez, condutividade elétrica (CE), cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), dureza total (DT), sódio (Na⁺), potássio (K⁺).

Os aparelhos de medição, métodos e procedimentos utilizados na caracterização da qualidade dos afluentes e efluentes podem ser observados na **Tabela 13**.

Tabela 13. Parâmetros de qualidade e seus respectivos métodos, aparelhos e procedimentos de análise

Parâmetro	Método	Procedimento
pH	Eletrométrico	SMEWW 4500-H ⁺
CE	Condutivímetro	SMEWW 2510 B
Cor	Colorímetro	SMEWW 2120 B
Turbidez	Turbidímetro	SMEWW 2130 B
Dureza	Titulométrico	Standard Methods 2340-C
Cálcio	Titulométrico	Standard Methods – 3500-B
Magnésio	Titulométrico	Standard Methods – 3500-B
Sódio	Fotômetro de Chama	IS 9497 (1980)
Potássio	Fotômetro de Chama	IS 9497 (1980)

Fonte: Elaboração Própria (2024).

5.4.2. Determinação de sódio (Na⁺) e potássio (K⁺)

As análises de Na⁺ e de K⁺ foram realizadas utilizando o fotômetro de chama. O método se baseia na emissão de luz por átomos excitados na chama, onde a intensidade da luz emitida é proporcional à concentração de íon na solução.

No processo de digestão, necessário para a determinação de sódio e potássio, as amostras precisam ser tratadas para converter os compostos presentes em formas reativas e facilmente mensuráveis. Esse processo envolve a adição de 5 mL da amostra em tubos de vidro, seguidos pela adição de 3 mL de ácido sulfúrico e 1 mL de peróxido de hidrogênio. Os tubos são levados a um bloco digestor por 4 horas a 350 °C em uma capela de exaustão. Após esse período, os tubos são deixados para esfriar ainda na capela devido à liberação de enxofre durante o processo. Essa digestão é crucial para garantir que todos os compostos de sódio e potássio estejam disponíveis para a leitura fotométrica, permitindo uma análise precisa e confiável desses elementos.

Após a digestão, o volume é passado para um balão de 50 mL e completado com água destilada e realizada a leitura no fotômetro que deve ser ligado entre 20 e 30 min antes das leituras para garantir a estabilização do equipamento.

- **Calibração do fotômetro**

O aparelho é zerado com água destilada e calibrado com soluções padrão de Na^+ e K^+ , com concentrações específicas de 140 meq/L e 5 meq/L, respectivamente. Este processo de calibração é repetido até que o aparelho esteja estabilizado. Após a calibração, o aparelho está pronto para as leituras das concentrações dos referidos cátions das amostras.

- **Curva de padrão do fotômetro**

Para preparar uma curva padrão de sódio e potássio, são utilizadas concentrações de 0, 5, 10, 20, 30, 40 e 50 mg/L (ppm), obtidas a partir de uma solução estoque de 1000 mg/L. Pipeta-se volumes específicos da solução estoque em balões volumétricos de 100 mL e completa-se o volume com água deionizada.

- **Solução estoque de 1000 mg/L de NaCl para preparo da curva padrão de Na^+**

Dissolver 0,2541 g de NaCl em cerca de 70 mL de água deionizada, colocar em um balão volumétrico de 100 mL e completar o volume.

- **Solução estoque de 1000 mg/L de KCl para preparo da curva padrão de K^+**

Dissolver 0,1907 g de KCl em cerca de 70 mL de água deionizada, colocar em um balão volumétrico de 100 mL e completar o volume.

Com base nas leituras fotométricas para cada concentração das soluções estoques de Na^+ e K^+ são criadas as curvas resultantes e obtidas as respectivas equações que são utilizadas para cálculo das concentrações de Na^+ e K^+ das amostras.

5.4.3. Dureza Total

A determinação de dureza total, cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}) em amostras de água é um procedimento essencial para a avaliação da qualidade da água, conforme descrito na metodologia de referência do "*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*", 20ª edição, seções 2340 C, 3500-Ca B e 3500-Mg B.

A metodologia emprega a titulometria com EDTA como principal técnica. As soluções de trabalho incluem EDTA 0,01N, soluções padrão de Ca^{+2} e indicadores específicos como murexida e negro de eriocromo T. A padronização da solução de EDTA é fundamental e é realizada utilizando uma solução padrão de Ca^{+2} , com ajustes de pH e indicadores apropriados para garantir a precisão dos resultados.

Para a análise da dureza total, a amostra é tratada com uma solução tampão e um indicador negro de eriocromo T, seguido de titulação imediata com EDTA 0,01M até o ponto de viragem, que ocorre quando a cor muda de roxo ou vermelho para azul. O volume de EDTA gasto é anotado para cálculo posterior da dureza.

Na determinação do Ca^{+2} , a amostra é ajustada a um pH entre 12 e 13 com hidróxido de sódio e tratada com indicador murexida. A titulação é realizada com EDTA 0,01M, e a mudança de cor de rosa para roxo (púrpura) indica o ponto de viragem. O volume de EDTA utilizado é registrado.

Os cálculos das concentrações de cálcio e magnésio são feitos a partir dos volumes de EDTA consumidos nas titulações. O cálcio é calculado diretamente, enquanto o magnésio é determinado pela diferença entre os volumes de EDTA gastos na titulação total e na titulação de cálcio. A dureza total é expressa em mg/L de CaCO_3 .

5.4.4. Monitoramento da qualidade do solo

O monitoramento da qualidade do solo também considerando a metodologia descrita por Silva (2007). Foi avaliado com base na fertilidade, acidez e salinização e sodificação do solo. As amostras foram coletadas nas camadas de 0-5 cm dos solos de cada unidade experimental, em triplicata, e encaminhadas ao laboratório da EMBRAPA Mandioca e Fruticultura, localizada no município de Cruz das Almas-Ba para análise das suas características químicas.

5.4.5. Razão de Adsorção de Sódio (RAS)

A razão de adsorção de sódio (RAS), em milimol por litro (mmol/L), foi calculada pela **Equação 1**.

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Na^+ - Concentração de Sódio (mmol/L)

Ca^{2+} - Concentração de Cálcio (mmol/L)

Mg²⁺ . Concentração de Magnésio (mmol/L)

5.4.6. Condutividade hidráulica do solo (K)

Segundo Silva (2007), a condutividade hidráulica do solo pode ser medida através da equação de Darcy **Equação 2**, que expressa a relação entre vazão (Q) e o gradiente de pressão hidráulica através de um meio poroso.

$$Q = K_s A \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Q - vazão constante que passa pela unidade experimental (L³/T);

K_s - condutividade hidráulica (L/T);

A - área da seção transversal do reservatório (L²);

h₁ e h₂ - carga hidráulica nos piezômetros 1 e 2 (m);

L - Distância que a água percorre no meio suporte, entre os piezômetros 1 e 2 (m)

Seguindo a metodologia de Silva (2007), inicialmente, os reservatórios foram saturados com água de poço de forma ascendente com vazão constante e mínima para evitar formação de bolhas de ar no interior do reator (WC). Após a saturação, a mangueira foi colocada sobre a superfície da água com uma vazão de entrada contínua e constante igual a de saída do reservatório. Quatro piezômetros foram instalados, e as diferenças de nível entre eles foram registradas para calcular a carga hidráulica.

As medidas da K_s foram realizadas antes do início da operação dos sistemas e no final de cada ciclo das culturas, para avaliar a ocorrência da colmatagem do solo.

5.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Neste trabalho, a análise estatística foi realizada com base no *box plot*, uma ferramenta amplamente utilizada na pesquisa científica sendo um recurso valioso na análise de dados quantitativos.

A interpretação do *box plot* é essencial na análise exploratória de dados, pois oferece uma visão clara da distribuição de uma variável quantitativa. Representando a mediana, que divide a amostra em duas partes iguais, e a altura da caixa, que reflete a variabilidade dos dados, o *box plot* também inclui os primeiros (Q1) e terceiros quartis (Q3), além dos valores mínimo e máximo. As hastes do gráfico definem os limites dos dados, enquanto valores fora desses limites são identificados como *outliers*, indicando a necessidade de uma investigação mais profunda. Ao empregar essa ferramenta, é possível não apenas compreender a posição central, a dispersão e a assimetria dos dados, mas também detectar anomalias que podem impactar a interpretação dos resultados, tornando o *box plot* uma ferramenta gráfica valiosa para resumir e visualizar informações estatísticas de maneira didática (Guedes *et al.*, 2005; Martins, 2005; Valladares Neto *et al.*, 2017).

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. PLANTAS DO FEIJÃO E DO SORGO NA REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ

Na **Tabela 14** constam as concentrações de cor e turbidez dos esgotos afluente e efluentes das unidades de WCFV em dois ciclos das culturas do feijão e do sorgo.

Tabela 14. Concentrações de cor e turbidez dos esgotos afluente e efluente das unidades WCFV com meio suporte de solo sem fibra de coco, no 1º e 2º ciclos das culturas do feijão e do sorgo.

Parâmetro	1º ciclo			2º ciclo		
	Afluente	Efluente		Afluente	Efluente	
		Feijão	Sorgo		Feijão	Sorgo
Cor (uC)	682,67±8,44	266,40±6,90	441,20±16,06	568,00±29,44	443,60±5,20	463,67±7,16
Turbidez (NTU)	94,70±4,27	25,18±0,91	46,37±1,00	39,00±1,67	65,67±0,76	38,53±0,62

Fonte: Elaboração Própria (2024).

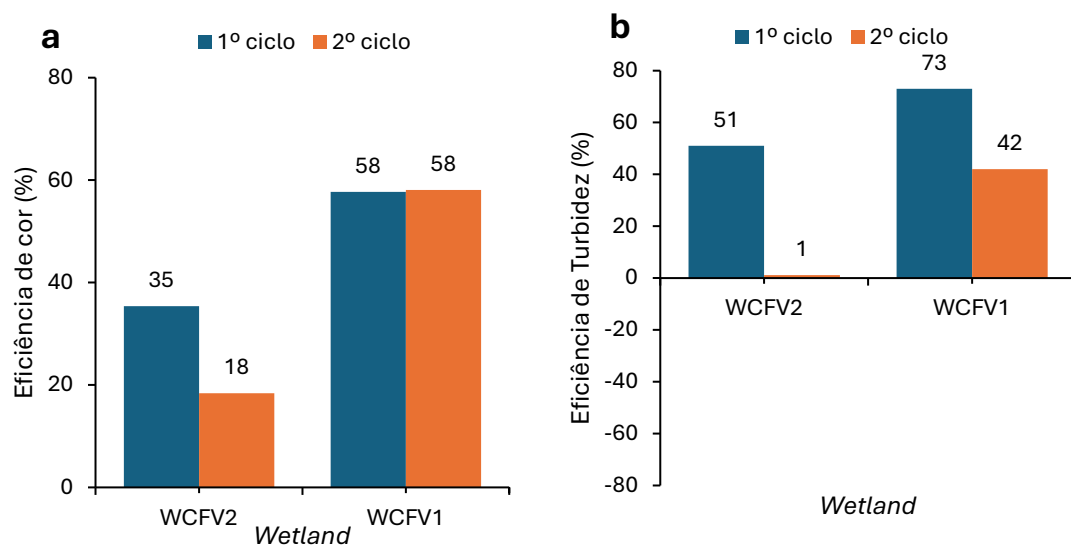


Figura 11. Eficiências médias de remoção (%) de cor (a) e turbidez (b) das unidades WCFV plantadas com feijão (WCFV3) e com sorgo (WCFV2), no primeiro e segundo ciclo das culturas.

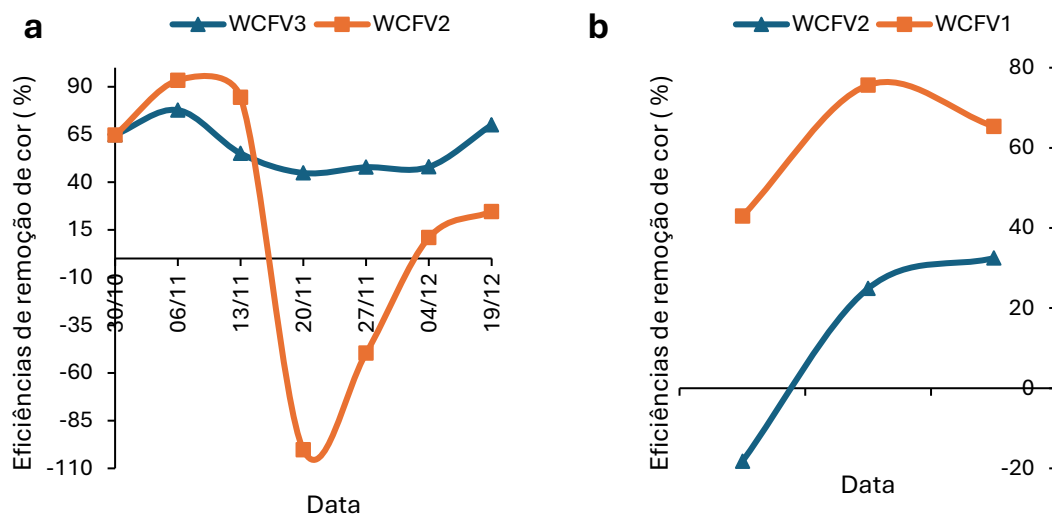


Figura 12. Remoção média de cor (%) pelas unidades experimentais WCFV com meio suporte de solo sem fibra, plantado com as culturas de feijão (WCFV3) e sorgo (CVFV2), no primeiro ciclo (a) e no segundo (b) ciclo das culturas.

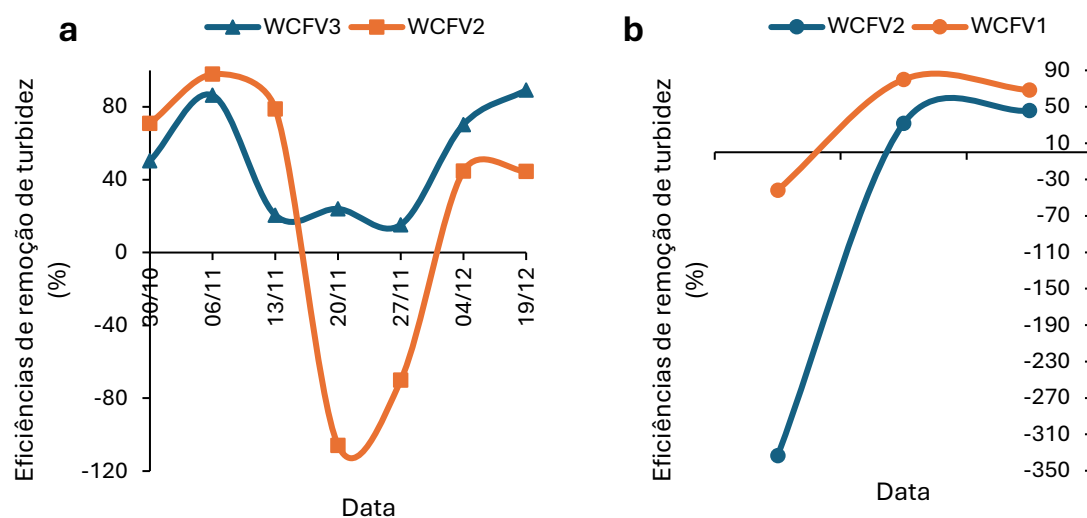


Figura 13. Remoção média de turbidez (%) pelos WCFV com meio suporte de solo sem fibra, plantados com as culturas de feijão (WCFV2) e sorgo (WCFV3), no primeiro ciclo (a) e no segundo (b) ciclo das culturas.

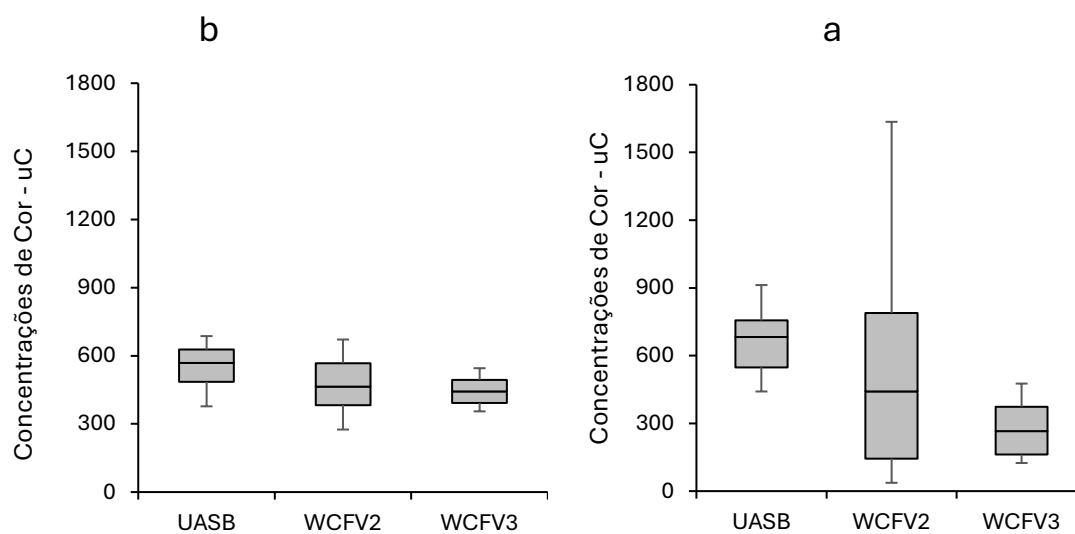


Figura 14. Gráfico *box plot* das concentrações de cor do afluente (UASB) e dos efluentes dos WCFV plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2), no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

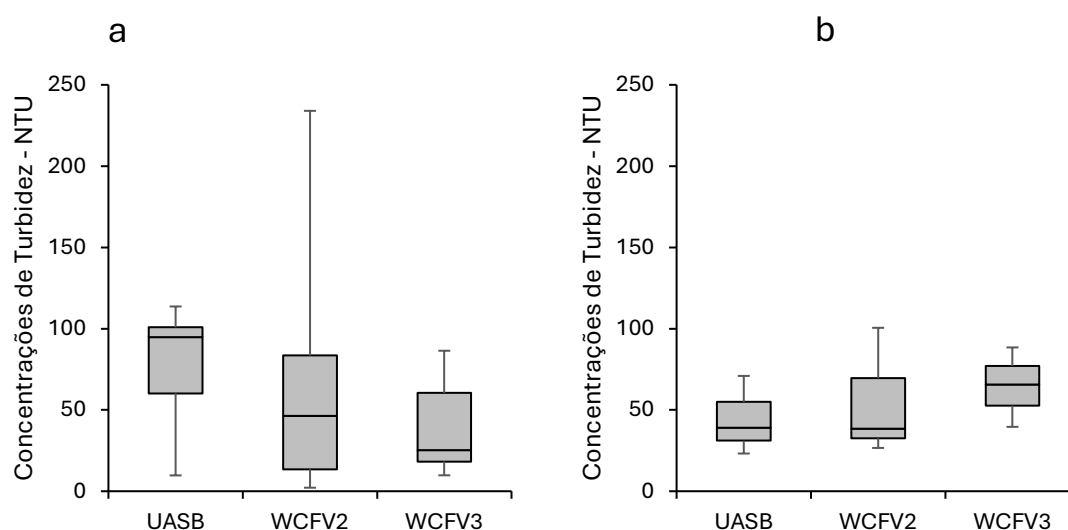


Figura 15. Gráfico *box plot* das concentrações de Turbidez do afluentes (UASB) e dos efluentes dos WCFV plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2), no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

Como apresentado na **Tabela 14**, no primeiro ciclo, ambas as unidades experimentais de *wetlands* construídos promoveram remoção de cor e turbidez, com destaque para o sistema plantado com feijão, que obteve os melhores resultados em ambos os parâmetros. No entanto, no segundo ciclo, observou-se uma queda nas eficiências de remoção, com a unidade plantada com feijão demonstrando, inclusive, aumento na turbidez do efluente. Esse comportamento pode estar relacionado à degradação das raízes do feijão ao final do ciclo vegetativo, o que pode ter promovido a liberação de material particulado para a zona de percolação e, conseqüentemente, para o efluente final. Além disso, a menor densidade radicular residual pode ter reduzido o papel físico de retenção de sólidos, comprometendo a clareza do efluente.

Na **Figura 11**, observa-se que as eficiências médias de remoção de cor no primeiro ciclo foram de 61% para o feijão (WCFV3) e 35% para o sorgo (WCFV2). Já no segundo ciclo, essas eficiências reduziram para 22% e 18%, respectivamente. Para a turbidez, as eficiências no primeiro ciclo foram de 73% (feijão) e 51% (sorgo), caindo no segundo ciclo para -68% e 1%, respectivamente. Essa queda de desempenho é reforçada nos gráficos *boxplot* das **Figura 14 e 15**, que evidenciam maior dispersão e presença de valores extremos nos dados do segundo ciclo.

O lançamento desses efluentes em corpos d'água deve atender a padrões de qualidade estabelecidos pela Resolução CONAMA n. 430/11 (Brasil, 2011), porém essa resolução não estabelece padrões de lançamento de efluentes para os parâmetros cor e turbidez.

A Resolução Conama n. 357/05 (Brasil, 2005), ao classificar corpos d'água, estabelece limites de cor para as águas de Classes 1 e 2, respectivamente, a nível do corpo d'água e de 75 uC; e de turbidez, respectivamente, de 40 UNT e 100 UNT. Considerando os limites de cor, os efluentes dos *wetlands* construídos com feijão e sorgo apresentaram valores superiores ao estabelecido para a Classe 2, logo, o lançamento desse efluentes poderia impactar um corpo hídrico em caso de, após a mistura, as concentrações de cor do corpo d'água receptor excedessem os limites estabelecidos na referida Resolução. Em contrapartida, os valores de turbidez se mantiveram dentro dos limites estabelecidos para o corpo d'água, indicando que o lançamento não causaria alterações na turbidez do corpo hídrico receptor.

No primeiro ciclo, a eficiência média de remoção de cor do WCFV3 (sorgo) foi baixa, em função dos desequilíbrios que ocorreram ao longo do ciclo **Figura 12(a)** No início, o sistema apresentou uma eficiência elevada, indicando um bom desempenho do sistema radicular e da biomassa microbiana na remoção de compostos orgânicos e sólidos. No entanto, a eficiência diminuiu significativamente na semana de 20 de novembro. Esse período foi marcado por chuvas intensas e pela fase de floração do sorgo. Durante a floração, as raízes do sorgo, que podem atingir até 1,5 m de profundidade e se expandem lateralmente até 2 m (Magalhães; Durães; Rodrigues, 2003). Em um espaço restrito, a expansão das raízes e o aumento da umidade do solo podem ter levado à desestruturação do substrato, comprometendo a capacidade de retenção e filtração do solo.

Meira (2004) observou que a turbidez em *wetlands* construídos aumentou durante o período chuvoso em comparação ao período seco. Esse comportamento reforça a hipótese de que o sistema radicular do sorgo (WCFV3), em conjunto com as condições climáticas adversas, contribuiu para a desestabilização do solo e o aumento da cor e da turbidez do efluente.

Com o passar das semanas, a estrutura do solo começou a se estabilizar devido à adaptação do sistema radicular e à compactação natural do substrato, permitindo uma recuperação gradual da eficiência do WCFV2. Contudo, a eficiência não atingiu os níveis iniciais, possivelmente, devido a danos estruturais permanentes no solo ou à alteração da

dinâmica de interação entre raízes e substrato. Esse fenômeno evidencia a sensibilidade dos sistemas vegetados ao manejo inadequado e às condições extremas de operação.

Por outro lado, o WCFV3 (feijão) manteve desempenho mais estável ao longo do ciclo, como demonstram as **Figura 14(a)** e **Figura 15(a)**. O sistema radicular do feijão, mais superficial e menos invasivo, permitiu maior equilíbrio da estrutura do solo e melhor capacidade de suporte à filtração, como discutido por Silva *et al.* (2004) e Gonçalves e Lynch (2014).

No segundo ciclo, realizado em condições de menor pluviosidade e temperaturas elevadas, ambos os sistemas apresentaram recuperação parcial da eficiência, porém, sem retornarem aos patamares observados no primeiro ciclo. A instabilidade inicial no segundo ciclo pode ser atribuída à saturação dos sistemas durante a medição de perda de carga e à remoção das plantas do ciclo anterior, prejudicando a retomada da filtração e a adaptação das novas culturas.

De maneira geral, a análise dos dados e a observação dos gráficos *box plot* reforçam que o WCFV plantado com feijão apresentou comportamento mais consistente ao longo dos ciclos, enquanto o WCFV plantado com sorgo foi mais sensível às variações ambientais e estruturais do sistema.

6.2. SOLO COM E SEM FIBRA DE COCO NA REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ

Observa-se na **Tabela 15**, que as concentrações médias de cor e turbidez nos efluentes dos *wetlands* com meio suporte de solo com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3) apresentaram uma redução no primeiro ciclo, com valores de turbidez semelhantes para ambos os sistemas. No segundo ciclo, o WCFV1 manteve a remoção de cor e de turbidez, enquanto o WCFV3 houve redução da remoção de cor e aumento nas concentrações de turbidez nos efluentes.

Tabela 15. Concentrações de cor e turbidez dos esgotos afluentes e efluentes das unidades WCFV em dois ciclos das culturas do feijão com meio suporte de solo com e sem fibra de coco.

Parâmetro	1º ciclo	2º ciclo
-----------	----------	----------

	Afluente	Efluente		Afluente	Efluente	
		Solo com fibra (WCFV1)	Solo sem fibra (WCFV3)		Solo com fibra (WCFV1)	Solo sem fibra (WCFV3)
Cor (uC)	682,67±8,44	288,95±3,63	266,40±6,90	568,00±29,44	238,03±3,76	443,60±5,20
Turbidez (NTU)	94,70±4,27	25,62±0,47	25,18±0,91	39,00±1,67	22,60±1,50	65,67±0,76

Fonte: Elaboração Própria (2024).

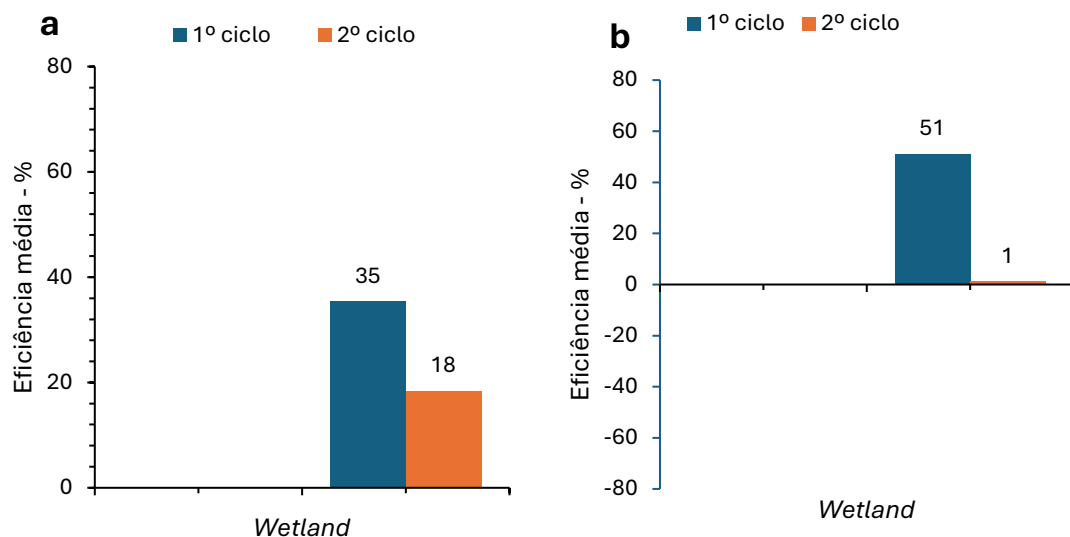


Figura 16. Eficiências médias de remoção (%) de cor (a) e turbidez (b) das unidades com fibra (WCFV1) de sem fibra de coco (WCFV3), no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

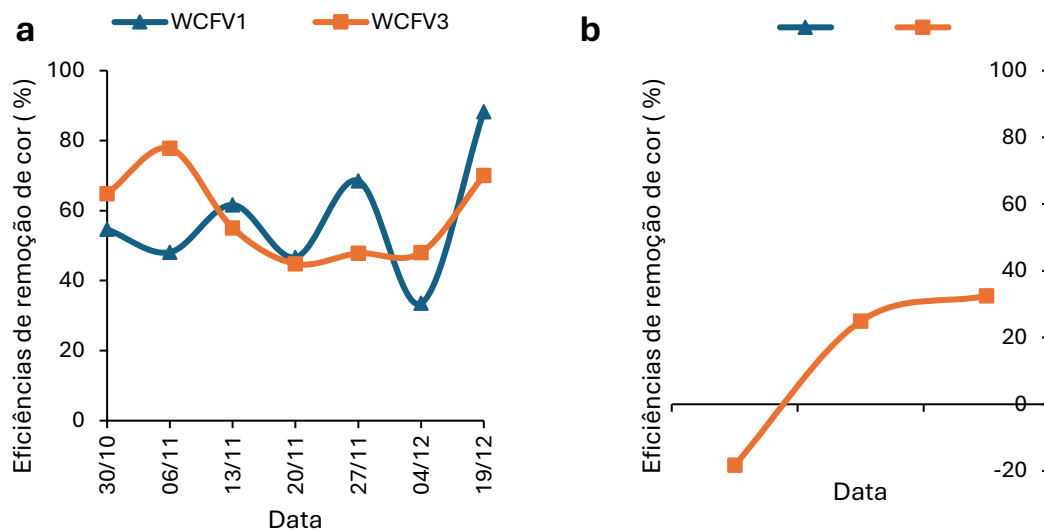


Figura 17. Remoção de cor (%) do efluente dos WCFV e dos efluentes dos *wetlands* de solo com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3), no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

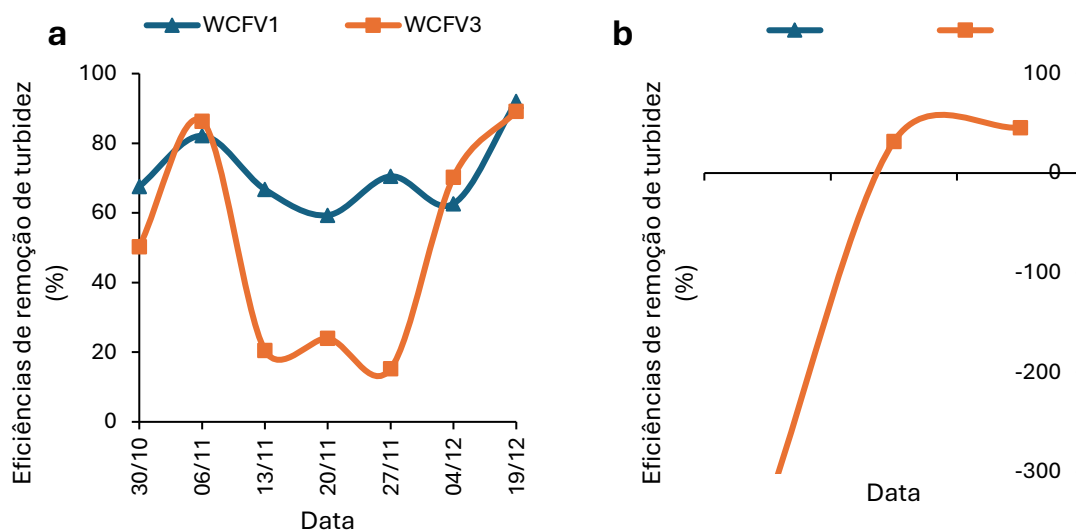


Figura 18. Remoção de turbidez (%) do efluente dos WCFV e dos efluentes dos *wetlands* de solo com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3), no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

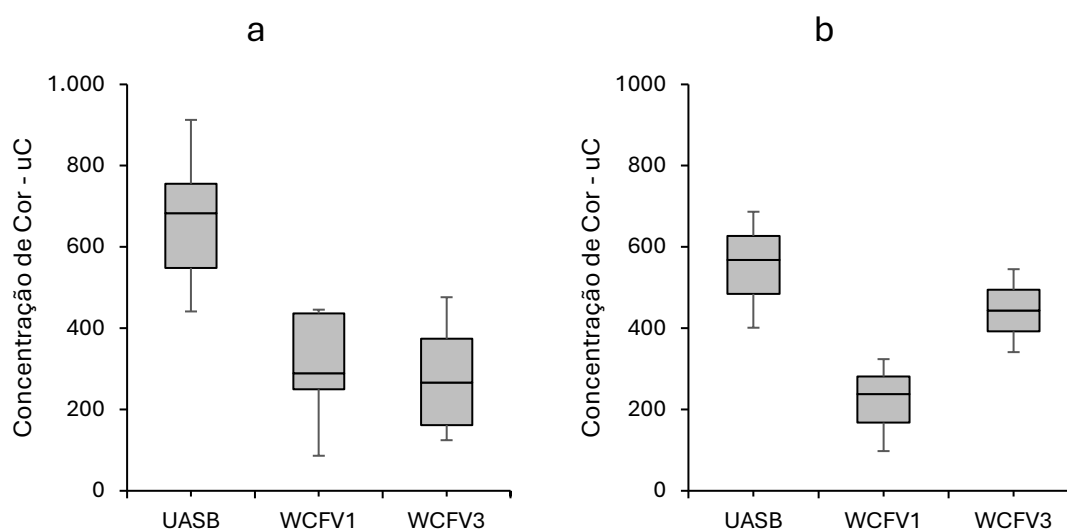


Figura 19. Gráfico *box plot* das concentrações de cor do afluente (UASB) e dos efluentes dos WCFV com meio suporte de solo com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3), no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

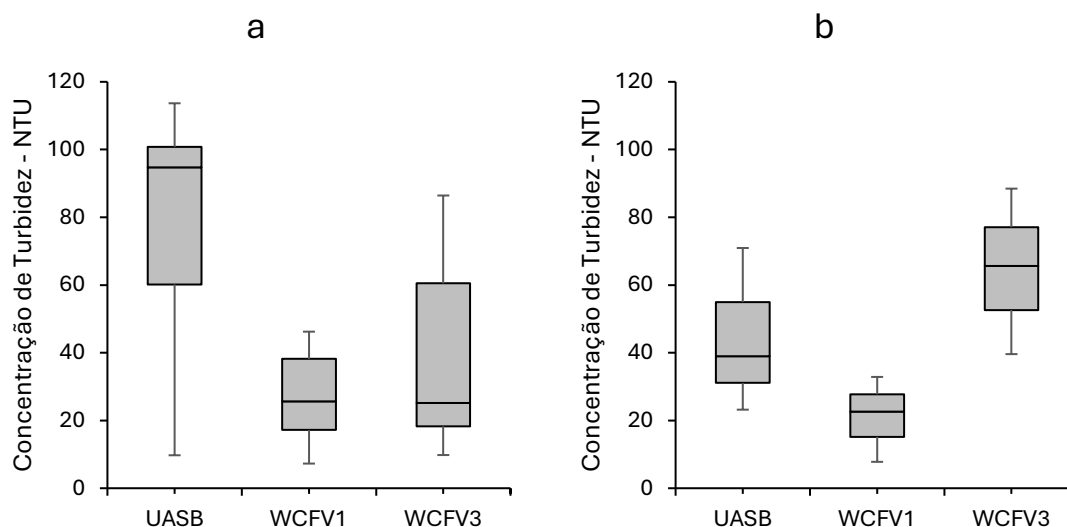


Figura 20. Gráfico *box plot* das concentrações de turbidez do afluente (UASB) e dos efluentes dos *wetlands* de solo com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3), no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

A análise das concentrações de cor e turbidez (**Tabela 15**) demonstrou que os esgotos afluentes apresentaram valores elevados desses parâmetros, tanto no primeiro quanto no segundo ciclo das culturas do feijão. No primeiro ciclo, a cor média do afluente foi de 682,67 uC, enquanto no segundo ciclo o valor diminuiu para 568,00 uC. Para a turbidez, as médias foram de 94,70 NTU e 39,00 NTU no primeiro e segundo ciclo, respectivamente. Essa redução entre os ciclos pode estar relacionada a variações nas condições operacionais e no próprio esgoto tratado pelo reator UASB.

As unidades de *wetlands* construídos apresentaram eficiência na remoção de cor e turbidez, como evidenciado na **Figura 16**. No primeiro ciclo, as eficiências médias de remoção de cor foram de 57,67% para o WCFV1 (com fibra) e 60,97% para o WCFV3 (sem fibra). Já no segundo ciclo, a eficiência do WCFV1 permaneceu elevada, atingindo 58,09%, enquanto o WCFV3 apresentou uma redução de desempenho, com 21,91% de remoção. Para a turbidez, ambos os sistemas apresentaram remoções superiores a 70% no primeiro ciclo, mas, no segundo ciclo, o sistema com solo e fibra manteve bom desempenho (42,05%), enquanto o sistema sem fibra teve eficiência negativa (-68,46%).

A evolução da remoção de cor ao longo do tempo é apresentada na **Figura 17**. No primeiro ciclo (**Figura 17a**), observa-se uma tendência estável de remoção de cor em ambas

as unidades, com o sistema sem fibra (WCFV3) apresentando melhores resultados em comparação ao sistema com fibra (WCFV1). No segundo ciclo (**Figura 17b**), o WCFV1 manteve a estabilidade na remoção, enquanto o WCFV3 teve um desempenho bastante inferior e mais instável.

Da mesma forma, a remoção de turbidez ao longo do tempo (**Figura 18**) evidenciou um comportamento semelhante. No primeiro ciclo (**Figura 18a**), as remoções foram elevadas e relativamente constantes em ambas as unidades, enquanto no segundo ciclo (**Figura 18b**) o WCFV1 manteve uma tendência de remoção, porém com flutuações, e o WCFV3 demonstrou acúmulo de turbidez no efluente.

Os gráficos *box plot* das concentrações de cor (**Figura 19**) reforçam essas observações. No primeiro ciclo (**Figura 19a**), as medianas das concentrações de cor dos efluentes dos *wetlands* foram inferiores ao afluente UASB, com reduções bem distribuídas. No segundo ciclo (**Figura 19b**), o WCFV1 ainda conseguiu reduzir a cor em relação ao afluente, enquanto o WCFV3 apresentou medianas próximas às do afluente, indicando baixa capacidade de remoção.

Para a turbidez, conforme mostrado na **Figura 20**, o primeiro ciclo (**Figura 20a**) apresentou reduções consideráveis em ambos os sistemas. Entretanto, no segundo ciclo (**Figura 20b**), os valores médios e medianos de turbidez no WCFV3 foram superiores aos do afluente, evidenciando o efeito negativo da ausência da fibra de coco no desempenho do sistema. A fibra de coco parece ter contribuído para a estabilidade do meio suporte e para a melhoria da qualidade do efluente, especialmente durante o segundo ciclo, onde as condições se tornaram mais desafiadoras.

Portanto, os dados indicam que a adição da fibra de coco ao meio suporte favoreceu a manutenção da eficiência de remoção de cor e turbidez ao longo dos ciclos, mesmo com a possível degradação natural da matéria orgânica do solo e da fibra ao longo do tempo. A presença da fibra proporcionou maior estabilidade hidráulica e filtragem.

6.3. REMOÇÃO DE SAIS

6.3.1. Plantas do feijão e do sorgo na remoção de sais

As características dos esgotos afluente e efluente das unidades *wetlands* construídos plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) nos dois ciclos operacionais podem ser observados na **Tabela 16**.

Tabela 16. Características dos esgotos afluente e efluente das unidades de *wetland* com as culturas do feijão (WCFV3) e do sorgo (WCFV2).

Parâmetro	Unidade	1º ciclo			2º ciclo		
		Afluente	Efluente		Afluente	Efluente	
			WCFV3	WCFV2		WCFV3	WCFV2
Condutividade elétrica (CE)	(dS/m)	1,58±0,01	1,51±0,01	1,27±0,01	1,35±0,01	1,18±0,00	1,26±0,00
pH	-	7,39±0,06	7,04±0,04	7,02±0,04	7,67±0,02	7,03±0,02	7,10±0,00
Cálcio (Ca ⁺²)	mg/L	29,67±1,04	55,70±1,39	44,24±2,43	25,51±1,21	27,07±2,56	32,53±1,39
Magnésio (Mg ⁺²)	mg/L	21,78±0,95	25,56±1,26	21,14±1,47	19,57±2,1	14,20±1,42	22,09±1,68
Sódio (Na ⁺)	mg/L	146,41±6,12	205,70±3,50	198,85±6,99	106,44±6,99	86,12±10,49	109,71±3,5
Potássio (K ⁺)	mg/L	17,61±0,67	12,81±0,22	17,21±0,31	6,95±0,53	5,49±1,15	3,49±0,36

Fonte: Elaboração Própria (2024). WCFV3 – Solo plantado com Feijão; WCFV2 – Solo plantado com sorgo.

Tabela 17. Concentrações de sais nas camadas de 0-5 cm dos solos da unidade WCFV3 com a cultura do feijão, antes e após a aplicação dos esgotos para tratamento no final dos dois ciclos da cultura.

Parâmetro	Unidade	Média ± desvio padrão		
		Antes da aplicação do esgoto	Após aplicação do esgoto	
			1º ciclo	2º ciclo
Potássio (K ⁺)	cmol/dm ³	0,07±0,00	0,07±0,01	0,10±0,05
Calcio (Ca ⁺²)		1,01±0,18	0,67±0,22	1,17±0,27
Magnésio (Mg ⁺²)		0,42±0,04	0,42±0,03	0,47±0,22
Calcio + Magnésio		1,43±0,21	1,05±0,21	1,60±0,49
Sódio (Na ⁺)		0,07±0,00	0,06±0,02	0,07±0,01

RAS	cmol/dm ³	0,08±0,00	0,08±0,01	0,08±0,02
-----	----------------------	-----------	-----------	-----------

Fonte: Elaboração própria (2024).

Tabela 18. Concentrações de sais nas camadas de 0-5 cm dos solos da unidade WCFV2 com a cultura do sorgo, antes e após a aplicação dos esgotos para tratamento no final dos dois ciclos da cultura.

Parâmetro	Unidade	Média ± desvio padrão		
		Solo utilizado	1º ciclo	2º ciclo
Potássio (K ⁺)	cmol/dm ³	0,07±0,00	0,08±0,00	0,06±0,00
Calcio (Ca ⁺²)		1,01±0,18	0,75±0,03	1,15±0,20
Magnésio (Mg ⁺²)		0,42±0,04	0,51±0,01	0,65±0,03
Sódio (Na ⁺)		0,07±0,00	0,05±0,00	0,07±0,00
RAS	cmol/dm ³	0,08±0,00	0,06±0,00	0,07±0,01

Fonte: Elaboração própria (2024).

Tabela 19. Características físico-químicas nas camadas de 0-5 cm dos solos da unidade WCFV3 (feijão), antes e após a aplicação dos esgotos para tratamento após dois ciclos das culturas.

Parâmetro	Unidade	Média ± desvio padrão		
		Solo utilizado	1º ciclo	2º ciclo
pH		5,30±0,04	5,30±0,04	5,55±0,30
Fósforo	mg/dm ³	13,00±0,67	27,00±13,50	26,50±13,1
Capacidade de Troca Catiônica	cmol/dm ³	2,48±0,28	2,61±0,16	2,72±0,66
Matéria Orgânica	g/kg	9,00±0,82	7,95±0,58	6,35±2,13

Fonte: Elaboração própria (2024).

Tabela 20. Características físico-químicas nas camadas de 0-5 cm dos solos da unidade WCFV2 (sorgo), antes e após a aplicação dos esgotos para tratamento após dois ciclos das culturas.

Parâmetro	Unidade	Média ± desvio padrão		
		Solo utilizado	1º ciclo	2º ciclo
pH		5,30±0,04	6,10±0,07	6,20±0,04
Fósforo	mg/dm ³	13,00±0,67	26,00±0,44	25,00±1,56
Capacidade de Troca Catiônica	cmol/dm ³	2,48±0,28	2,10±0,03	2,47±0,25

Matéria Orgânica	g/kg	9,00±0,82	10,80±0,42	3,10±0,27
------------------	------	-----------	------------	-----------

Fonte: Elaboração própria (2024).

O valor médio de pH do efluente do reator UASB foi de 7,39 (**Tabela 16**), em concordância com os dados de Lima (2005), Silva (2007), Teske e Wartchow (2017) e Mazucato et al. (2020). O pH é um parâmetro essencial no desempenho dos wetlands construídos, influenciando tanto a atividade microbiana quanto o desenvolvimento vegetal (Muduli et al., 2023). Valores próximos à neutralidade (entre 6 e 7) favorecem reações biológicas, a ionização de compostos e a estabilidade do sistema, otimizando o tratamento. A presença de plantas contribui para estabilizar o pH em torno de 7,5, melhorando ainda mais a eficiência do processo. No entanto, valores elevados de pH podem prejudicar a adsorção de contaminantes orgânicos emergentes (Rahman et al., 2020).

Segundo a Resolução CONAMA 430/11 (Brasil, 2005), o pH dos efluentes deve variar entre 5 e 9 para garantir segurança ambiental. Os valores médios de pH dos efluentes das unidades WCFV2 (sorgo) e WCFV3 (feijão) ficaram entre 7,02 e 7,10 (**Tabela 16**), dentro dos limites legais.

A condutividade elétrica (CE) representa a concentração de sais dissolvidos e é amplamente utilizada para avaliar a qualidade da água tratada para uso agrícola. A CE reflete a presença de íons como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- e HCO_3^- , cuja movimentação sob campo elétrico gera corrente elétrica (EMBRAPA, 2024; Santos et al., 2019; Val et al., 2024). O valor médio da CE nos afluentes das unidades foi de 1,58 dS/m (**Tabela 16**), semelhante ao reportado por Hoffmann et al. (2013), Lima (2005) e Sousa et al. (2000).

Durante os dois ciclos avaliados, as unidades WCFV2 (sorgo) e WCFV3 (feijão) apresentaram redução da CE nos efluentes. No 1º ciclo, o sistema com sorgo foi mais eficiente, enquanto o sistema com feijão mostrou baixo desempenho. No 2º ciclo, o WCFV2 manteve os níveis de CE semelhantes ao primeiro ciclo, mas o WCFV3 teve melhora significativa, com destaque na remoção de CE (**Tabela 16**). Essa redução está associada à diminuição de íons dissolvidos nos efluentes, como Na^+ e Mg^{2+} , especialmente na unidade WCFV3 no segundo ciclo.

Os efluentes apresentaram salinidade média, com CE variando entre 0,75 e 2,25 dS/m (**Tabela 16**), compatível com a classificação de Almeida (2010). De acordo com Cordeiro (2001), águas de baixa a moderada salinidade podem ser utilizadas na irrigação da maioria

das culturas, desde que haja manejo adequado, como lixiviação controlada. Portanto, os efluentes tratados nas unidades WCFV são considerados adequados para irrigação sob essa perspectiva.

Apesar do aumento nas concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+ nos efluentes (**Tabela 16**), os valores permanecem abaixo dos limites máximos recomendados para irrigação: 400 mg/L (Ca^{2+}), 60,77 mg/L (Mg^{2+}), 919,6 mg/L (Na^+) e 78,02 mg/L (K^+) segundo Almeida (2010). Em relação ao potássio, o melhor desempenho foi observado na remoção de K^+ : no 1º ciclo, apenas o WCFV3 mostrou eficiência; já no 2º ciclo, ambas as unidades removeram K^+ , com melhor desempenho do WCFV2 (**Tabela 16**).

A baixa eficiência na remoção de Ca^{2+} e Mg^{2+} (**Tabela 16**) decorre da lixiviação desses íons para os efluentes, inclusive dos já presentes no solo antes da aplicação do esgoto. No 2º ciclo, essa lixiviação diminuiu, resultando no aumento das concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo (**Tabela 17 e 18**), indicando maior retenção.

O aumento de Ca^{2+} no solo e no efluente durante o 2º ciclo pode estar relacionado à redução da matéria orgânica no solo. Segundo Pavinato e Rosolem (2008), a decomposição da matéria orgânica libera cátions trocáveis, como Ca^{2+} , para a solução do solo. Isso se confirma entre as Tabelas 17 a 20, nas quais a redução da matéria orgânica (**Tabela 19 e 20**) coincide com o aumento de Ca^{2+} no solo e nos efluentes.

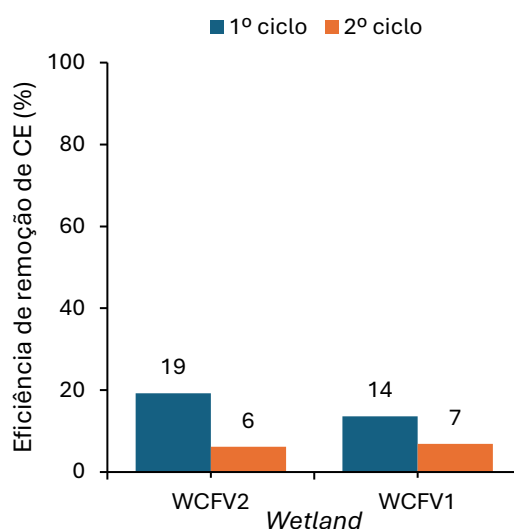


Figura 21. Eficiências médias de remoção (%) da condutividade elétrica (CE) pelos WCFV com meio suporte de plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2), no primeiro e segundo ciclos das culturas.

A eficiência de remoção da CE no WCFV3, plantado com feijão, foi de 4% no primeiro ciclo e 12% no segundo, enquanto no WCFV2, com sorgo, foi de 19% e 6%, respectivamente (**Figura 21**). Silva et al. (2018), em estudo com wetlands construídos utilizando solo (Latossolo Vermelho-Amarelo) misturado com areia média e plantado com arroz irrigado (*Oryza sativa* L.), obteve eficiências entre 35,52% e 30,03% no primeiro ciclo e entre 10,99% e 15,23% no segundo. Contudo, os autores destacaram que esses sistemas podem, frequentemente, aumentar a salinidade do efluente. Aumentos nas concentrações também foram observados por Meira (2004), com variações de 40% a 102%, e por Costa et al. (2003), com aumento de até 91%.

Observa-se na **Figura 21** que o WCFV3 (feijão) foi mais eficiente no primeiro ciclo, mas no segundo, o WCFV2 (sorgo) teve melhor desempenho. Apesar da remoção observada, os valores foram baixos e, caso a CE ultrapasse os limites recomendados para irrigação, será necessário realizar pós-tratamento dos efluentes.

As eficiências de remoção de Ca^{2+} e Mg^{2+} nos WCFV podem ser visualizadas na **Figura 22**.

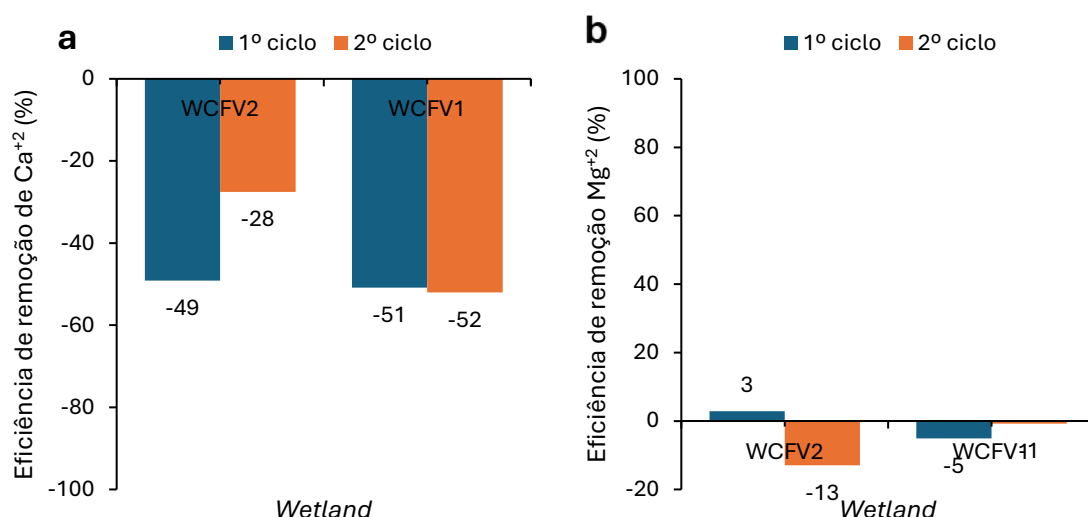


Figura 22. Eficiências médias de remoção (%) de Ca²⁺ (a) e Mg²⁺ (b) pelos WCFV com meio suporte de solo plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2), no primeiro e segundo ciclos.

Na **Figura 22a**, nota-se um aumento nas concentrações de Ca²⁺ no primeiro ciclo: -88% no WCFV3 e -49% no WCFV2. No segundo ciclo, essa ineficiência foi reduzida, indicando acúmulo do cátion nos solos, sendo o WCFV3 menos ineficiente (-6%) que o WCFV2. Assim, o solo com feijão reteve mais Ca²⁺ que o sorgo.

Figura 22b, observa-se que o WCFV3 aumentou a concentração de Mg²⁺ em 17%, revelando ineficiência, enquanto o WCFV2 removeu 3%. No segundo ciclo, houve inversão: o WCFV3 alcançou 27% de remoção, e o WCFV2 teve aumento de 13%. Meira (2004) reportou aumentos nas concentrações de Ca²⁺ entre 33% e 132% e de Mg²⁺ entre 34% e 120% em wetlands construídos.

As eficiências de remoção de Na⁺ e K⁺ são apresentadas na **Figura 23**.

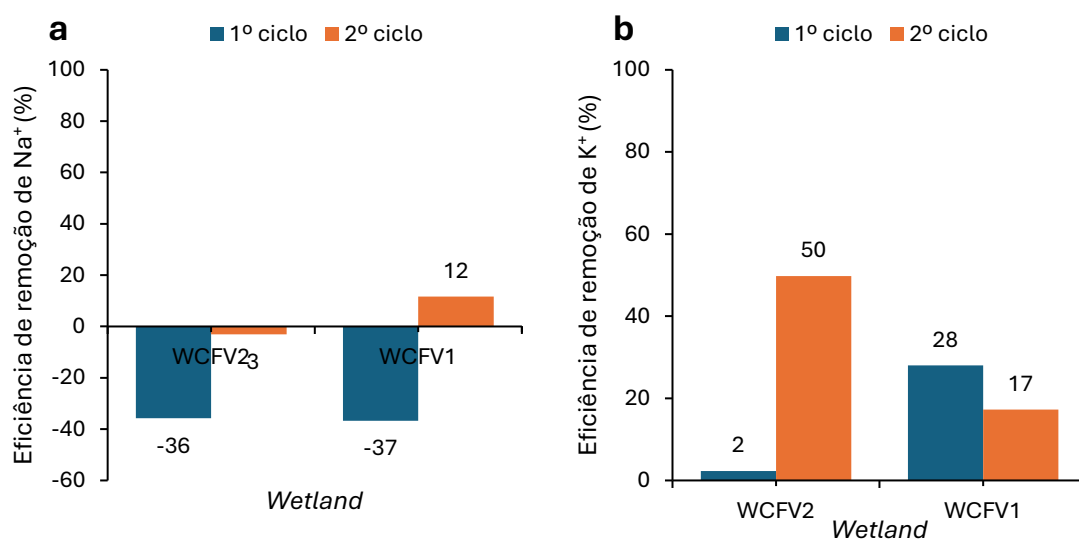


Figura 23. Eficiências médias e remoção (%) de Na⁺ (a) e K⁺ (b) nos WCFV com meio suporte de solo, plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2), no primeiro e no segundo ciclo.

O WCFV3 (feijão) removeu Na⁺ apenas no segundo ciclo, com eficiência média de 19%, enquanto o WCFV2 (sorgo) foi ineficiente em ambos os ciclos. Esse resultado pode estar relacionado à limitada capacidade de retenção de Na⁺ pelo solo, conforme indicado pelos baixos teores encontrados (**Tabelas 17 e 18**). O pH do solo (**Tabelas 19 e 20**) pode ter contribuído para a lixiviação, uma vez que em condições ácidas há menor retenção de cátions devido à predominância de cargas negativas no solo. Meira (2004) observou aumentos de Na⁺ entre 96% e 248% em sistemas similares.

Quanto ao K⁺ (**Figura 23b**), ambos os sistemas apresentaram remoção: o WCFV3 alcançou 27% no primeiro ciclo e 21% no segundo; já o WCFV2 teve 2% e 50%, respectivamente. Apesar do aumento de Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺, a CE dos efluentes foi reduzida, possivelmente pela remoção de outros sais, como K⁺ e nutrientes como nitrogênio e fósforo.

O desempenho das culturas variou entre os ciclos: no primeiro, o sorgo se destacou, especialmente na remoção de K⁺; no segundo, o feijão foi mais eficiente, removendo mais Mg²⁺ e Na⁺. Ambos os sistemas foram ineficientes para Ca²⁺, com ligeira vantagem para o sorgo. Esses dados indicam que o feijão pode ser mais adaptável às variações operacionais, mostrando potencial para maior robustez no longo prazo, principalmente por sua influência na qualidade do solo e remoção de sais.

A variação na remoção dos sais ao longo dos dois ciclos pode ser observada nas **Figuras 24 a 28**. Os padrões distintos entre as culturas sugerem que a escolha da planta influencia diretamente a eficiência do sistema, sendo impactada por fatores como estágio de desenvolvimento, clima, disponibilidade de nutrientes e espécie cultivada (Meira, 2004; Neves, 2022).

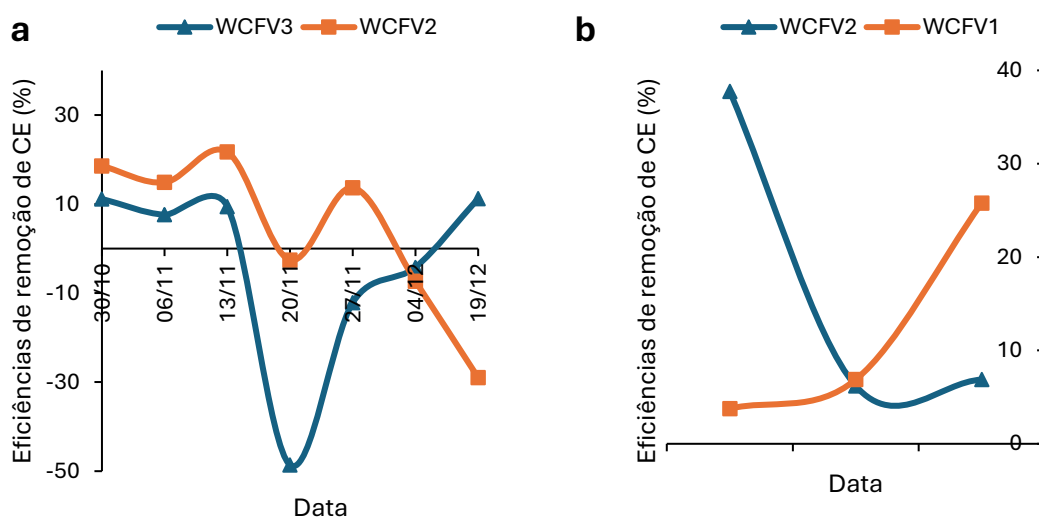


Figura 24. Remoção de CE (%) dos efluentes das unidades WCFV com meio suporte de solo, plantados com as culturas de feijão (WCFV3) e do sorgo (WCFV2), ao longo do primeiro (a) e do segundo (b) ciclo das culturas.

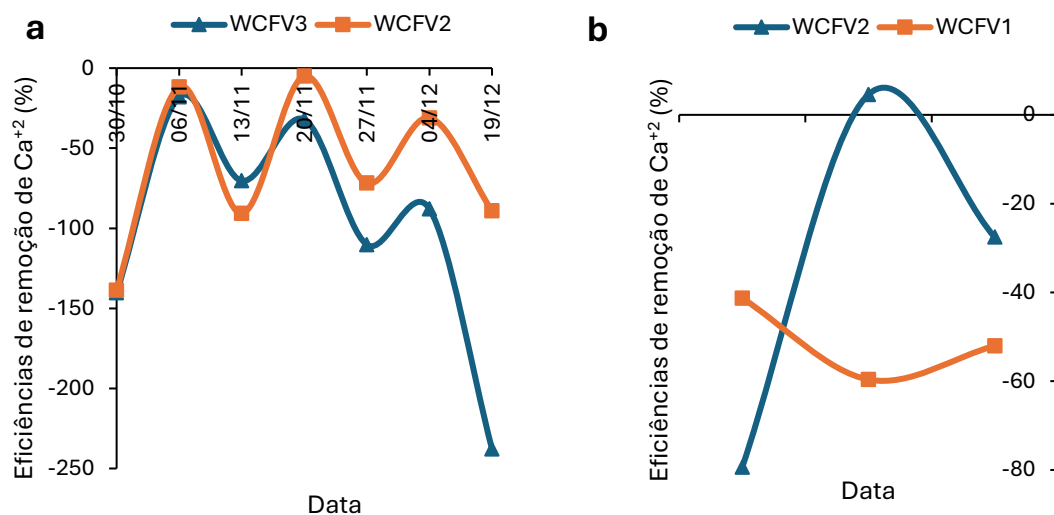


Figura 25. Remoção de Ca^{+2} (%) do efluente dos WCFV com meio suporte de solo plantado com as culturas de feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) ao longo do primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

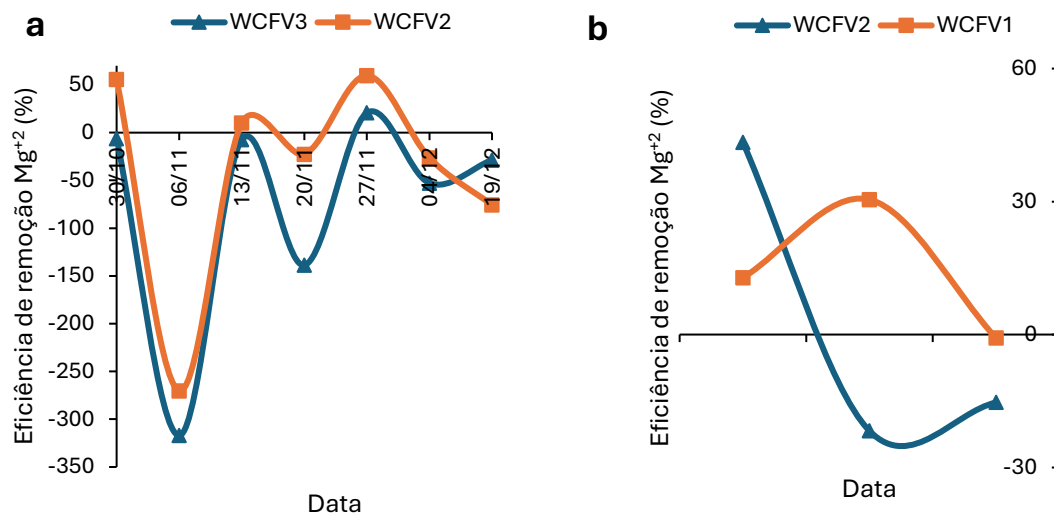


Figura 26. Remoção de Mg^{+2} (%) do efluente dos WCFV com meio suporte de solo sem fibra, plantados com as culturas de feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) ao longo do primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

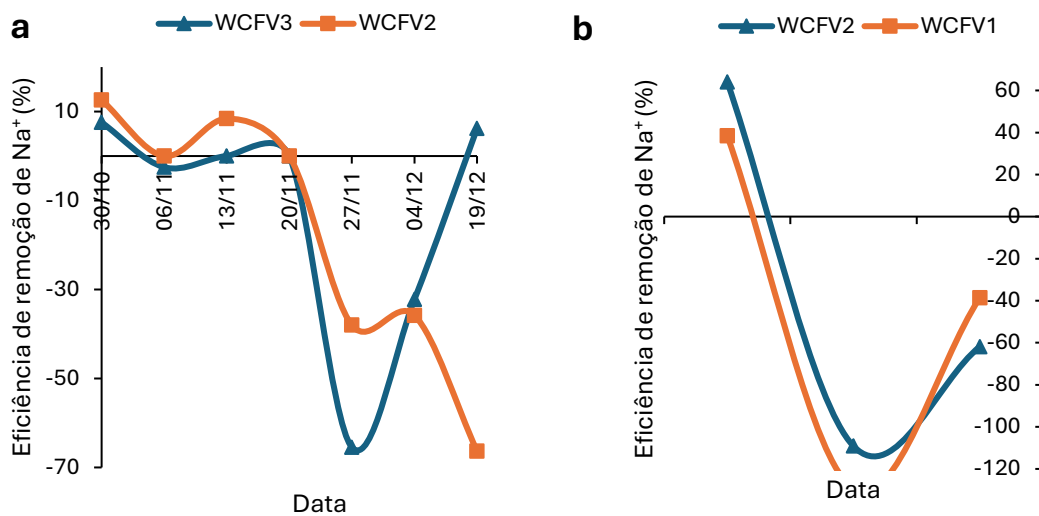


Figura 27. Remoção de Na^{+} (%) do efluente dos WCFV com meio suporte de solo sem fibra, plantados com as culturas de feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) ao longo do primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

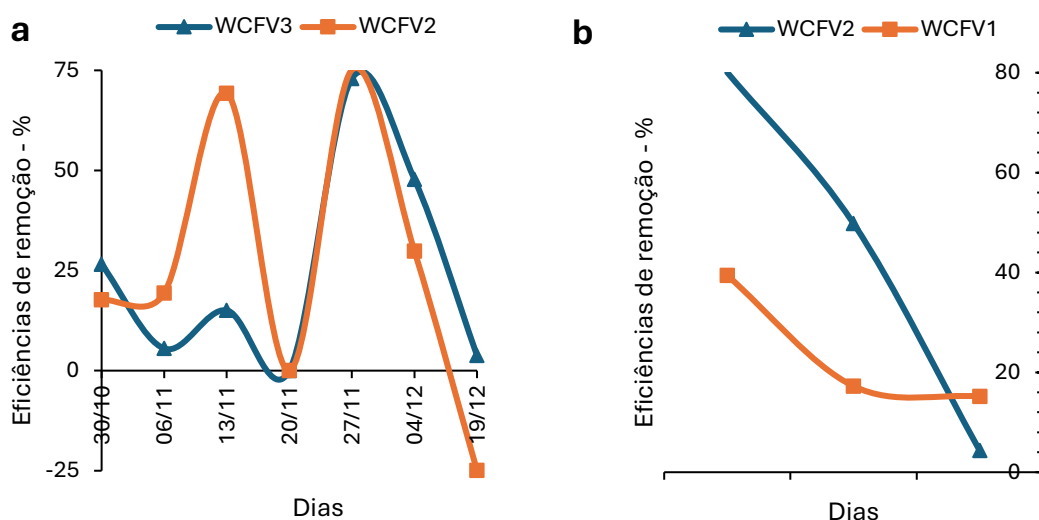


Figura 28. Remoção de K^+ (%) do efluente dos WCFV com meio suporte de solo sem fibra, plantados com as culturas de feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) ao longo do primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

Durante o primeiro ciclo, o WCFV2 (sorgo) apresentou melhor remoção de CE nas primeiras semanas. Apesar da queda a partir da quarta semana (20/11), sua média ainda superou a do WCFV3 (feijão), que teve uma queda brusca (-50%) na mesma semana, coincidindo com o período de floração e ocorrência de chuvas. Nessa fase, a alta demanda nutricional das plantas altera a dinâmica iônica, podendo reduzir a capacidade de retenção de sais pelo solo (Pavinato; Rosolem, 2008). A exsudação radicular também pode ter influenciado a composição do efluente. A redução de cátions não foi suficiente para impedir o aumento da CE, sugerindo a presença de outros íons dissolvidos oriundos do substrato ou da interação da matéria orgânica com os sais (Marques, 2017; Pavinato; Rosolem, 2008).

No segundo ciclo, ambos os sistemas apresentaram melhor desempenho. O WCFV2 (sorgo) iniciou com maior eficiência, mas apresentou queda na segunda semana, mantendo-se eficiente até o fim. O WCFV3 (feijão), por sua vez, iniciou com menor remoção, também teve queda na segunda semana, mas recuperou-se e superou o sorgo na última semana do ciclo.

As mesmas variações foram observadas nas remoções de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ (Figuras 25 a 28).

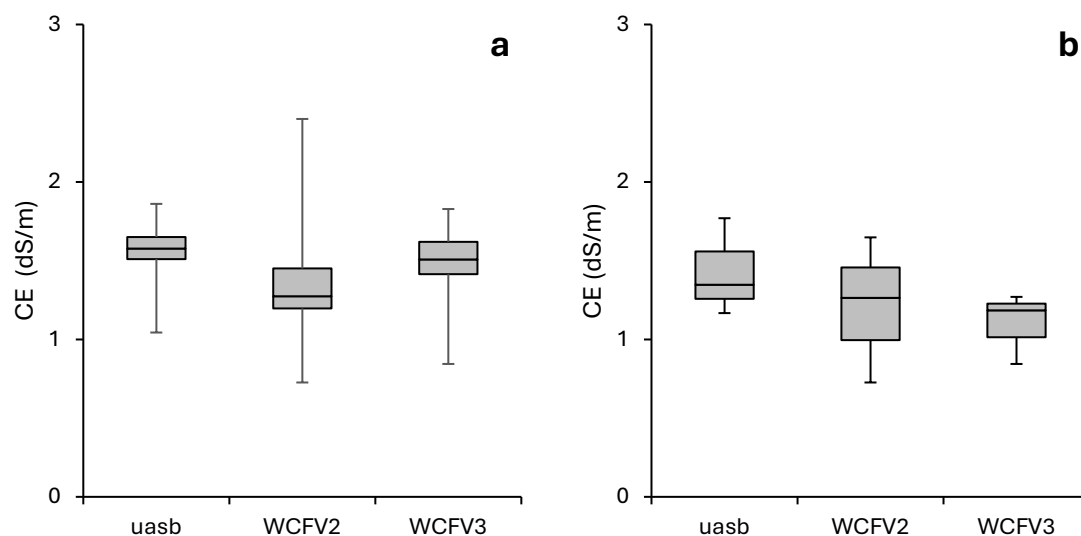


Figura 29. Gráfico *box plot* da CE (dS/cm) do afluente e do efluente dos WCFV plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

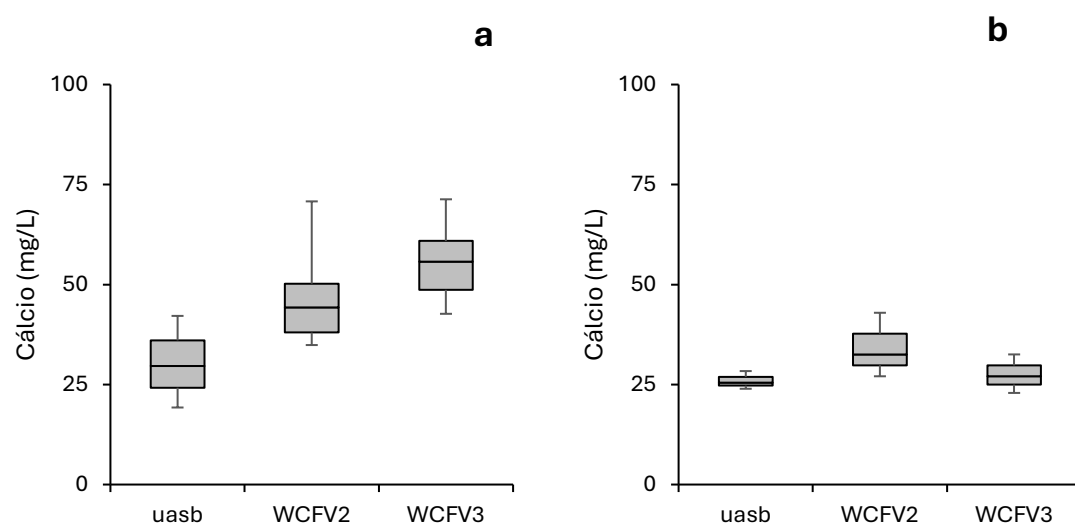


Figura 30. Gráfico *box plot* da Ca^{+2} (mg/L) do afluente e do efluente dos WCFV plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

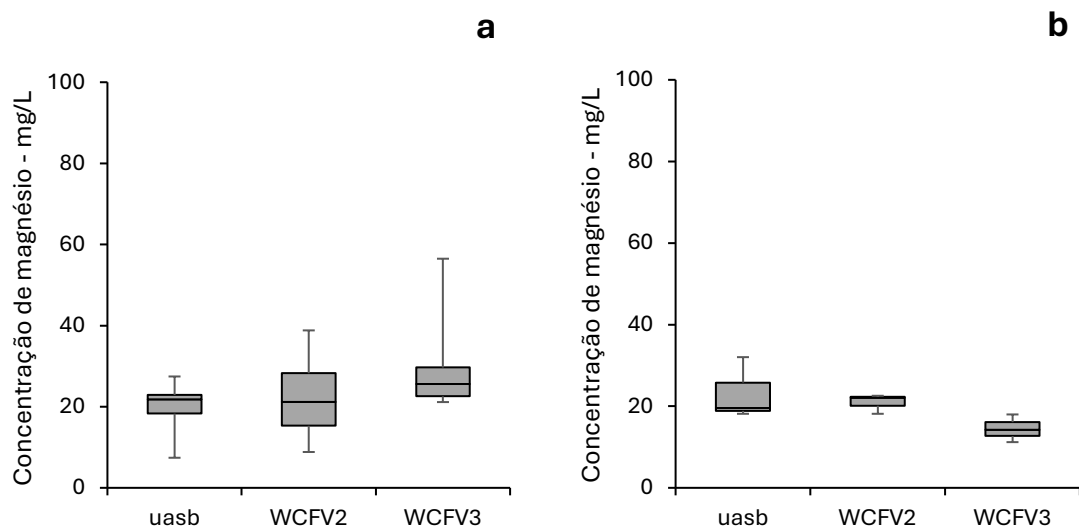


Figura 31. Gráfico *box plot* da Mg^{+2} (mg/L) do afluente e do efluente dos WCFV plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

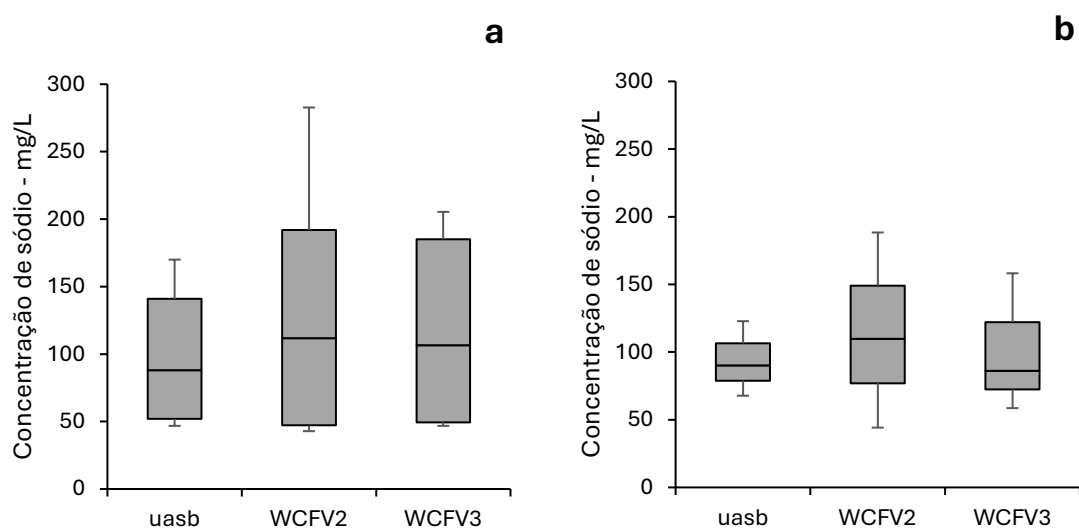


Figura 32. Gráfico *box plot* do Na^{+} (mg/L) do afluente e do efluente dos WCFV plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

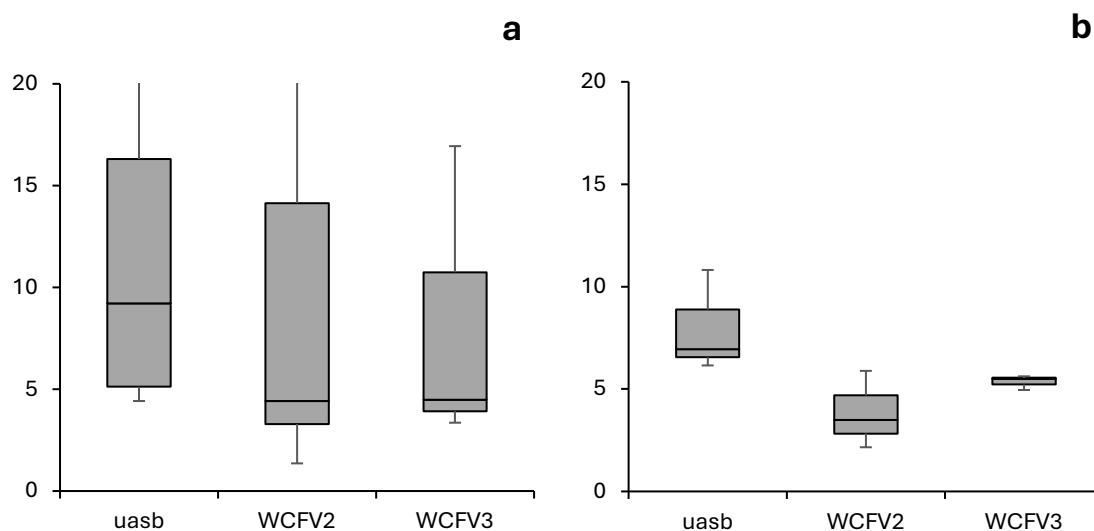


Figura 33. Gráfico box plot da K^+ (mg/L) do afluente e do efluente dos WCFV plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV2) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

No segundo ciclo (**Figura 29b**), os *box plots* revelam que o sistema plantado com feijão (WCFV3) manteve maior estabilidade na remoção de CE, evidenciada por uma mediana mais baixa e um intervalo interquartil mais estreito. Esse padrão indica um desempenho mais consistente na retenção de sais ao longo do tempo. Já o sistema com sorgo (WCFV2) apresentou uma mediana um pouco superior e maior dispersão entre os quartis, sinalizando flutuações mais acentuadas, embora com leve melhora na estabilidade em comparação ao primeiro ciclo.

Os *box plots* da **Figura 30** evidenciam que ambos os sistemas apresentaram baixa eficiência na remoção de Ca^{2+} . No primeiro ciclo (30a), o sistema com feijão mostrou mediana mais elevada e menor dispersão entre os quartis, enquanto o com sorgo apresentou maior variabilidade e valores extremos mais distantes, indicando maior instabilidade. No segundo ciclo (**Figura 30b**), as medianas se aproximaram e o WCFV3 exibiu menor amplitude interquartil, sugerindo maior estabilidade. Em contraste, o sistema com sorgo manteve maior variação entre os quartis, o que reforça a persistente instabilidade na remoção desse cátion.

A análise dos *box plots* para Mg^{2+} mostra que, no primeiro ciclo (**Figura 31a**), o sistema com sorgo teve melhor desempenho, embora com alta variabilidade, enquanto o

sistema com feijão foi menos eficiente, porém mais estável. Já no segundo ciclo (**Figuras 31b**), o feijão demonstrou melhora significativa, com medianas abaixo do afluente e menor variação interquartil, indicando maior eficiência e estabilidade. Por outro lado, o sorgo, apesar de apresentar menos variações extremas, mostrou concentrações elevadas no efluente, revelando baixa eficiência na remoção de Mg^{2+} .

Os *box plots* da **Figura 32** ilustram que, no primeiro ciclo (**Figuras 32a**), ambos os sistemas tiveram desempenho insatisfatório na remoção de Na^+ , com grandes amplitudes interquartis e valores máximos elevados. No segundo ciclo (**Figura 32b**), o sistema com feijão demonstrou maior eficiência e estabilidade, com menor variação entre os quartis, enquanto o com sorgo permaneceu instável, com ampla dispersão e medianas superiores, indicando persistente dificuldade na remoção do sódio.

6.3.2. Meio suporte com e sem fibra de coco na remoção de sais

As características dos esgotos afluente e efluente das unidades *wetlands* construídos com fibra de coco (WCFV1) e sem fibra de coco (WCFV3) no meio suporte dois ciclos operacionais podem ser observados na **Tabela 21**.

Tabela 21. Características dos esgotos afluente e efluente das unidades de *wetland* com as culturas do feijão (WCFV3) e do sorgo (WCFV2).

Parâmetro	Unidade	1º ciclo			2º ciclo		
		Afluente	Efluente		Afluente	Efluente	
			WCFV3	WCFV1		WCFV3	WCFV1
Condutividade elétrica (CE)	(dS/m)	1,58±0,01	1,51±0,01	1,36±0,01	1,35±0,01	1,18±0,00	1,26±0,00
pH	-	7,39±0,06	7,04±0,04	7,01±0,02	7,67±0,02	7,03±0,02	7,20±0,02
Cálcio (Ca^{+2})	mg/L	29,67±1,04	55,70±1,39	44,76±1,74	25,51±1,21	27,07±2,56	38,78±1,56
Magnésio (Mg^{+2})	mg/L	21,78±0,95	25,56±1,26	22,88±1,47	19,57±2,1	14,20±1,42	19,72±1,58
Sódio (Na^+)	mg/L	146,41±6,12	205,70±3,50	200,16±2,62	106,44±6,99	86,12±10,49	93,98±12,23
Potássio (K^+)	mg/L	17,61±0,67	12,81±0,22	12,68±0,31	6,95±0,53	5,49±1,15	5,75±0,44

Fonte: Elaboração Própria (2024). WCFV3 – Solo sem fibra; WCFV1 – Solo com fibra.

O pH médio do efluente nos sistemas WCFV1 (com fibra de coco) e WCFV3 (sem fibra de coco) permaneceu dentro da faixa ideal, entre 6 e 7, favorecendo as reações biológicas e o desenvolvimento das plantas (Rahman et al., 2020). Ambos os sistemas, em ambos os ciclos, apresentaram variações mínimas de pH, mantendo-se próximos à neutralidade (cerca de 7,0), dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/11 (Brasil, 2011), que permite valores entre 5 e 9 para o lançamento de efluentes em corpos hídricos, visando à proteção da biota aquática e à preservação ambiental do meio receptor.

Em relação à condutividade elétrica (CE), observou-se redução nas concentrações em ambos os sistemas ao longo dos dois ciclos. No 1º ciclo, a unidade WCFV1 apresentou maior eficiência na remoção de sais em comparação ao WCFV3. Já no 2º ciclo, a concentração de CE na WCFV1 manteve-se praticamente inalterada em relação ao primeiro ciclo, enquanto o sistema WCFV3 demonstrou melhora em seu desempenho. Essas reduções ocorreram mesmo com o aumento das concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+ nos efluentes, o que sugere que a queda na CE pode estar relacionada à remoção de outros íons condutores de eletricidade.

Como discutido anteriormente, os efluentes tratados nas unidades WCFV podem ser utilizados para irrigação sem restrições quanto à salinidade e às concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ , estando dentro dos limites recomendados por Almeida (2010).

O melhor desempenho observado foi na remoção de potássio (K^+), com ambos os sistemas apresentando eficiências semelhantes, indicando que a presença da fibra de coco não interferiu significativamente nesse processo (**Tabela 21**).

Por outro lado, tanto o WCFV1 quanto o WCFV3 demonstraram baixa eficiência na remoção de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), conforme demonstrado na **Tabela 21**. Essa ineficiência pode estar relacionada à lixiviação de íons presentes inicialmente no solo antes da aplicação dos efluentes. No segundo ciclo, essa lixiviação foi reduzida, e observou-se aumento nas concentrações desses cátions no solo, sugerindo uma maior retenção (**Tabelas 17 e 18**).

O aumento das concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo e no efluente no segundo ciclo pode estar associado à redução da matéria orgânica do solo. Segundo Pavinato e Rosolem (2008), a decomposição da matéria orgânica libera cátions trocáveis, como Ca^{2+} e Mg^{2+} , para a solução do solo. Os processos de mineralização dos resíduos orgânicos aumentam a

disponibilidade desses nutrientes, o que foi evidenciado no segundo ciclo (**Tabelas 17 a 20**), em que a redução da matéria orgânica (**Tabelas 19 e 20**) coincidiu com o aumento das concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo e nos efluentes.

A lixiviação desses cátions pode também estar relacionada à acidez do solo. O pH manteve-se estável durante o primeiro ciclo e apresentou um leve aumento no segundo ciclo, passando de 5,3 para 5,5 (**Tabelas 19 e 20**). Em solos ácidos, a elevada presença de ânions pode gerar uma carga líquida negativa, intensificando a lixiviação de cátions como Na^+ e K^+ . Além disso, solos com pH ácido tendem a reter menos cátions como Ca^{2+} e Mg^{2+} , comprometendo a fertilidade e a disponibilidade de nutrientes essenciais às plantas. Para uma fertilização eficiente, é desejável que o pH do solo seja mais elevado, a fim de melhorar sua capacidade de retenção de cátions e, conseqüentemente, sua estrutura e fertilidade, por meio da neutralização da acidez e do aumento na retenção de nutrientes (Cosme, 2024; Silva et al., 2021).

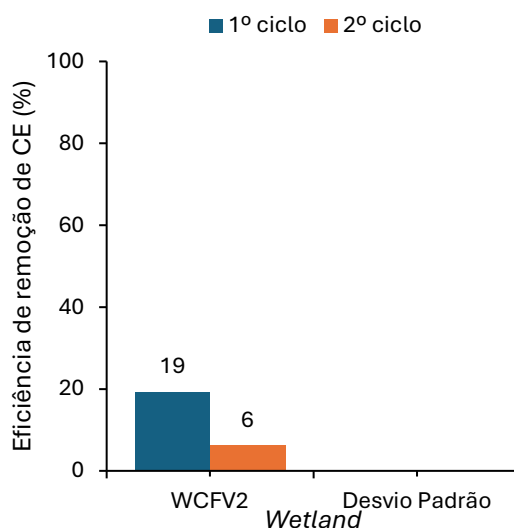


Figura 34. Eficiências médias de remoção (%) da condutividade elétrica (CE) pelos WCFV com meio suporte sem fibra (WCFV3) e com fibra (WCFV2), no primeiro e segundo ciclos das culturas.

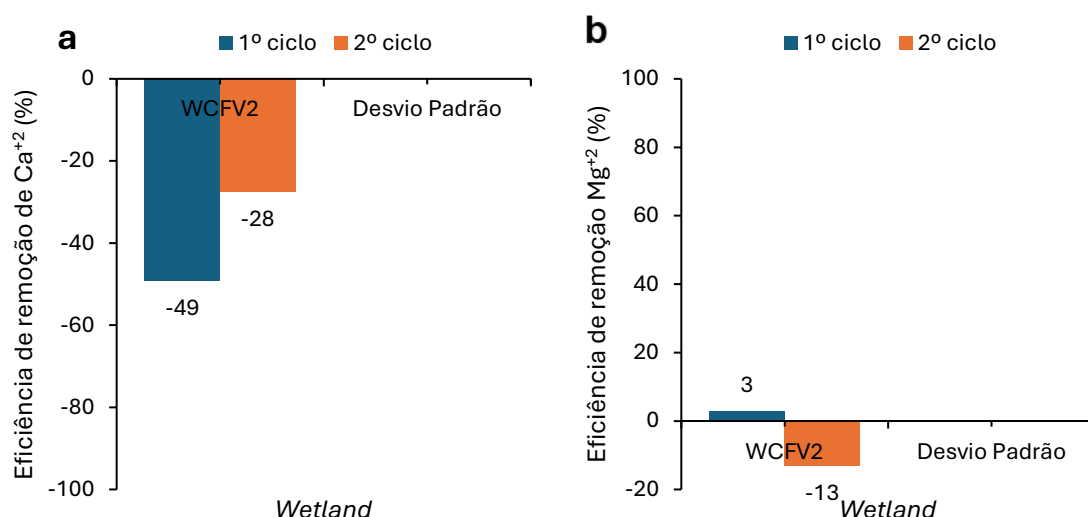


Figura 35. Eficiências médias de remoção (%) de Ca^{+2} (a) e Mg^{+2} (b) pelos WCFV com meio suporte sem fibra (WCFV3) e com fibra (WCFV1), no primeiro e segundo ciclos.

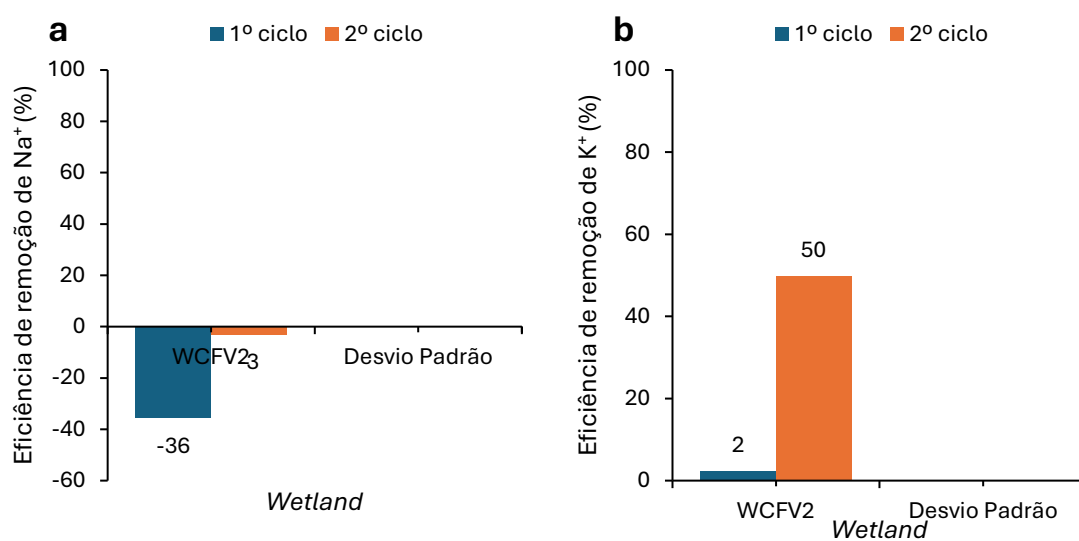


Figura 36. Eficiências médias e remoção (%) de Na^{+} (a) e K^{+} (b) nos WCFV com meio suporte sem fibra (WCFV3) e com fibra (WCFV1), no primeiro e no segundo ciclo.

A eficiência de remoção da condutividade elétrica (CE) nos sistemas WCFV1 (com fibra de coco) e WCFV3 (sem fibra de coco) foi semelhante, mas apresentou variações entre

os ciclos. No primeiro ciclo, o WCFV3 alcançou eficiência de 4%, enquanto no segundo obteve 12%. Já o WCFV1 apresentou 14% no primeiro ciclo e 7% no segundo (Figura 34). Silva et al. (2018) investigaram a remoção de sais em wetlands construídos com meio suporte de solo (Latosolo Vermelho-Amarelo) misturado com areia média e plantado com arroz irrigado (*Oryza sativa* L.) para o tratamento de esgoto doméstico. Os sistemas avaliados por esses autores alcançaram eficiências de remoção entre 35,52% e 30,03% no primeiro ciclo, e entre 10,99% e 15,23% no segundo, destacando, no entanto, que frequentemente esses sistemas aumentam a salinidade do efluente.

As eficiências de remoção de Ca^{2+} e Mg^{2+} pelos WCFV plantados com feijão (WCFV3) e sorgo (WCFV1) são apresentadas na Figura 35. Como mostrado na Figura 35a, ambos os sistemas foram ineficientes na remoção de Ca^{2+} . No WCFV3, houve aumento da concentração desse cátion no primeiro ciclo, com eficiência de -88%. No segundo ciclo, a ineficiência foi reduzida para -6%, indicando leve melhora. Por sua vez, o WCFV1 manteve um desempenho uniforme e ineficiente nos dois ciclos, com valores de -51% e -52%, respectivamente.

Em relação ao Mg^{2+} (Figura 35b), observou-se comportamento distinto. No primeiro ciclo, ambos os sistemas foram ineficientes, mas o WCFV1 demonstrou desempenho ligeiramente superior ao WCFV3. No segundo ciclo, o WCFV3 apresentou eficiência de 27%, enquanto o WCFV1, embora tenha melhorado em relação ao ciclo anterior, continuou liberando Mg^{2+} no efluente. Meira (2004) também observou, em wetlands construídos, aumento nas concentrações de Ca^{2+} entre 33% e 132%, e de Mg^{2+} entre 34% e 120%.

As eficiências de remoção de Na^+ e K^+ pelos mesmos sistemas podem ser observadas na Figura 36. Ambos os sistemas apresentaram desempenhos semelhantes na remoção de Na^+ ao longo dos dois ciclos. No primeiro, mostraram-se ineficientes, com valores de -32% (WCFV3) e -37% (WCFV1). No segundo ciclo, houve inversão desse comportamento, com eficiências positivas de 19% para o WCFV3 e 12% para o WCFV1, indicando melhor desempenho do sistema sem fibra (Figura 36a).

No caso do K^+ , os sistemas apresentaram eficiências semelhantes no primeiro ciclo, mas ambos mostraram redução no segundo, sendo a queda mais acentuada no WCFV1 (Figura 36b). Esses resultados sugerem tendência de diminuição na remoção de K^+ , mais pronunciada no sistema com fibra de coco.

Apesar do aumento na concentração de alguns cátions, observou-se redução na CE dos efluentes em ambos os sistemas, o que pode ser atribuído à remoção de outros sais que também contribuem para a condutividade elétrica, como o próprio K^+ .

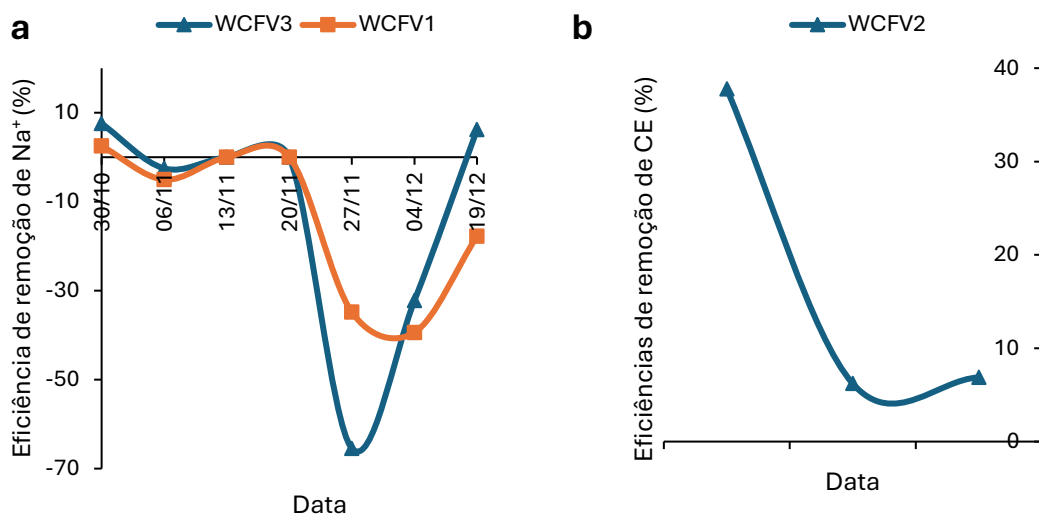


Figura 37. Remoção de CE (%) dos efluentes das unidades WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3), ao longo do primeiro (a) e do segundo (b) ciclo das culturas.

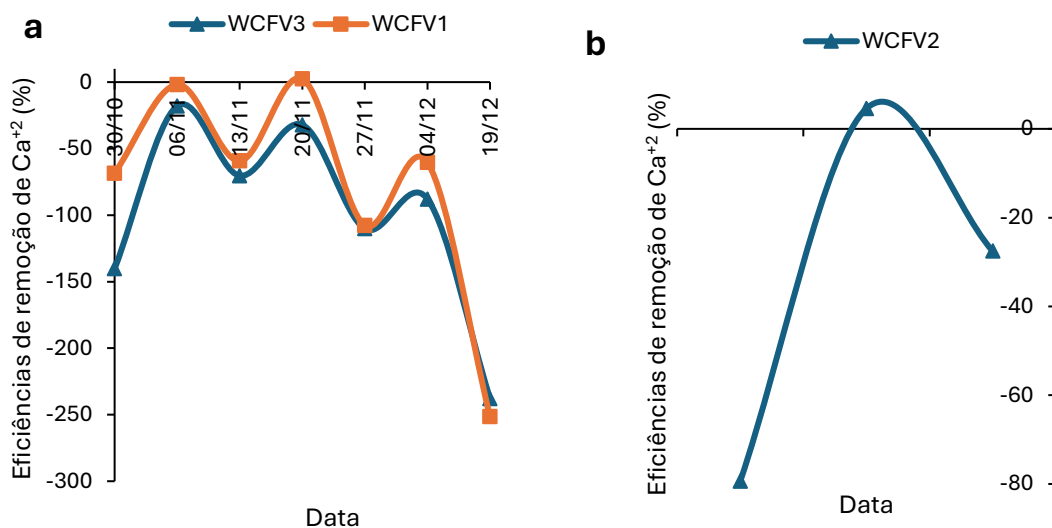


Figura 38. Remoção de Ca^{+2} (%) do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV2), ao longo do primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

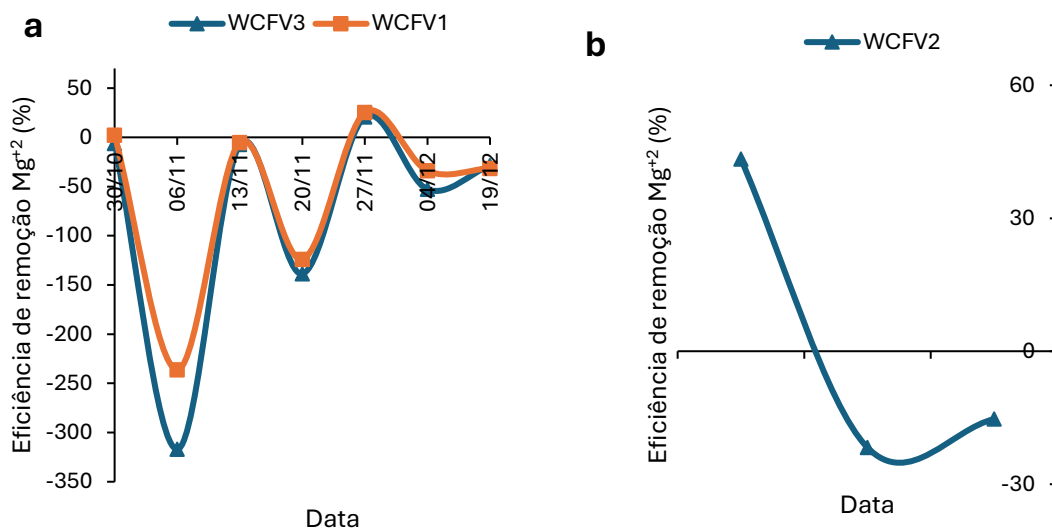


Figura 39. Remoção de Mg^{+2} (%) do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3), ao longo do primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

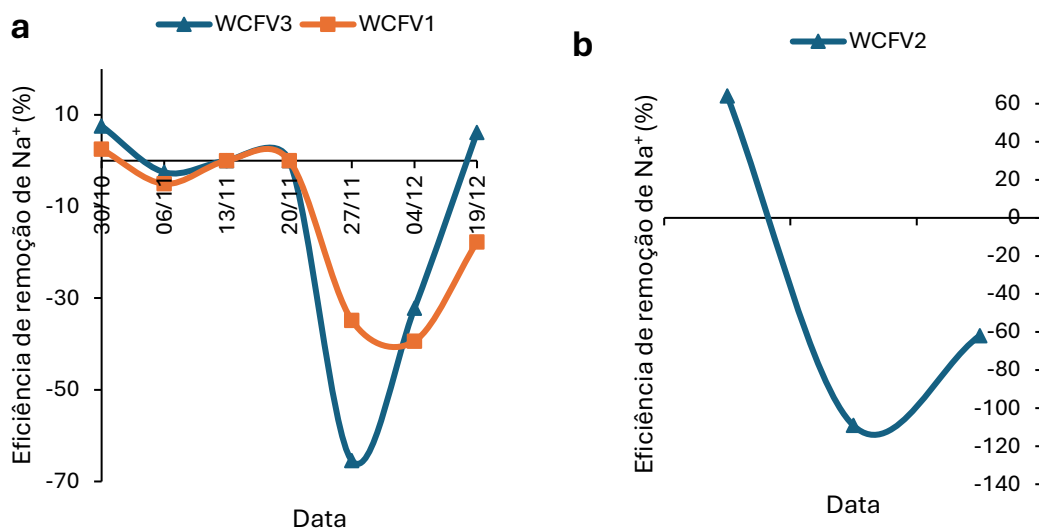


Figura 40. Remoção de Na^{+} (%) do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3), ao longo do primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

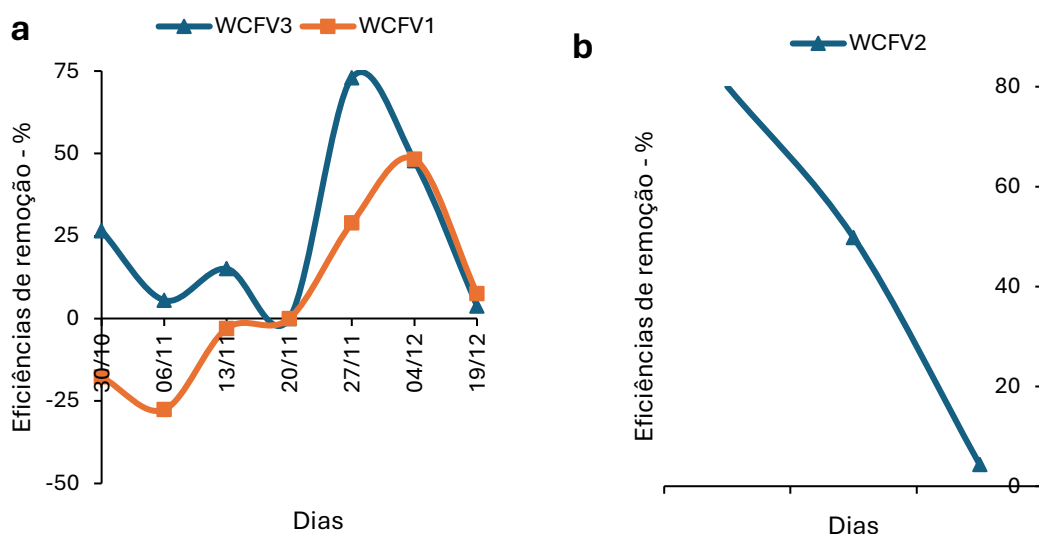


Figura 41. Remoção de K^+ (%) do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3), ao longo do primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

No primeiro ciclo, os comportamentos dos sistemas foram semelhantes, com a unidade WCFV1 (com fibra) apresentando uma remoção de CE (**Figura 37a**) superior à unidade WCFV3 (sem fibra) até a penúltima semana do ciclo, quando o WCFV3 ultrapassou o WCFV1 e finalizou o ciclo com uma eficiência melhor. Ambos os sistemas sofreram uma queda acentuada na semana de 20 de novembro, coincidindo com o período de floração das culturas e com as chuvas registradas na semana anterior. Essa redução pode estar relacionada ao aumento da exsudação radicular, que altera a dinâmica iônica do sistema, diminuindo temporariamente a capacidade de retenção de sais no meio suporte, como descrito por Pavinato e Rosolem (2008).

Assim como no primeiro ciclo, os sistemas apresentaram comportamentos semelhantes no segundo ciclo (**Figura 37b**). Ambas as unidades foram eficientes na remoção de CE, iniciando o ciclo com desempenho superior, mas apresentaram redução ao longo do tempo. Durante a maior parte do ciclo, o WCFV3 teve eficiência superior, sendo superado pelo WCFV1 apenas na última quinzena.

No primeiro ciclo, tanto para o Ca^{2+} quanto para o Mg^{2+} , as unidades WCFV3 e WCFV1 se comportaram de forma semelhante ao longo do ciclo, com o WCFV1 apresentando melhor desempenho na maior parte do período. Em relação ao Ca^{2+} (**Figura**

38a), ambas as unidades foram ineficientes, com lixiviação acentuada na última semana, atingindo -238% para o WCFV3 e -251% para o WCFV1. No segundo ciclo (**Figura 38b**), os resultados foram mais equilibrados. O WCFV3 apresentou remoção eficiente durante boa parte do ciclo, atingindo 5%, mas terminou com -6%. Já o WCFV1 foi ineficiente ao longo de todo o período, com -60% no final. Esse comportamento indica que a fibra de coco não favoreceu a retenção de Ca^{2+} .

Em relação ao Mg^{2+} (**Figura 39**), o primeiro ciclo seguiu padrão semelhante ao do Ca^{2+} . No segundo ciclo, ambos os sistemas iniciaram com boa eficiência na remoção, com destaque para o WCFV3, que atingiu 59%. Contudo, essa eficiência caiu progressivamente, encerrando com 8%. O WCFV1 iniciou com 13%, melhorou até 30% no meio do ciclo, mas terminou de forma ineficiente (-1%).

A remoção de Na^+ (**Figura 40a**) no primeiro ciclo foi variável. Ambos os sistemas começaram com eficiências próximas de 0%, mas o WCFV3 apresentou maior lixiviação (-65%) a partir da quarta semana. O WCFV1 também apresentou queda, atingindo -39%, porém com menor magnitude. Esse comportamento pode ser relacionado ao aumento da exsudação radicular na floração, que favorece a liberação de Na^+ no efluente, conforme descrito por Pavinato e Rosolem (2008). No segundo ciclo (**Figura 40b**), os dois sistemas começaram com boas eficiências (52% para o WCFV3 e 38% para o WCFV1), mas sofreram queda progressiva, chegando a -76% e -130%, respectivamente.

Na remoção de K^+ (**Figura 41a**), o WCFV1 iniciou de forma ineficiente (-28%), mas apresentou melhora contínua, finalizando de forma eficiente com média de 28%. O WCFV3 teve desempenho consistente durante todo o ciclo, alcançando pico de 73%. No segundo ciclo (**Figura 41b**), ambos os sistemas apresentaram comportamentos semelhantes, com o WCFV3 iniciando com 54% e finalizando com 11%, enquanto o WCFV1 começou com 39% e terminou com 15%.

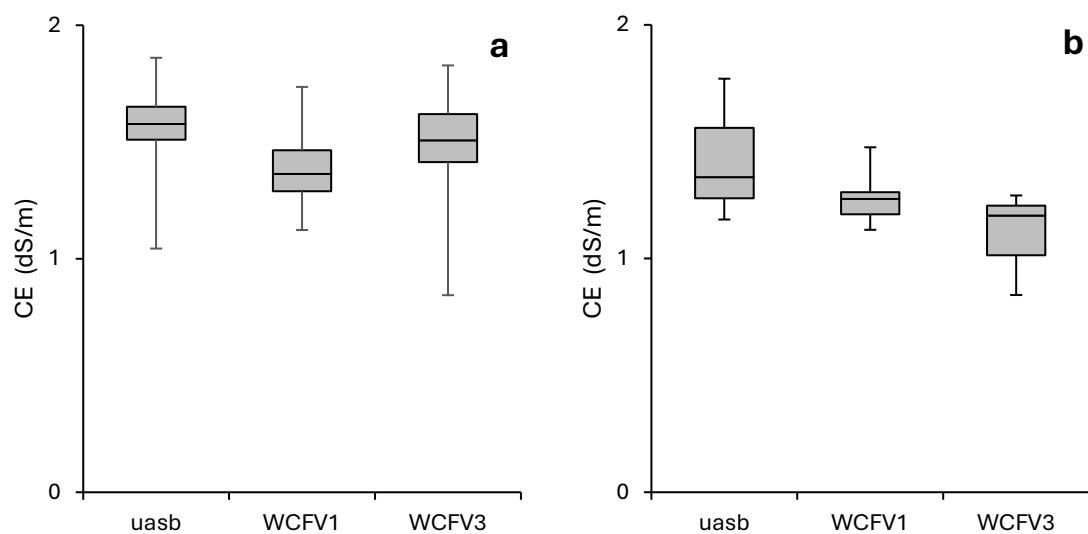


Figura 42. Gráfico *box plot* da CE (dS/cm) do afluente e do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

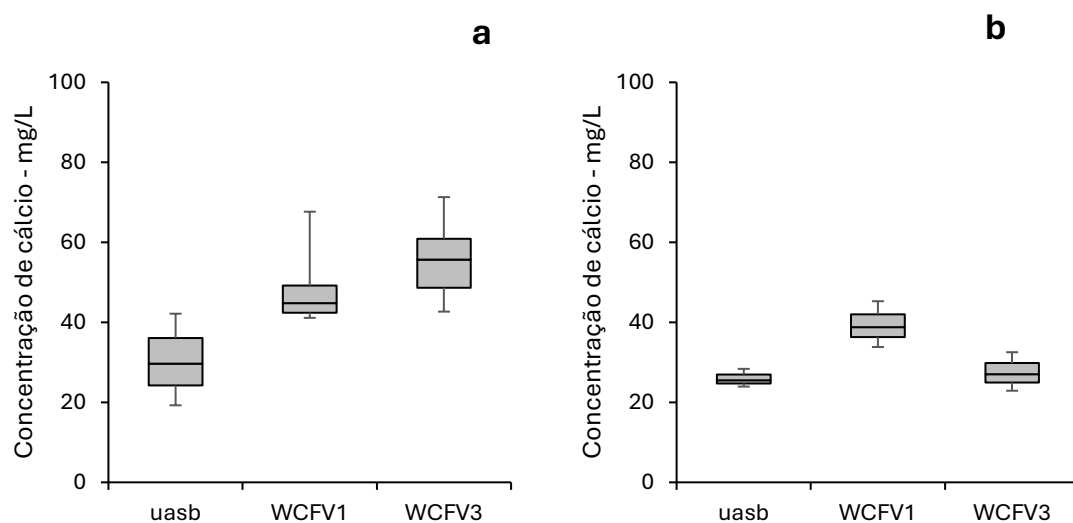


Figura 43. Gráfico *box plot* da Ca^{+2} (mg/L) do afluente e do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

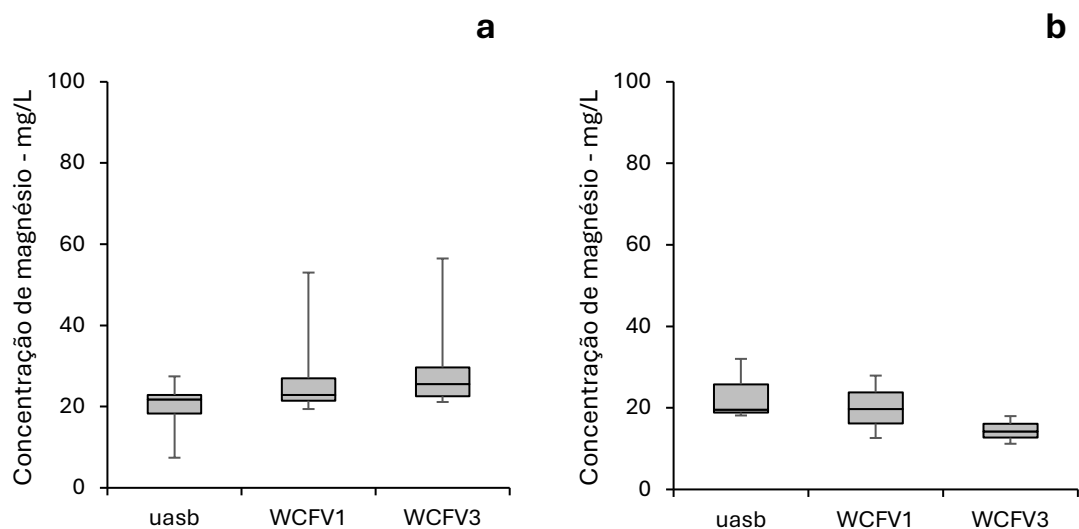


Figura 44. Gráfico *box plot* da Mg^{+2} (mg/L) do afluente e do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

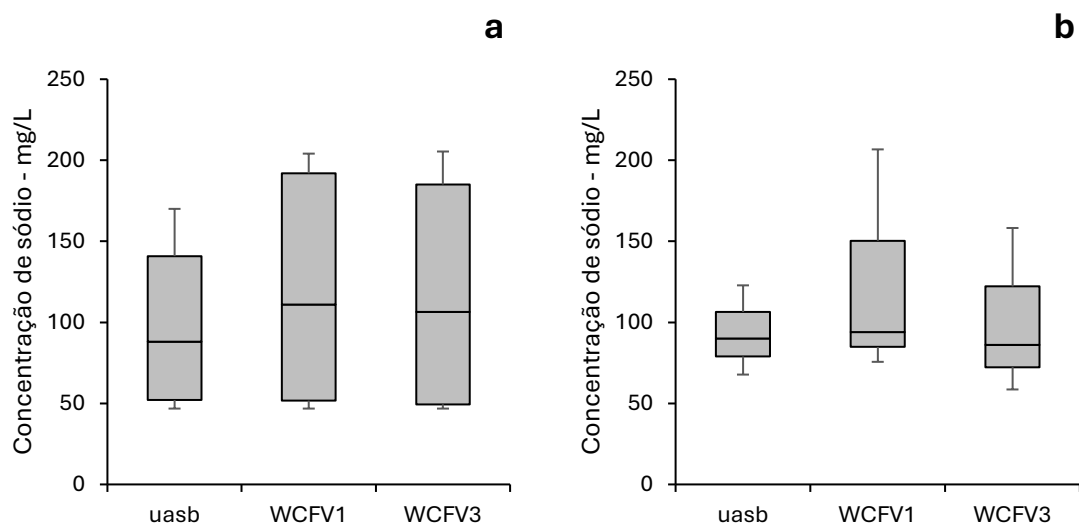


Figura 45. Gráfico *box plot* do Na^{+} (mg/L) do afluente e do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

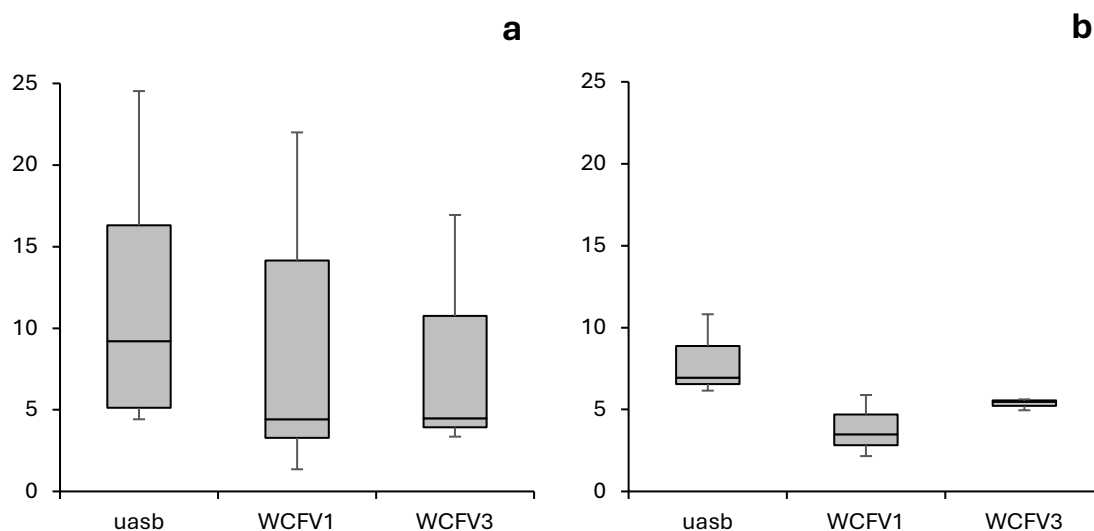


Figura 46. Gráfico *box plot* da K^+ (mg/L) do afluente e do efluente dos WCFV com meio suporte com fibra (WCFV1) e sem fibra (WCFV3) no primeiro (a) e segundo (b) ciclo das culturas.

A análise dos *box plots* de remoção de CE (**Figura 42a**) no primeiro ciclo mostra que o WCFV1 apresentou menor variação nos dados, indicando maior estabilidade na eficiência do sistema. A mediana foi ligeiramente mais baixa em comparação ao WCFV3, que exibiu maior dispersão nos dados e maior amplitude interquartílica, sugerindo maior instabilidade ao longo do ciclo. Essa diferença pode estar associada à presença da fibra de coco, que contribui para uma retenção de sais mais constante no meio suporte.

No segundo ciclo (**Figura 42b**), os *boxplots* revelam um comportamento inverso: a mediana do WCFV3 foi mais baixa, indicando maior eficiência na remoção de CE, enquanto o WCFV1 apresentou valores medianos mais altos. No entanto, a dispersão dos dados do WCFV3 foi significativamente maior, com presença de outliers, sugerindo variações mais bruscas na eficiência. Já o WCFV1 manteve um desempenho mais uniforme, com menor amplitude de variação. Esses resultados reforçam que, embora a fibra de coco não tenha proporcionado a maior eficiência média, contribuiu para um desempenho mais estável e previsível.

A análise dos *boxplots* para o Ca^{2+} (**Figura 43a**) no primeiro ciclo evidencia que o sistema WCFV3 apresentou valores mais elevados de concentração de Ca^{2+} no efluente, com maior dispersão e mediana mais alta, enquanto o WCFV1 manteve valores mais baixos e menor amplitude. Isso sugere que, apesar da ineficiência geral na remoção, o sistema com

fibra de coco apresentou menor lixiviação desse cátion. No entanto, os resultados ainda indicam que nenhum dos sistemas foi eficaz na retenção do Ca^{2+} , sendo necessária a consideração de outras estratégias de retenção iônica.

6.4. SALINIZAÇÃO E SODIFICAÇÃO DOS SOLOS

Os resultados obtidos nas análises físico-químicas do solo demonstraram que a aplicação de efluentes em dois ciclos das culturas do feijão e do sorgo não causou salinização nem sodificação dos solos das unidades experimentais. Observa-se que os solos do WCFV3, plantado com feijão, mantiveram a Razão de Adsorção de Sódio (RAS) igual à do solo antes da aplicação dos efluentes (**Tabela 22**).

O valor crítico de RAS é considerado abaixo de 13; acima desse valor, pode ocorrer salinização e toxidez de sódio, prejudicando o desenvolvimento das plantas (Fageria; Baligar; Jones, 2011). Portanto, os valores de RAS dos solos utilizados como meios suporte dos WCFV estão distantes desse limite (**Tabela 22**).

Tabela 22. Concentrações de sais nas camadas de 0-5 cm dos solos da unidade WCFV3, plantado com a cultura do feijão, antes e após a aplicação dos efluentes para tratamento no final do 1º e 2º ciclos da cultura.

Parâmetro	Unidade	Média ± desvio padrão		
		Antes da aplicação do efluente	Após aplicação do efluente	
			1º ciclo	2º ciclo
Potássio (K^+)	cmol/dm^3	0,07±0,00	0,07±0,01	0,10±0,05
Calcio (Ca^{+2})		1,01±0,18	0,67±0,22	1,17±0,27
Magnésio (Mg^{+2})		0,42±0,04	0,42±0,03	0,47±0,22
Sódio (Na^+)		0,07±0,00	0,06±0,02	0,07±0,01
RAS	cmol/dm^3	0,08±0,00	0,08±0,01	0,08±0,02

Fonte: Elaboração própria (2024).

Nos WCFV2, plantados com a cultura do sorgo, a RAS da camada de 0-5 cm dos solos reduziu no primeiro ciclo e, no final do segundo ciclo, não atingiu o valor inicial do

solo antes da aplicação dos esgotos para tratamento (**Tabela 23**). Essa dinâmica indica que a aplicação de esgoto, embora tenha causado um impacto inicial na qualidade do solo, não levou a uma salinização persistente a longo prazo. A manutenção de baixos valores de RAS sugere que os processos de lixiviação e diluição podem ter sido suficientes para evitar o acúmulo de sódio, enquanto a dinâmica entre os cátions presentes pode ter sido influenciada pela adição de nutrientes por meio do esgoto.

Tabela 23. Concentrações de sais nas camadas de 0-5 cm dos solos da unidade WCFV2 plantados com a cultura do sorgo, antes e após a aplicação dos esgotos para tratamento no final do 1º e 2º ciclos da cultura.

Parâmetro	Unidade	Média ± desvio padrão		
		Solo utilizado	1º ciclo	2º ciclo
Potássio (K^+)	cmol/dm ³	0,07±0,00	0,08±0,00	0,06±0,00
Calcio (Ca^{+2})		1,01±0,18	0,75±0,03	1,15±0,20
Magnésio (Mg^{+2})		0,42±0,04	0,51±0,01	0,65±0,03
Sódio (Na^+)		0,07±0,00	0,05±0,00	0,07±0,00
RAS	cmol/dm ³	0,08±0,00	0,06±0,00	0,07±0,01

Fonte: Elaboração própria (2024).

No primeiro ciclo, os dados indicam uma redução inicial na concentração de Ca^{2+} e Mg^{2+} na camada de 0-5 cm dos solos dos WCFV3 e WCFV2 (**Tabelas 22 e 23**). Isso ocorreu em função da lixiviação desses íons para o efluente tratado. No segundo ciclo, a lixiviação foi menor (**Tabela 16**) e iniciou-se o acúmulo de Ca^{2+} e Mg^{2+} nos solos (**Tabelas 22 e 23**), indicando o início do processo de fertilização do solo.

Em solos férteis, o Ca^{2+} deve estar presente em concentrações adequadas para garantir o bom desenvolvimento das plantas. Concentrações de cálcio acima de 25% da capacidade de troca catiônica podem causar desequilíbrios nutricionais, prejudicando a absorção de outros nutrientes, como K^+ e Mg^{2+} , afetando o crescimento das plantas e comprometendo a saúde do solo. O excesso de Ca^{2+} pode também interferir na estrutura do solo, reduzindo a disponibilidade de água e aumentando os riscos de salinização (Fageria; Baligar; Jones, 2011; Machado, 2024).

No final do primeiro ciclo, a concentração de Mg^{2+} na camada de 0-5 cm do WCFV3, plantado com feijão, alcançou o valor inicial do solo antes da aplicação dos esgotos para tratamento. No segundo ciclo, o aumento foi observado nos solos dos dois WCFV, sendo maior no WCFV2.

O WCFV3 (feijão) acumulou mais K^+ nas camadas de 0-5 cm do solo que o WCFV2 (sorgo) (Tabelas 22 e 23), possivelmente devido à maior lixiviação ocorrida no WCFV2 (Tabela 16), proporcionada pelo aumento da condutividade hidráulica do solo pelas raízes do sorgo. Isso resultou na redução das concentrações de K^+ na referida camada do solo no segundo ciclo (Tabela 23).

Assim como ocorreu com os outros cátions, o Na^+ que existia no solo das unidades WCFV3 e WCFV2 antes da aplicação do esgoto foi lixiviado e, com a aplicação dos esgotos, voltou a aumentar, alcançando o seu valor inicial no final do segundo ciclo.

6.5. COLMATAÇÃO

Os dados apresentados na Tabela 22 evidenciam pequenas variações na condutividade hidráulica ao longo dos ciclos de operação, refletindo a influência do tipo de cultura e do meio suporte. Essas variações são indicativas do processo de colmatação, um fenômeno bem recorrente em *wetlands* construídos (Freitas, 2003; Pucher. Langergrader, 2019). Os valores de condutividade hidráulica observados neste estudo estão em conformidade com aquele esperado para *wetlands* construídos que varia de $1,04 \times 10^{-3}$ cm/s a $1,70 \times 10^{-1}$ cm/s, dependendo das características do meio suporte, fluxo de água e compactação do solo (Correia, 2016).

Tabela 24. Valores médios de condutividade hidráulica (K) dos solos das unidades de WCFV no fim do primeiro e segundo ciclo

Wetland	Unidade	Condutividade hidráulica (K)	
		1º ciclo	2º ciclo
WCFV1	(cm/s)	$2,88 \times 10^{-3}$	$2,64 \times 10^{-3}$
WCFV2		$4,43 \times 10^{-3}$	$3,93 \times 10^{-3}$
WCFV3		$3,35 \times 10^{-3}$	$1,00 \times 10^{-3}$
Antes da aplicação do esgoto	(cm/s)	$1,98 \times 10^{-3}$	

Fonte: Elaboração Própria (2024). WCFV3 – Solo sem fibra de coco plantado com feijão; WCFV2 – Solo plantado com sorgo; WCFV1 – Solo com fibra de coco plantado com Feijão.

De modo geral, observou-se que houve um aumento na K no fim do primeiro ciclo em relação à antes do início de operação do sistema nos três sistemas e uma redução desses valores no fim do segundo ciclo. Contudo, os sistemas apresentaram comportamentos distintos devido à presença ou ausência de fibra de coco, bem como às diferenças entre as espécies vegetais utilizadas.

O sistema WCFV1 apresentou uma menor variação da K entre o primeiro e segundo ciclo, sugerindo que a presença da fibra de coco auxiliou na manutenção da porosidade do solo e retardou o processo de colmatção, corroborando os achados de Favretto *et al.* (2018) e Matos *et al.*, (2015).

O sistema WCFV2 apresentou a maior K ao longo dos ciclos, indicando uma maior resistência à colmatção, provavelmente devido às características do sistema radicular, que favorecem a manutenção da porosidade e melhor aeração do substrato. Esses fatores estão de acordo com Pucher e Langergraber (2019), que apontam a vegetação como um elemento crucial para mitigar os efeitos da colmatção.

Por outro lado, o sistema WCFV3, sem fibra de coco e plantado com feijão, apresentou a maior redução na condutividade hidráulica, indicando que a ausência de um substrato estruturante acelerou o processo de colmatção. Essa observação corrobora os estudos de Favretto *et al.* (2018) e Matos *et al.*, (2015), que enfatizam a importância de substratos adequados para reduzir os impactos do entupimento físico e biológico em sistemas de fluxo vertical. A menor resistência à colmatção do sistema WCFV3 pode ser explicada pela menor capacidade das raízes do feijão em manter a estrutura do solo, em comparação com as raízes do sorgo. Além disso, a ausência de um material estruturante como a fibra de coco pode ter contribuído para uma maior compactação do solo e um acúmulo mais rápido de sólidos nos poros.

Os resultados obtidos neste estudo divergem daqueles encontrados por Silva (2007), que observou uma redução contínua e acentuada na condutividade hidráulica ao longo do tempo, com ciclos operacionais mais longos (5 meses no primeiro ciclo e 4 meses no segundo) e utilizando a cultura do arroz. De maneira semelhante, Silva, Ramos e Bernardes (2021) também relataram uma queda expressiva na condutividade hidráulica em sistemas de

wetlands construídos. Em contraste, no presente estudo, verificou-se um aumento inicial da K no fim do primeiro ciclo, seguido por uma redução no segundo ciclo, possivelmente devido aos tempos operacionais mais curtos (70 dias e 28 dias, respectivamente) e às características específicas das culturas e meios suporte utilizados. Este comportamento indica que a colmatação no sistema está em estágio inicial, e, considerando a tendência de redução da K observada no segundo ciclo, é provável que o valor continue a diminuir à medida que o tempo de operação se prolongue, resultando em uma intensificação do processo de colmatação, como relatado por Silva (2007) e Silva, Ramos e Bernardes (2021).

7. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstram que os *wetlands* construídos de fluxo vertical (WCFV) com meio suporte de solo e fibra de coco apresentam potencial para o tratamento de esgotos domésticos, especialmente na remoção de cor e turbidez. O uso da fibra de coco como parte do meio suporte mostrou-se vantajoso, melhorando a estabilidade do sistema e mantendo eficiências de remoção de cor (58,09%) e turbidez (42,05%) mesmo no segundo ciclo operacional.

As culturas de feijão e sorgo influenciaram diferentemente o desempenho dos sistemas. O feijão destacou-se na remoção de cor (61% no primeiro ciclo) e turbidez (73% no primeiro ciclo), enquanto o sorgo foi mais eficaz na redução da condutividade elétrica (19% no primeiro ciclo) e potássio (50% no segundo ciclo). No entanto, ambos os sistemas apresentaram limitações na remoção de cálcio e magnésio, com aumentos significativos nas concentrações nos efluentes.

A análise da salinização e sodificação dos solos indicou que a aplicação contínua de esgoto não comprometeu a qualidade do solo, com valores de RAS (0,08 cmol/dm³). A condutividade hidráulica do solo manteve-se estável, sem evidências de colmatação severa.

Em síntese, os WCFV são uma alternativa promissora para o tratamento de esgotos em regiões com recursos limitados, especialmente quando combinados com fibra de coco e culturas produtivas como feijão e sorgo. Recomenda-se a realização de estudos complementares para avaliar o desempenho em longo prazo, a viabilidade econômica e a adaptação a diferentes condições climáticas e operacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, A. S.; FONSECA, N. C.; SANTOS, R. V.; MEDEIROS, W. P. Atributos químicos em solo salino-sódico e efeito do ácido sulfúrico no crescimento da *Prosopis juliflora*. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 61, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.22491/rca.2018.2811>.

ALMEIDA, O. A. **Qualidade da água de irrigação**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2010. 234 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/803048>. Acesso em: 9 jan. 2025.

ALMEIDA, R. DE A.; OLIVEIRA, L. F. C. DE; KLIEMANN, H. J. Eficiência de espécies vegetais na purificação de esgoto sanitário. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia v. 37, n. 1, p. 1–9, 2007. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/pat/article/view/1839>. Acesso em: 9 jan. 2025.

APHA; AWWA; WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 24th ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2023.

ARAÚJO, E. D.; CUNHA, F. F.; FERREIRA, L. B.; BORGES, A; C. Desempenho morfofisiológico do feijão-caupi fertirrigado com esgoto sanitário em diferentes profundidades. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande v. 29, n. 1, p. e283096, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n1e283096>.

ASSIS JÚNIOR, J. O.; LACERDA, C. F.; SILVA, F. B.; SILVA, F. L. B.; BEZERRA, M. A.; GHEYI, H. R. Produtividade do feijão-de-corda e acúmulo de sais no solo em função da fração de lixiviação e da salinidade da água de irrigação. **Engenharia Agrícola**, Piracicaba v. 27, n. 3, p. 702–713, dez. 2007. DOI: 10.1590/S0100-69162007000400013.

AVELAR, F. F.; MATOS, A. T. D.; MATOS, M. P. D. Remoção de contaminantes do esgoto sanitário em sistemas alagados construídos cultivados com *Mentha aquatica*. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Belo Horizonte, v. 24, n. 6, p. 1259–1266, dez. 2019. DOI: 10.1590/s1413-41522019116019.

AZEVEDO, B. S. M.; RIZZO, A. C. L. LEITE, S. G. F.; SOBRAL, L. G. F.; REICHWALD, D.; WALCHAN, G. M. Utilização da fibra de casca de coco verde como suporte para a formação de biofilme visando o tratamento de efluentes. In: XVI Jornada de Iniciação Científica, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: CETEM, 2008, 140 p.

BARBOSA, A. M. S.; FARIA, R. T.; SARAN, L. M.; COELHO, A. P.; Risco de salinização e sodificação na solução do solo devido ao reúso de águas residuais na fertirrigação. . In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**, 47., 2018, Brasília. Anais ... Brasília: CONBEA, 2018. Disponível em: <<https://conbea.org.br/anais/publicacoes/conbea-2018/anais-2018/eas-engenharia-de-agua-e-solo-9/1261-risco-de-salinizacao-e-sodificacao-na-solucao-do-solo-devido-ao-reuso-de-aguas-residuais-na-fertirrigacao/file>>. Acesso em: 19 out. 2024

BARROS, J. F. C. **Fertilidade do solo e nutrição das plantas**: texto de apoio para as Unidades Curriculares de Sistemas e Tecnologias Agropecuários e Noções Básicas de Agricultura. Évora: Universidade de Évora, Escola de Ciências e Tecnologia, Departamento de Fitotecnia, 2020. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10174/28120>>. Acesso em: 07 jan. 2025

BARROSO, L. B.; WOLFF, D. B. Reúso de esgoto sanitário na irrigação de culturas agrícolas. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 8, n. 3, p. 225–236, 2011. Disponível em: <http://ferramentas.unipinhal.edu.br/engenhariaambiental/viewarticle.php?id=607>. Acesso em: 25 jul. 2024

BRAINER, M. S. C. P. Produção de coco: o Nordeste é destaque nacional. **Caderno setorial ETENE**, Fortaleza, v. 3, n. 61, dez. 2018. Disponível em: <https://bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/975>. Acesso em: 13 jan. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. **Complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005: dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 maio 2011.

BRASIL, M. D. S.; MATOS, A. T. D. Avaliação de aspectos hidráulicos e hidrológicos de sistemas alagados construídos de fluxo subsuperficial. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 323–328, set. 2008. DOI: 10.1590/S1413-41522008000300012.

CABRAL, M. M. S.; ABUD, A. K. S.; ROCHA, M. S. R. S.; ALMEIDA, R. M. G; GOMES, M. A. Composição da fibra da casca de coco verde in natura e após pré-tratamentos químicos. **Engevista**, v. 19, n. 1, p. 99, 30 jan. 2017. DOI: 10.22409/engevista.v19i1.802.

CARRIJO, O. A.; LIZ, R. S. D.; MAKISHIMA, N. Fibra da casca do coco verde como substrato agrícola. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 4, p. 533–535, dez. 2002. DOI: 10.1590/S0102-05362002000400003.

CAVALCANTE, P. H. L.; CAVALCANTE, K. L. Avaliação do risco de salinidade e sodicidade no uso de efluentes tratados na agricultura irrigada no município de Iguatu-CE. **Revista Semiárido De Visu**, v. 6, n. 3, p. 170–182, 31 dez. 2018. DOI: 10.31416/rsdv.v6i3.110.

COELHO, D. S. **Influência da salinidade nos aspectos nutricionais e morfofisiológicos de genótipos de sorgo forrageiro**. 2013. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) — Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus, Juazeiro, 2013. Disponível em: <https://portais.univasf.edu.br/ppgea/pesquisa/publicacoes-1/arquivos/daniela-siqueira-coelho.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2024

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. Brasília, DF, v. 11 – Safra 2023/2024, n. 10 – Décimo levantamento, p. 1-120, julho de 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 05 jul. 2024

CORDEIRO, G. G. **Salinidade e sodicidade dos solos agrícolas**. Folheto apresentado no II Curso Sobre Manejo De Solo E Água Em Propriedades Agrícolas Do Trópico Semi-Árido.

Embrapa, Petrolina, PE: Embrapa, p. 35 1983. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/127058>. Acesso em: 25 jul. 2024

CORDEIRO, G. G. **Qualidade de água para fins de irrigação: conceitos básicos e práticas**. Petrolina, PE: Embrapa Semi-Árido, 2001. 167 p. Disponível em: http://www.cpatia.embrapa.br:8080/public_eletronica/downloads/SDC167.pdf. Acesso em: 25 jul. 2024

CORRADINI, E.; ROSA, M. F.; MACEDO, B. P.; PALADIN, P. D.; MATTOSO, L. H. C. Composição química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 31, n. 3, p. 837–846, set. 2009. DOI: 10.1590/S0100-29452009000300030.

CORREIA, G. M. P. **Avaliação da colmatção em leitos de macrófitas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/cursos/meambi/dissertacao/1691203502342299>. Acesso em: 07 jun. 2024.

COSME, A. L. Acidificação do solo – O que é, causas, consequências e soluções. **123 Ecos**. Disponível em: <https://123ecos.com.br/docs/acidificacao-do-solo/>. Acesso em: 20 nov. 2024.

COSTA, A. A.; DE CARVALHO, G. P.; LOPES, P. D. S. Cultivo do feijão carioca em sucessão a plantas de cobertura submetido a doses de nitrogênio em solos arenosos no Cerrado / Cultivation of carioca bean in succession to cover crops subjected to nitrogen doses in sandy soils in the Cerrado. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 7, p. 49181–49195, 4 jul. 2022. DOI: 10.34117/bjdv8n7-035.

COSTA, L.L.; CABELOS, B. S. O.; MEIRA, C. M. B. S.; CAVALCANTI, M. L. F. Eficiência de *Wetlands* construídos com dez dias de detenção hidráulica na remoção de colifagos e bacteriófagos. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 3, n. 1, 2003.

DIAS, N. S.; BLANCO, F. F. Efeitos dos sais no solo e na planta. In: Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: **INCSal**. v. 1, p. 129–140. 2010. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/889229>. Acesso em: 23 out. 2024

EMBRAPA. **Cultivo do Sorgo**. 9. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 68 p. (Documentos, 135). 2015. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/994083>. Acesso em: 23 out. 2024

EMBRAPA. **Condutividade**. Convênio SRH/MMA/EMBRAPA/BIRD n. 475/98, 2024. Disponível em: <https://www.cnpma.embrapa.br/projetos/ecoagua/eco/condu.html>. Acesso em: 13 jan. 2025.

FAGERIA, K. K.; OLIVEIRA, I. P. DE; DUTRA, L. G. **Deficiências nutricionais na cultura do feijoeiro e suas correções**. Goiânia: Embrapa - CNPAF, 1996. (Documentos, 65). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/203309/1/doc65.pdf>. Acesso em: 13 out. 2024.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 586 p. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/270980349_Growth_and_Mineral_Nutrition_of_Field_Crops_3rd_edition_By_N_K_Fageria_V_C_Baligar_and_C_A_Jones_Boca_Raton_FL_USA_CRC_Press_2011_pp_560_9500_ISBN_978-1-4398-1695-0. Acesso em: 13 out. 2024.

FAO, Food and Agriculture Organization. **FAOSTAT - Countries by commodity**. 2022 Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/?form=MG0AV3#rankings/countries_by_commodity. Acesso em: 23 out. 2024.

FAO, Food and Agriculture Organization. **Global Soil Partnership - soil fertility**. 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/global-soil-partnership/areas-of-work/soil-fertility/en/>. Acesso em: 23 out. 2024.

FAO, Food and Agriculture Organization. **GLOBAL MAP of salt-affected soils.**, 2021. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cb7247en>. Acesso em: 19 out. 2024

FAVRETTO, R.; GIROLETTI, C. L.; MAGRI, M. E.; SUNTTI, C. Avaliação da colmatção após 15 anos de operação de um sistema híbrido de wetland construído. **Tecno-Lógica**, v. 22, n. 1, p. 12, 22 jan. 2018. DOI: 10.17058/tecnolog.v22i1.10492.

FIGUEIREDO, A. M. F. **Viabilidade do uso de águas superficiais poluídas tratadas através de sistemas de *wetlands* construídos no cultivo do feijão**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, 2013. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFCG_c0340b4aa17d946bcee9c7b6cfe8b9d. Acesso em: 9 jan. 2025.

FONDER, N.; HEADLEY, T. The taxonomy of treatment *wetlands*: A proposed classification and nomenclature system. **Ecological Engineering**, v. 51, p. 203–211, fev. 2013. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.12.011. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925857412003655>. Acesso em: 09 out. 2024

FREITAS, R. A. S. **Comportamento de geotêxteis como filtro em resíduos – fosfogesso e lama vermelha**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 131 p, 2003. Disponível em: <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=1264486>. Acesso em: 12 nov. 2024

GARAYO JUNIOR, F. H.; IDE, C. N.; OMOTO, E. S.; SILVA, J. B.; RIBEIRO, M. L. Pós-tratamento de efluentes sanitários de reatores UASB utilizando *wetlands* construídos. **Revista DAE**, v. 68, n. 224, p. 73–93, 8 nov. 2017. DOI: 10.36659/dae.2020.041.

GIRALDELLI, M. A.; PEREIRA, O. A.; SANTOS, S. F.; PINHEIRO, S. K. T. Propriedade da Fibra de Coco: Uma Revisão Sistemática. **UNICIÊNCIAS**, v. 24, n. 1, p. 34–38, 11 fev. 2020 DOI: 10.17921/1415-5141.2020v24n1p34-38.

GOMES, A. C. C.; SILVA, C. M. S.; SOUZA, J. N.; SILVA, P. T. S.; SILVA, A. F.; PEREIRA, M. C. T. Cultivo de macrófitas aquáticas flutuantes livres em *wetlands* construídas para tratamento de efluentes de viveiros de piscicultura. II **Seminário Nacional, ETes Sustentáveis**, Fortaleza. n. 2, 2019. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1116469/1/CULTIVODEMACROFITASAQUATICASFLUTUANTESLIVRES2019.pdf>

GONÇALVES, S. L.; LYNCH, J. P. Raízes de plantas anuais: tolerância a estresses ambientais, eficiência na absorção de nutrientes e métodos para seleção de genótipos. **Documentos 357 - Embrapa Soybean**, , 2014. DOI: 10.13140/RG.2.1.3288.0169.

GUEDES, T.; MARTINS, A. B. T.; ACORSI, C. R. L.; JANEIRO, V. **Estatística Descritiva**. Material didático. Projeto Aprender Fazendo Estatística. Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 49, 2005. Disponível em: https://www.ime.usp.br/~rvicente/Guedes_et al _Estatistica_Descritiva.pdf. Acesso em: 27 nov. 2024

HENRIQUE, I. N.; MARTORANO, L. G.; SCHERER, N. C.; PELEJA, J. R. P. **Fitorremediação utilizando macrófitas aquáticas no tratamento de efluentes de esgoto doméstico**. In: Demandas Essenciais para o Avanço da Engenharia Sanitária e Ambiental 2. 1. ed. Ponta Grossa: Atena Editora, 2020. p. 214-224. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/post-ebook/2932>. Acesso em: 17 out. 2024.

HOFFMANN, H.; GAMARRA, J.; PLATZER, B. V.; DIAS, R. T. M. **Combinação de tratamento primário e secundário de esgoto doméstico em sistema de filtros plantados como solução descentralizado de alta eficiência e baixo custo operacional**. In: 1º simpósio brasileiro sobre aplicação de *wetlands* construídos no tratamento de águas residuárias, v. 1, 2013. **Anais...** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2013

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agropecuária**. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/>. Acesso em: 23 out. 2024.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sidra: Sistema IBGE de Recuperação Automática**. 2024. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/territorio#/N6/2909802>. Acesso em: 24 jul. 2024.

JESUS, F. L. F. **Desempenho e influência dos capins tifton 85 e vetiver no tratamento de esgoto sanitário em sistemas alagados construídos**. 2016. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/e97f6f5e-99d8-41bb-ac6a-8d3ad1b1e2cb>. Acesso em: 13 jan. 2025

JUNIOR, F. H. G.; IDE, C. N.; OMOTO, E.S.; SILVA, J. B.; RIBEIRO, M. L. Pós-tratamento de efluentes sanitários de reatores UASB utilizando *wetlands* construídos. **Revista DAE**, v. 68, n. 224, p. 73–93, 2017. DOI: 10.36659/dae.2020.041.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. **Tratamento de *Wetlands***. 2^a ed. Boca Raton: CRC Press, 1016 p, 2008. DOI: 10.1201/9781420012514

KANTAWANICHKUL, S.; DUANGJAISAK, W. Domestic wastewater treatment by a constructed wetland system planted with rice. **Water Science and Technology**, v. 64, n. 12, p. 2376–2380, 1 dez. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/51880945_Domestic_wastewater_treatment_by_a_constructed_wetland_system_planted_with_rice. Acesso em: 17 out. 2024

KLUGE, R. A.; TEZOTTO-ULIANA, J. V.; SILVA, P. P. M. D. Physiological and Environmental Aspects of Photosynthesis. **Revista Virtual de Química**, v. 7, n. 1, 2015. DOI: 10.5935/1984-6835.20150004.

LANZA, A. L. L.; BORGES, I. D.; LARA, J. P.; WILLIAN, K.; MAGALHÃES, A. G. F.; RESENDE, F. T. A. Análise de crescimento de plantas de sorgo biomassa. In: Congresso Nacional de Milho e Sorgo, 31., 2016, Bento Gonçalves. **Milho e Sorgo: Inovações**,

mercados e segurança alimentar. Bento Gonçalves, 2016. Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=pc&id=1056711&biblioteca=vazio&busca=autoria%5C:%22DIAS,%20E.%22&qFacets=autoria%5C:%22DIAS,%20E.%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=6>. Acesso em: 17 out. 2024.

LIMA, L. A. S. **Wetlands** **construídos com meio suporte de solo e fibra de coco plantados com feijão (*Phaseolus vulgaris*) e sorgo (*Sorghum bicolor*) na remoção de coliformes termotolerantes.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/352498156_WETLANDS_CONSTRUIDOS_COM_MEIO_SUORTE_DE_SOLO_NA_REMOCAO_DE_COLIFORMES_TERMOTOLERANTES_DE_ESGOTOS_DOMESTICOS. Acesso em: 18 out. 2024.

LIMA, P. C. C. **Produção de feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) através da infiltração subsuperficial de esgoto doméstico em solo arenoso.** 2005. 120 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/17330>. Acesso em: 18 out. 2024.

LIMA, R. S. **Avaliação de macrófitas lemnáceas no polimento de águas residuárias e seu uso na cultura do feijão.** 2018. 67 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/153532>. Acesso em: 17 out. 2024.

LIMA, R. F. S. **Potencialidades dos *Wetlands* Construídos Empregados no Pós-tratamento de Esgotos: Experiências Brasileiras.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) — Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016. Agrônômicas, Botucatu, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/172555>. Acesso em: 17 ago. 2024.

LIRA, R. M.; GORDIN, L. C.; SILVA, G. F.; DANTAS, D. C.; MORAIS, J. E. F. Concentração de cátions lixiviados em solo cultivado com cana-de-açúcar submetida à irrigação salina e frações de lixiviação. In: IV INOVAGRI INTERNACIONAL, 2015. **Anais...** Fortaleza: Inovagri, p. 120-125. 2015. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/eagri/a/mGK9kbdL5HZbm3P3bjFC6fF/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 17 ago. 2024.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Fertilidade do solo e produtividade agrícola**. In: Fertilidade do Solo. Viçosa: SBCS, 2007. p. 2-61. ISBN 978-85-86504-08-2 Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~nutricao/deplantas/fertisolo.pdf>. Acesso em: 17 out. 2024

LUIZ, T. B. P.; SILVA, J. L. S.; SCHRODER, T.; DESCOVI FILHO, L. L. V. Mapeamento de risco de sodificação de solos em microbacia hidrográfica no Rio Grande do Sul. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 12, n. 1, p. 68, 22 maio 2017. DOI: 10.18378/rvads.v12i1.4390.

MACHADO, A.I.; BERETTA, M.; FRAGOSO, R.; DUARTE, E. Overview of the state of the art of constructed *wetlands* for decentralized wastewater management in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 187, p. 560–570, fev. 2017. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.11.015.

MACHADO, A. W. Cálcio nas plantas: função, comportamento no solo e adubos com cálcio. **Agrolink**. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/fertilizantes/nutrientes/fertilizantes---calcio_361447.html. Acesso em: 19 dez. 2024.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; RODRIGUES, J. A. S. **Fisiologia da planta de sorgo**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 4 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado técnico, 86). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/487527>. Acesso em: 19 dez. 2024.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M.; RODRIGUES, J. A. S. Cultivo do Sorgo. **Embrapa Milho e Sorgo Sistemas de Produção**, v. 2, n. 4, set. 2008. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/994083/1/Sistema-de-Producao-Cultivo-do-Sorgo.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2024.

MANCUSO, M.; FIOREZE, M. Numerical simulation of flow and biokinetic processes in subsurface flow constructed *wetlands*: a systematic review. **Journal of Urban and**

Environmental Engineering, v. 12, n. 1, p. 120–127, 30 jun. 2018. DOI: 10.4090/juee.2018.v12n1.120127.

MARAFON, A. C.; AMARAL, A. F. C.; LEMOS, E. E. P. D. Characterization of bamboo species and other biomasses with potential for thermal energy generation. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 49, p. e55282, 2019. DOI: 10.1590/1983-40632019v4955282.

MARQUES, M. V. A. **Dinâmica e distribuição dos nutrientes do efluente do tratamento preliminar de esgoto doméstico no solo quando aplicado em sulcos na fertirrigação do capim-elefante**. 2017. 158 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 24 mar. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-ATQMPP> Acesso em: 26 nov. 2024

MARSCHNER, H. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 3rd ed. London: **Elsevier Academic Press**, 2012. 672 p. ISBN 978-0-12-384905-2. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>.

MARTINS, M. E. G. **Introdução à Probabilidade e à Estatística com complementos de Excel**. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Estatística, 2005. 972 p. ISBN: 972-8890-03-6. Depósito Legal nº 228501/05 Disponível em: <https://spestatistica.pt/storage/app/uploads/public/5e3/da5/85e/5e3da585eeeb6455759468.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2025

MATAMOROS, V.; CAIOLA, N.; ROSALSES, V.; HERMANDEZ, O.; IBANEZ, C. The role of rice fields and constructed *wetlands* as a source and a sink of pesticides and contaminants of emerging concern: Full-scale evaluation. **Ecological Engineering**, v. 156, p. 105971, set. 2020. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2020.105971.

MATOS, M. P. **Colmatção em sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial: principais fatores e métodos de identificação em unidades plantadas e não plantadas**. 2015. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-A3JGV8>. Acesso em: 26 nov. 2024

MATOS, M. P.; VON SPERLING, M.; MATOS, A. T.; DIAS, D. F. C.; SANTOS, C. R. S. Uso de traçador salino para avaliação da colmatção e das condições hidrodinâmicas em sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 6, p. 1137–1148, dez. 2015. DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n6p1137-1148/2015.

MATOS, M. P.; SPERLING, M. V.; MATOS, A. T.; PASSOS, R. G. Colmatção e desempenho de sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial ao longo de oito anos de operação. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 6, p. 1227–1237, dez. 2018. DOI: 10.1590/s1413-41522018175770.

MAZUCATO, V. S. H.; SANTOS, V. B.; CAVALHERI, P. S.; MAGALHÃES FILHO, F. J. C. Comportamento de wetland construído de fluxo vertical com fundo parcialmente saturado na remoção de matéria orgânica nitrogenada e fósforo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 56506–56520, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n8-168.

MEIRA, C. M. B. S. **Utilização de terras úmidas no tratamento de águas superficiais poluídas: influência do tipo de leito e de macrófita**. 2004. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/3397>. Acesso em: 17 out. 2024

MELO, A. R.; SILVA, P. F.; DANTES NETO, J.; SILVA, P. A.; COSTA JÚNIOR, D. S.; PEREZ-MARIN, A. M. Alterações químicas do solo após irrigação com efluentes e adubação fosfatada cultivado com *Moringa oleifera* Lam. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 3, p. e70786, 29 set. 2023. DOI: 10.5902/1980509870786.

MELO, L. S.; COSTA, T. L. S.; **Avaliação de métodos alternativos de compostagem para biodegradação da casca de coco verde**. In: Seminário de iniciação científica e pós-graduação da embrapa tabuleiros costeiros, 5., 2015, Aracaju. Anais... Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 280, ref. 22-32. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1025861>. Acesso em: 13 jan. 2025.

MEURER, E. J. **Fundamentos de Química do solo**. 6. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2017. 116 p. ISBN: 978-85-7727-020-9. Disponível em: <https://rodmeurer.wixsite.com/quimica-do-solo>. Acesso em: 13 jan. 2024.

MOHEDANO, R. A. **Tratamento de efluente e produção de alimento, em cultivos de tilápia (*Oreochromis niloticus*), através da macrófita aquática *Lemna valdiviana* (Lemnaceae). Uma contribuição para a Sustentabilidade da Aquicultura**. 2004. Dissertação (Mestrado em Aquicultura) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/87962>. Acesso em: 13 jun. 2024.

MUDULI, M.; CHOUDHARYA, M.; RAY, S. A review on constructed *wetlands* for environmental and emerging contaminants removal from wastewater: traditional and recent developments. **Environment, Development and Sustainability**, 27 nov. 2023. DOI: 10.1007/s10668-023-04190-0.

NARITA, C. Y. **Carvões ativados a partir de resíduo de coco verde por diferentes ativadores: obtenção, caracterização e aplicações**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI: 10.11606/T.3.2020.tde-07042021-161403.

NEVES, P. P. C. **Estudo da aplicabilidade de um wetland construído de fluxo vertical para o tratamento complementar do esgoto doméstico de uma residência unifamiliar**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.bdt.d.uerj.br:8443/handle/1/18071>. Acesso em: 07 jan. 2025

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de cátions no solo alterada pelo sistema de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 4, p. 1031–1040, ago. 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000400027.

PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 911–920, jun. 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000300001.

PEDROTTI, A. et al. Causas e consequências do processo de salinização dos solos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 1308–1324, 2015. DOI: 105902/2236117016544.

PEREIRA, J. R.; VALDIVIESO, C. R.; CORDEIRO, G. G. Recuperação de solos afetados por sódio através do uso de gesso. In: **seminário sobre o uso de fosfogesso na agricultura**, 1., 1985, Brasília, DF. Anais... Brasília, DF: EMBRAPA-DDT, 1986. p. 85-105. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/132830?locale=pt_BR. Acesso em: 22 out. 2024

PERONDI, T.; WOLFF, D. B.; DECEZARO, S. T.; ARAUJO, R. K. *Wetlands* construídos para o tratamento de esgoto doméstico: uma análise comparativa do custo do ciclo de vida. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 2, p. 175–189, jun. 2020. DOI: 10.1590/s1678-86212020000200394.

PIMENTEL, A.A. B. **Avaliação do risco de salinização e sodificação do solo para cultivo de Cannabis sp.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal da Paraíba. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/21978/1/AABP02022022-MA1176.pdf>. Acesso em: 21 out. 2024

PIMENTEL, C.; OLIVEIRA, R. F.; RIBEIRO, R. V.; SANTOS, M. G.; MACHADO, E.C. Características fotossintéticas de *Phaseolus vulgaris* L. **Hoehnea**, v. 38, n. 2, p. 273–280, 2011. DOI: 10.1590/S2236-89062011000200007.

PUCHER, B.; LANGERGRABER, G. The State of the Art of Clogging in Vertical Flow *Wetlands*. **Water**, v. 11, n. 11, p. 2400, 15 nov. 2019. DOI: 10.3390/w11112400. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/11/2400>. Acesso em: 21 out. 2024

RAHMAN, M. E.; HALMI, M. I. E. B.; SAMAD, M. Y. B. A.; UDDIN, M. K. MAHMUD, K. Design, Operation and Optimization of Constructed Wetland for Removal of Pollutant. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 22, p. 8339, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/22/8339>. Acesso em: 06 nov. 2024

RIBEIRO, J. P. M. **Uso de macrófitas lemnáceas para a remoção de nitrogênio do esgoto sanitário de uma lagoa de estabilização**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina. Disponível em: https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/UTFPR-12_e8f56897b9ee8f40b051217a7e8df277. Acesso em: 21 out. 2024

RODRIGUES, M. DA G. F.; NACIF, P. G. S.; COSTA, O. V.; OLSZEWSKI, N. Solos e suas relações com as paisagens naturais no município de Cruz das Almas - BA. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 9, n. 2, 2009. Disponível em: <http://joaootavio.com.br/bioterra/workspace/uploads/artigos/cruzasalmasba-51816b9f1cc64.pdf>. Acesso em: 15 out. 2024

SANTANA, M. J.; CALVALHO, J. A.; SILVA, E. L.; MIGUEL, D. S. Efeito da irrigação com água salina em um solo cultivado com o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, v. 27, n. 2, p. 443–450, 2003. DOI: 10.1590/S1413-70542003000200027.

SANTOS, B. F. S.; PASSOS, E. S.; FACCIOLI, G. G.; ARGUELHO, M. L. P. de; OLIVEIRA, R. A.; CARVALHO, R. S. Análise da condutividade elétrica em efluentes domésticos no tratamento terciário composto por filtro com biocarvão. **XII Encontro de Recursos Hídricos em Sergipe**, São Cristóvão, 2019. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=4690>. Acesso em: 24 jul. 2024.

SANTOS, H. G. dos; ZARONI, M. J.; ALMEIDA, E. P. C. **Argissolos Amarelos**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa. Agência de Informação Tecnológica: Solos Tropicais. 2021 Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/argissolos/argissolos-amarelos>. Acesso em: 24 jul. 2024.

SANTOS, R. M. DOS. **Resposta produtiva do feijão carioca (*phaseolus vulgaris* L. Taadama.) sob déficit hídrico em diferentes fases fenológicas dissertação**. 2021. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu. Disponível em: <https://acsa.revistas.ufcg.edu.br/acsa/index.php/ACSA/article/download/1414/1158/5624>. Acesso em: 15 out. 2024

SANTOS, R. V.; CAVALCANTE, L. F.; VITAL, A. F. M.; LACERDA, C. F.; SOUZA, E. R.; SOUZA, E. R.; LIMA, G. S. **Interação salinidade-fertilidade do solo**. In: Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados. 2. ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. p. 277-294. ISBN 976-85-7563-489-9. Disponível em: <https://ppgea.ufc.br/wp-content/uploads/2018/04/manejo-da-salinidade-na-agricultura.pdf>. Acesso em: 06 dez. 2024

SANTOS, G. O. **Aplicação de efluente de tratamento de esgoto, via aspersão, no solo e em Brachiaria**. 2015. xxviii, 197 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/0f5df2bb-bcf0-4ed9-8f3d-7f37ca019ce6>. Acesso em: 13 jan. 2025.

SANTOS, M. V. G. **Doses de potássio na produtividade de feijão carioca**. 2022. 36 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/3383>. Acesso em: 13 jan. 2025.

SANTOS, S. T. D.; LIMA, A. D. J.; MICHELAN, D. C. D. G. S. Desempenho de filtros lentos com meio filtrante de misturas de areia e materiais sustentáveis. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, p. 139–153, 6 abr. 2023. DOI: 10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.1.82098.

SERAPHIM, K. T. G. **Influência da disposição de efluente agro-industrial no solo através da irrigação por aspersão**. 1999. 72 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/93832>. Acesso em: 13 jan. 2025.

SEZERINO, P. H.; BENTO, A. P.; DECEZARO, S. T.; MAGRI, M. E.; PHILIPPI, L. S. Experiências brasileiras com *wetlands* construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: parâmetros de projeto para sistemas horizontais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 151–158, 2015. DOI: 10.1590/S1413-41522015020000096615.

SEZERINO, P. H.; SILVA, A. R. Aplicabilidade dos *wetlands* construídos no tratamento de esgoto sanitário e doméstico. In: *Wetlands* construídos como ecotecnologia para o

tratamento de águas residuárias: experiências brasileiras. 1. ed. **Brazil Publishing**, p. 9–26. 2021. DOI: 10.31012/978-65-5861-293-3.

SILVA, M. A. S.; SANTOS, A. B.; MACHADO, P. L. O.; ALCANTRA, F. A.; FAGERIA, N. K.; SILVA, O. F. Correção da acidez do solo. **Agência de Informação Tecnológica – Embrapa**. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/producao/sistema-de-cultivo/arroz-irrigado-na-regiao-tropical/correcao-do-solo-e-adubacao/correcao-da-acidez-do-solo?form=MG0AV3>. Acesso em: 20 nov. 2024.

SILVA, É. L. **Desenvolvimento de um sistema ecológico para tratamento e aproveitamento agrícola de esgoto doméstico em comunidades rurais**. 2020. 165 p. Dissertação (Mestrado em Conservação de Recursos Naturais do Cerrado) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Urutaí. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/1036>. Acesso em: 09 out. 2024

SILVA, L. M.; LEMOS, L. B.; CRUSCIOL, C. A. C.; FELTRON, J. C. Sistema radicular de cultivares de feijão em resposta à calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 7, p. 701–707, jul. 2004. DOI: 10.1590/S0100-204X2004000700012.

SILVA, S. C. D. **“Wetlands construídos” de fluxo vertical com meio suporte de solo natural modificado no tratamento de esgotos domésticos**. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília. 231 p. 2007. Disponível em: <http://www.realp.unb.br/jspui/handle/10482/2026>. Acesso em: 09 out. 2024

SILVA, S. C.; RAMOS, M. L. G.; BERNARDES, R. S. Remoção de sais em *wetlands* construídos no tratamento de esgotos domésticos primário. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 6, n. 1, p. 125, 24 abr. 2018. DOI: 10.9771/gesta.v6i1.22371.

SILVA, S. C.; RAMOS, M. L. G.; BERNARDES, R. S. *Wetlands* construídos com meio suporte de solo na remoção de coliformes termotolerantes de esgotos domésticos. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 9, n. 1, p. 32, 26 abr. 2021. DOI: 10.9771/gesta.v9i1.41906.

SILVEIRA, R. N. C. M. Drenagem e controle da salinidade na irrigação. 2015. 25 p. Material didático do Curso de Drenagem e Controle da Salinidade na Irrigação. **Agência Nacional de Águas**. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/539018242/Drenagem-e-controle-de-salinidade-4h>. Acesso em: 13 jan. 2025

SNIS, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. **Mapa do esgotamento sanitário**. 2022. Disponível em: http://appsnis.mdr.gov.br/indicadores-hmg/web/agua_esgoto/mapa-esgoto. Acesso em: 9 out. 2024.

SOARES, M.; PIZZOLATTI, B. S. Study About Clogging Effect on Hydraulic Conductivity, Total Porosity and Turbidity Removal by Using Different Filtration Media, as Support to Bank Filtration Technic Implementation. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 43, n. 1, p. 130-137, 30 mar. 2020. DOI: 10.11137/2020_1_130_137.

SOUSA, J. T.; VAN HAANDEL, A. C.; COSENTINO, P.R.; GUIMARÃES, A. V. Pós-tratamento de efluente de reator UASB utilizando sistemas “*wetlands*” construídos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 87–91, 2000. DOI: 10.1590/S1415-43662000000100016.

SOUZA FILHO, E. J. **Uso de esgoto doméstico tratado e lodo no cultivo de sorgo: desenvolvimento de plantas, produção de grãos e incidência de pragas**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/30469>. Acesso em: 27 nov. 2024.

SUSILAWATI; LAKITAN, B. Cultivation of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) subjected to shallow water table at riparian wetland in South Sumatra, Indonesia. **Australian Journal of Crop Science**, v. 13, n. 01, p. 98–104, 20 jan. 2019. DOI: 10.21475/ajcs.19.13.01.p1298.

TEIXEIRA, J. L. **Obtenção e caracterização de carvão ativado a partir da casca de coco verde**. 2020. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/212986>. Acesso em: 27 nov. 2024

TESKE, F. F.; WARTCHOW, D. II-340 – Implantação de um wetland construído híbrido para polimento de efluente de doméstico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2017, São Paulo. **Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. São Paulo: ABES, 2017. p. 1-8. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/36_Download/TrabalhosCompletoPDF/II-340.pdf. Acesso em: 27 nov. 2024

TORRES, T. E. L. **Estudo da viabilidade técnica do reuso de águas residuárias na aquicultura**. 2000. 45 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Pesca) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/43257>. Acesso em: 19 out. 2024.

VAL, A. M. G. do; DOMINGUES, R. Z.; MTENCIO, T. Condutividade elétrica em soluções iônicas. **Físico-Química II**. Universidade Federal de Minas Gerais. 2013, 2024. Disponível em: https://www2.ufjf.br/quimicaead//files/2013/09/FQ_II_Condutividade.pdf?form=MG0AV3. Acesso em: 29 out. 2024.

VALLADARES NETO, J. et al. Boxplot: um recurso gráfico para a análise e interpretação de dados quantitativos. **Revista Odontológica do Brasil Central**. v. 26, n. 76, 2017. DOI: <https://doi.org/10.36065/robrac.v26i76.1132>.

VASCONCELLOS, G. R. **Avaliação do impacto da colmatção e de métodos de descolmatção em wetlands construídos de escoamento horizontal subsuperficial**. 2020. 207 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/60581/1/Tese%20Gabriel%20Vasconcellos%20-%20Vers%C3%A3o%20Final.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2024.

VITAR, D. Sorgo: uma alternativa eficiente e rentável produção agrícola. **Portal Agriconline**. 2023. Disponível em: <https://agronline.com.br/porta/artigo/sorgo-uma-alternativa-eficiente-e-rentavel-producao-agricola/>. Acesso em: 27 nov. 2024.

VON SPERLING, M.; SEZERINO, P. H. Dimensionamento de *wetlands* construídos no Brasil. **Boletim Wetlands Brasil**, ed. especial, 2018. Disponível em: <http://gesad.ufsc.br/boletins/>. Acesso em: 17 out. 2024.

WEARN, Y. N.; MONTAGNA, L. S.; PASSADOR, F. R. Compósitos de fibra de coco/LDPE: efeito do tratamento superficial das fibras de coco em compósitos verdes. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 25, n. 1, p. e-12548, 2020. DOI: 10.1590/s1517-707620200001.0873.

XU, Q.; WANG, L.; WANG, P.; WEN, X. ZHANG, F. Clogging in Vertical Flow Constructed *Wetlands*: Causes for Clogging and Influence of Decontamination. **Ecological Chemistry and Engineering S**, v. 29, n. 1, p. 65–75, 1 mar. 2022. DOI: 10.2478/eces-2022-0007.

ZANELLA, L. **Plantas ornamentais no pós-tratamento de efluentes sanitários: *wetlands* construídos utilizando brita e bambu como suporte**. 2008. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2008. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=464886>. Acesso em: 21 out. 2024