

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Pós-tratamento de água residuária doméstica com biocarvão para fertirrigação
de culturas agrícolas**

Antonio Magno dos Santos Souza
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

ANTONIO MAGNO DOS SANTOS SOUZA

**Pós-tratamento de água residuária doméstica com biocarvão para fertirrigação
de culturas agrícolas**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Fernando Franca da Cunha

Coorientador: Gregório Guirado Faccioli

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S729p
2026

Souza, Antonio Magno dos Santos, 1993-
Pós-tratamento de água residuária doméstica com biocarvão
para fertirrigação de culturas agrícolas / Antonio Magno dos
Santos Souza. – Viçosa, MG, 2026.
1 tese eletrônica (135 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Fernando França da Cunha.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2026.
Referências bibliográficas: f. 119-135.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.219>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Águas residuais - Purificação - Filtração. 2. Águas
residuais - Reaproveitamento. 3. Carvão vegetal. 4. Cultivos
agrícolas. I. Cunha, Fernando França da, 1980-. II. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 628.742

ANTONIO MAGNO DOS SANTOS SOUZA

Pós-tratamento de água residuária doméstica com biocarvão para fertirrigação de culturas agrícolas

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 27 de fevereiro de 2026.

Assentimento:

Antonio Magno dos Santos Souza
Autor

Fernando Franca da Cunha
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pelo autor em 13/05/2026 às 16:16:48 e pelo orientador em 15/05/2026 às 09:59:06. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **B5WN.QE44.7NVG** e clique no botão 'Validar documento'.

Em mem3ria de minha av3, Maria Lindaura de Souza. Sua alegria, seu sorriso contagiante e seu amor permanecem vivos, deixando muitas saudades.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, sabedoria e amparo ao longo de toda esta caminhada.

Aos meus pais, Inês e Cícero, pelo carinho, dedicação e apoio incondicional. Sem vocês, nada disso seria possível.

À minha esposa, Paloma, por todo amor, paciência, apoio e compreensão durante esta trajetória.

Ao meu irmão Marcos, à minha cunhada Evelyn e à minha sobrinha Maria Clara, pelo carinho, incentivo e apoio constantes.

Aos meus sogros, Acácia e Samuel, pelo acolhimento e incentivo ao longo desta caminhada.

À Nicole, Fabiano, Cosmira e Luan, pela valiosa contribuição na condução dos experimentos.

Ao Professor Fernando França da Cunha, pela confiança depositada, pelas orientações sempre precisas, pelos valiosos ensinamentos e pelo constante suporte, essenciais para o desenvolvimento e a conclusão desta tese.

Ao Professor Gregório Guirado Faccioli, pela confiança depositada ao longo de todos esses anos, pelas valiosas orientações e pelo apoio constante em toda a minha trajetória acadêmica.

Ao Professor Luciano de Melo, pelo apoio fornecido, pelas valiosas orientações e pela disponibilidade durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

À Universidade Federal de Sergipe, pelo espaço cedido para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao LEHSA (Laboratório de Estudos em Hidráulica e Saneamento Ambiental) do Instituto Federal de Sergipe, pelo espaço e apoio concedidos para a realização da pesquisa.

Ao CLQM (Centro de Laboratórios de Química Multiusuários) da Universidade Federal de Sergipe, pelo suporte nas análises laboratoriais.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Cuidar da água é cuidar do futuro. Que o conhecimento produzido aqui contribua para uma agricultura mais consciente e sustentável.

RESUMO

SOUZA, Antonio Magno dos Santos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2026. **Pós-tratamento de água residuária doméstica com biocarvão para fertirrigação de culturas agrícolas.** Orientador: Fernando Franca da Cunha. Coorientador: Gregório Guirado Faccioli.

A escassez de recursos hídricos e a crescente demanda por alimentos tornam necessária a adoção de estratégias que reduzam o consumo de água de boa qualidade na agricultura. Nesse contexto, o reúso de águas residuárias tratadas surge como alternativa promissora. Para sua viabilização, devem ser asseguradas condições agronômicas, ambientais e sanitárias que garantam o uso seguro do efluente na agricultura. Com este trabalho avaliou-se o uso de biocarvões produzidos a partir de resíduos agrícolas como meios filtrantes no pós-tratamento de água residuária doméstica destinada à fertirrigação do feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) e do coentro (*Coriandrum sativum*). Foram produzidos biocarvões de casca de coco e de bagaço de laranja, com posterior caracterização de suas propriedades físico-químicas e estruturais. Em seguida, esses materiais foram empregados em sistemas filtrantes de baixo custo, desenvolvidos em escala de bancada. A água residuária tratada em nível secundário, com e sem tratamento terciário por biocarvão, foi utilizada na fertirrigação das culturas. As aplicações ocorreram em diferentes proporções, misturadas à água de abastecimento. Foram realizados dois ciclos de cultivo conduzidos em ambiente protegido. Avaliaram-se parâmetros físicos, químicos e microbiológicos da água. Além disso, foram analisadas as características agronômicas e produtivas das culturas, a eficiência do uso da água e a qualidade microbiológica dos produtos colhidos. Os resultados indicaram que o pós-tratamento com biocarvão promoveu melhorias na qualidade da água residuária, refletindo em respostas agronômicas mais estáveis ao longo dos ciclos de cultivo. Observou-se redução expressiva da carga microbiológica, com remoção superior a 99% de coliformes termotolerantes após a passagem pelos biofiltros. No feijão-caupi, a água filtrada proporcionou maior regularidade no crescimento e na produção. Além disso, não comprometeu a qualidade microbiológica dos grãos, que atenderam aos critérios de segurança para consumo humano. No coentro, cultura mais sensível à qualidade da água, o uso da água filtrada resultou em melhor desempenho agronômico no primeiro ciclo. No segundo ciclo, observou-se maior estabilidade das respostas, especialmente em proporções intermediárias de água residuária. De modo geral, as análises de regressão indicaram que proporções intermediárias de água residuária estiveram associadas aos melhores resultados de

crescimento, produção e produtividade do uso da água. Observou-se maior estabilidade desses efeitos quando o efluente foi submetido ao pós-tratamento. Conclui-se que o reúso de água residuária tratada é viável para a fertirrigação das culturas avaliadas. O biocarvão, como etapa complementar de tratamento, apresenta-se como alternativa de baixo custo. Além disso, se destaca por aumentar a confiabilidade do sistema, conservar recursos hídricos e valorizar resíduos agroindustriais.

Palavras-chave: biofiltros; coentro; efluentes domésticos; feijão-caupi; reúso de água

ABSTRACT

SOUZA, Antonio Magno dos Santos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2026. **Post-treatment of domestic wastewater with biochar for fertigation of agricultural crops.** Adviser: Fernando Franca da Cunha. Co-adviser: Gregório Guirado Faccioli.

Water scarcity and the increasing demand for food require the adoption of strategies that reduce the use of high-quality water in agriculture. In this context, the reuse of treated wastewater emerges as a promising alternative. For its implementation, agronomic, environmental, and sanitary conditions must ensure the safe use of effluents in agricultural systems. This study evaluated the use of biochars produced from agricultural residues as filtering media in the post-treatment of domestic wastewater intended for the fertigation of cowpea (*Vigna unguiculata*) and coriander (*Coriandrum sativum*). Biochars were produced from coconut husk and orange bagasse and subsequently characterized regarding their physicochemical and structural properties. These materials were then applied in low-cost filtration systems developed at bench scale. Secondary-treated wastewater, with and without tertiary treatment using biochar, was used in the fertigation of the crops, applied in different proportions mixed with tap water. Two crop cycles were conducted under protected conditions. Physical, chemical, and microbiological parameters of the water were evaluated, as well as agronomic and productive characteristics of the crops, water use efficiency, and microbiological quality of the harvested products. The results indicated that biochar post-treatment improved the quality of the wastewater and promoted more stable agronomic responses throughout the cultivation cycles. A significant reduction in microbiological load was observed, with more than 99% removal of thermotolerant coliforms after filtration through the biofilters. In cowpea, filtered water provided greater regularity in plant growth and yield and did not compromise the microbiological quality of the grains, which met food safety standards for human consumption. In coriander, a crop more sensitive to water quality, the use of filtered water resulted in improved agronomic performance during the first cycle. In the second cycle, responses became more stable, particularly at intermediate proportions of wastewater. Overall, regression analyses indicated that intermediate proportions of wastewater were associated with the best results for growth, yield, and water productivity, with greater stability when the effluent underwent post-treatment. The results demonstrate that the reuse of treated wastewater is a viable alternative for the fertigation of the evaluated crops. Biochar, as a complementary treatment step,

represents a low-cost technology capable of increasing system reliability, conserving water resources, and promoting the valorization of agro-industrial residues.

Keywords: biofilters; coriander; domestic effluents; cowpea; water reuse

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Etapas de preparo das biomassas: (A) bagaço de laranja desidratado; (B) triturador elétrico; (C) triturador de coco; (D) material triturado.	31
Figura 2 - Esquema ilustrativo do sistema de filtração.	37
Figura 3 - Valores diários máximos, médios e mínimos da temperatura do ar (A) e da umidade relativa (B), bem como valores acumulados diários de radiação solar (C) e evapotranspiração de referência (D) durante o período experimental.	43
Figura 4 – Curvas termogravimétricas dos biocarvões de casca de coco: (A) <i>in natura</i> ; (B) após uso com efluente.	47
Figura 5 - Curvas termogravimétricas (TG) dos biocarvões de bagaço de laranja: (A) <i>in natura</i> ; (B) após uso com efluente.	49
Figura 6 - Composição elementar de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) dos biocarvões de casca de coco e bagaço de laranja, antes e após a utilização na filtração de efluente doméstico.	52
Figura 7 – Micrografias de MEV do biocarvão de casca de coco <i>in natura</i> e após a filtração do efluente, em diferentes condições: (A) <i>in natura</i> - 500x; (B) <i>in natura</i> - 1.500x; (C) após filtração do efluente - 500x; (D) após filtração do efluente - 1.500x.	57
Figura 8 – Micrografias de MEV do biocarvão de bagaço de laranja <i>in natura</i> e após a filtração do efluente, em diferentes condições: <i>in natura</i> - 500x; (B) <i>in natura</i> - 1.000x; (C) após filtração do efluente - 500x; (D) após filtração do efluente - 1.000x.	58
Figura 9 - Classificação dos tipos de isotermas de adsorção segundo a IUPAC.	60
Figura 10 - Isotermas de adsorção e dessorção de N ₂ do biocarvão da casca do coco: (A) <i>in natura</i> ; (B) após uso com efluente.	61
Figura 11 - Isotermas de adsorção e dessorção de N ₂ do biocarvão de laranja: (A) <i>in natura</i> ; (B) após uso com efluente.	62
Figura 12 - Indicadores de matéria orgânica no efluente doméstico da ETE (antes da filtração) e nos efluentes filtrados com biocarvões de casca de coco e de bagaço de laranja ao longo do experimento: (A) demanda bioquímica de oxigênio (DBO); (B) demanda química de oxigênio (DQO).	63
Figura 13 - Indicadores de oxigenação e carga nutricional no efluente doméstico bruto e nos efluentes filtrados com biocarvões de casca de coco e bagaço de laranja ao longo do experimento: (A) oxigênio dissolvido (OD); (B) fósforo total.	65
Figura 14 - Contagem de coliformes termotolerantes no efluente doméstico da ETE e nos efluentes filtrados com biocarvões de casca de coco e bagaço de laranja ao longo do experimento.	68
Figura 15 - Variação dos parâmetros físico-químicos no efluente doméstico da ETE e nos efluentes filtrados com biocarvões de casca de coco e bagaço de laranja ao longo do experimento (A) pH; (B) condutividade elétrica; (C) salinidade; (D) temperatura da água.	70
Figura 16 - Altura de planta (AP), número de folhas (NF), número de vagens (NV), grãos por vagem (GV), grãos por planta (GP), massa seca de vagens (MSV), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade da água (PA) do feijão em dois ciclos de cultivo, em função de proporções de água residuária misturada à água de abastecimento, sendo uma água tratada convencionalmente e a outra, além de tratada, filtrada com biofiltro de biocarvão de laranja.	81

Figura 17 - Altura de planta (AP), número de folhas (NF), número de vagens (NV), grãos por vagem (GV), grãos por planta (GP), massa seca de vagens (MSV), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade da água (PA) do feijão em dois ciclos de cultivo, em função de proporções de água residuária misturada à água de abastecimento, sendo uma água tratada convencionalmente e a outra, além de tratada, filtrada com biofiltro de biocarvão de coco.....94

Figura 18 - Altura de planta (AP), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade da água (PA) do coentro em dois ciclos de cultivo, em função de proporções de água residuária misturada à água de abastecimento, sendo uma água tratada convencionalmente e a outra, além de tratada, filtrada com biofiltro de biocarvão de laranja. 104

Figura 19 - Altura de planta (AP), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade da água (PA) do coentro em dois ciclos de cultivo, em função de proporções de água residuária misturada à água de abastecimento, sendo uma água tratada convencionalmente e a outra, além de tratada, filtrada com biofiltro de biocarvão de coco. 113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização química e física do solo (0–20 cm) antes do início do experimento.....	38
Tabela 2 - Comparativo das perdas de massa, estabilidade térmica e capacidade de adsorção de biocarvões produzidos a partir de casca de coco e bagaço de laranja, nas condições <i>in natura</i> e após a filtragem de efluente doméstico, com base na análise termogravimétrica.	50
Tabela 3 - Composição elementar (%) determinada por Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (EDX) do biocarvão de casca de coco <i>in natura</i> e após a utilização como elemento filtrante de efluente doméstico.	54
Tabela 4 - Composição elementar (%) determinada por Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (EDX) do biocarvão de bagaço de laranja <i>in natura</i> e após a utilização como elemento filtrante de efluente doméstico.	55
Tabela 5 - Parâmetros texturais dos biocarvões.....	59
Tabela 6 - Quadrados médios, significância do teste F (ANOVA) e valores médios da altura de planta (AP), número de folhas (NF), número de vagens (NV), grãos por vagem (GV), grãos por planta (GP), massa seca de vagens (MSV), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade da água (PA) do feijão em diferentes ciclos de cultivo, comparando três fontes hídricas: água de abastecimento (Testemunha), água residuária tratada convencionalmente (Tratada) e água tratada e filtrada com biofiltro de biocarvão de laranja (Filtrada), ambas aplicadas em distintas proporções com água de abastecimento.....	73
Tabela 7 - Quadrados médios, significância do teste F (ANOVA) e valores médios da altura de planta (AP), número de folhas (NF), número de vagens (NV), grãos por vagem (GV), grãos por planta (GP), massa seca de vagens (MSV), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade da água (PA) do feijão em diferentes ciclos de cultivo, comparando três fontes hídricas: água de abastecimento (Testemunha), água residuária tratada convencionalmente (Tratada) e água tratada e filtrada com biofiltro de biocarvão de coco (Filtrada), ambas aplicadas em distintas proporções com água de abastecimento.....	88
Tabela 8 - Resultados da análise microbiológica do feijão-caupi comparados aos limites estabelecidos pela IN nº 161/2022 e RDC nº 12/2001.....	100
Tabela 9 - Quadrados médios, significância do teste F (ANOVA) e valores médios da altura de planta (AP), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade da água (PA) do coentro em diferentes ciclos de cultivo, comparando três fontes hídricas: água de abastecimento (Testemunha), água residuária tratada convencionalmente (Tratada) e água tratada e filtrada com biofiltro de biocarvão de bagaço de laranja (Filtrada), ambas aplicadas em distintas proporções com água de abastecimento.	101
Tabela 10 - Quadrados médios, significância do teste F (ANOVA) e valores médios da altura de planta (AP), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade da água (PA) do coentro em diferentes ciclos de cultivo, comparando três fontes hídricas: água de abastecimento (Testemunha), água residuária tratada convencionalmente (Tratada) e água tratada e filtrada com biofiltro de biocarvão de coco (Filtrada), ambas aplicadas em distintas proporções com água de abastecimento.	107

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
Am	Clima tropical de monção (classificação de Köppen).
ANOVA	Análise de variância.
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária.
AP	Altura de planta.
As	Clima tropical de savana (classificação de Köppen).
ATG	Análise termogravimétrica.
BET	Brunauer, Emmett e Teller (método de determinação de área superficial).
BJH	Barrett, Joyner e Halenda (método de distribuição de tamanho de poros).
BRS	Brasil (prefixo de cultivares registradas).
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
CC	Capacidade de campo.
CHN	Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio (análise elementar).
CLQM	Centro de Laboratórios de Química Multiusuários.
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos.
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente.
CTC	Capacidade de troca catiônica.
CV	Coeficiente de variação.
DBC	Delineamento em blocos casualizados.
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio.
DEA	Departamento de Engenharia Agrônômica.
DQO	Demanda química de oxigênio.
EDX	Fluorescência de raios X por energia dispersiva.
ETc	Evapotranspiração da cultura.
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto.
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura.
FAOSTAT	Base de dados estatísticos da FAO.
FH	Fonte hídrica.
GP	Grãos por planta.
GV	Grãos por vagem.
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional.
IFS	Instituto Federal de Sergipe.

IN	Instrução Normativa.
ISO	Organização Internacional de Normalização.
ITPS	Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe.
IUPAC	União Internacional de Química Pura e Aplicada.
MEV	Microscopia eletrônica de varredura.
MFPA	Massa fresca da parte aérea.
MSPA	Massa seca da parte aérea.
MSV	Massa seca de vagens.
NBR	Norma Brasileira.
NF	Número de folhas.
NMP	Número Mais Provável.
NV	Número de vagens.
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.
ONU	Organização das Nações Unidas.
PA	Produtividade da água.
P_i	Massa da planta no dia atual.
pH	Potencial hidrogeniônico.
PST	Percentual de sódio trocável.
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada.
SB	Soma de bases trocáveis.
TG	Curva termogravimétrica.
U_a	Umidade atual.
UFS	Universidade Federal de Sergipe.
UFV	Universidade Federal de Viçosa.
V	Saturação por bases.

LISTA DE SÍMBOLOS

Al^{3+}	Alumínio trocável.
Ca^{2+}	Cálcio trocável.
cm	Centímetro.
cm^2	Centímetro quadrado.
cm^3	Centímetro cúbico.
cmolc	Centimol de carga.
dm^3	Decímetro cúbico.
dS	DeciSiemens.
°	Grau (ângulo ou coordenada geográfica).
°C	Grau Celsius.
g	Gramma.
H^+	Hidrogênio.
ha	Hectare.
keV	Quiloelétron-volt.
kg	Quilograma.
L	Litro.
m	Metro.
m^2	Metro quadrado.
m^3	Metro cúbico.
mg	Miligrama.
mL	Mililitro.
mm	Milímetro.
min	Minuto.
μA	Microampere.
μm	Micrômetro.
Mg^{2+}	Magnésio trocável.
Na^+	Sódio trocável.
%	Porcentagem.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1. RECURSOS HÍDRICOS E AGRICULTURA IRRIGADA	21
2.2. REÚSO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS NA AGRICULTURA	22
2.3. PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES E TECNOLOGIAS DE BAIXO CUSTO	24
2.4. BIOCÁRVÕES E SEU USO EM SISTEMAS DE FILTRAGEM	25
2.5. CULTURAS AGRÍCOLAS E APLICABILIDADE DO REÚSO NA IRRIGAÇÃO	27
3. MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1. BIOCÁRVÕES	30
3.1.1. Produção dos biocárvoes	30
3.1.2. Caracterização dos biocárvoes.....	32
3.2. FERTIRRIGAÇÃO COM ÁGUA RESIDUÁRIA TRATADA COM BIOCÁRVÕES	33
3.2.1. Localização e caracterização da área experimental	34
3.2.2. Fontes hídricas	35
3.2.3. Delineamento experimental	35
3.2.4. Montagem do sistema filtrante	36
3.2.5. Solo.....	37
3.2.6. Culturas agrícolas	39
3.2.7. Estimativa da demanda hídrica.....	41
3.2.8. Dados meteorológicos	42
3.2.9. Análises das fontes hídricas	44
3.2.10. Análises estatísticas	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1. Caracterização dos biocárvoes	47
4.1.1. Análise termogravimétrica (ATG).....	47
4.1.2. Comparativo entre biocárvoes: estabilidade térmica e adsorção.....	50
4.1.3. Análise elementar CNH	51
4.1.4. Fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX).....	53
4.1.5. Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	56
4.1.6. Parâmetros texturais e isotermas de adsorção.....	59
4.2. Ensaio experimental.....	62

4.2.1. Caracterização das fontes hídricas utilizadas na fertirrigação	62
4.2.2. Características agronômicas do feijão-caupi fertirrigado com água residuária filtrada pelo biocarvão de laranja	73
4.2.3. Características agronômicas do feijão-caupi fertirrigado com água residuária filtrada pelo biocarvão de coco.....	87
4.2.4. Características microbiológicas do feijão-caupi	99
4.2.5. Características agronômicas do coentro fertirrigado com água residuária filtrada pelo biocarvão de laranja	100
4.2.6. Características agronômicas do coentro fertirrigado com água residuária filtrada pelo biocarvão de coco.....	107
5. CONCLUSÕES	117
REFERÊNCIAS.....	119

1. INTRODUÇÃO

A crescente pressão sobre os recursos hídricos tem ampliado o debate sobre como produzir alimentos sem aumentar o consumo de água de boa qualidade. Em regiões onde a disponibilidade hídrica é limitada ou irregular, o uso de água potável para irrigação torna-se cada vez mais questionável (INGRAO et al., 2023). Nesse cenário, o reúso de águas residuárias tratadas aparece como alternativa viável, pois reduz a demanda por fontes hídricas convencionais e permite o aproveitamento de nutrientes já presentes no efluente doméstico.

Além da economia de água, o reúso agrícola pode reduzir a necessidade de fertilizantes minerais. Isso ocorre porque águas residuárias geralmente contêm nitrogênio, fósforo e potássio em concentrações capazes de contribuir para o desenvolvimento das plantas (OSORIO et al., 2025). Ainda assim, o tema envolve cautela. Existem preocupações relacionadas à salinidade (OBIJANYA et al., 2025), à presença de compostos orgânicos residuais (TROTTA, BAALOUJ e BRIENZA, 2024) e à ocorrência de microrganismos patogênicos. Soma-se a isso a possibilidade de efeitos cumulativos no solo após uso contínuo (CHEN et al., 2017).

A qualidade final da água depende diretamente do tratamento empregado. Em alguns casos, os sistemas convencionais não removem completamente substâncias que podem afetar o desempenho das culturas e a segurança sanitária dos alimentos (JARAMILLO e RESTREPO, 2017; MATESUN et al., 2024). Por essa razão, técnicas complementares de pós-tratamento vêm sendo investigadas (OLIVEIRA et al., 2023). Entre elas, destaca-se o uso de biocarvão como meio filtrante, principalmente por se tratar de uma alternativa de baixo custo e associada ao aproveitamento de resíduos diversos.

O biocarvão apresenta elevada porosidade, grande área superficial e reconhecida capacidade adsortiva. Essas características favorecem a retenção de sólidos suspensos, compostos orgânicos e íons potencialmente indesejáveis (ALSHEHRI e PUGAZHENDHI, 2024; JAGADEESH e SUNDARAM, 2023). Quando produzido a partir de resíduos como casca de coco ou bagaço de laranja, seu uso também contribui com princípios de economia circular, agregando valor a subprodutos que, muitas vezes, teriam destinação limitada.

Apesar dos avanços, ainda são limitados estudos integrando produção de biocarvão, sistemas filtrantes e os efeitos do reúso na agricultura. Há lacunas quanto

à qualidade microbiológica do efluente após o pós-tratamento e às respostas agrônômicas e biológicas das culturas que foram fertirrigadas.

Culturas como o feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) e o coentro (*Coriandrum sativum*) apresentam grande relevância socioeconômica, especialmente em sistemas familiares e periurbanos. Nessas condições, o reúso agrícola pode representar alternativa estratégica. No entanto, por se tratarem de culturas destinadas ao consumo humano, a segurança microbiológica torna-se aspecto central na avaliação da viabilidade da prática.

Diante desse cenário, torna-se necessário avaliar a eficiência do biocarvão como tecnologia de pós-tratamento de águas residuárias e seus efeitos no contexto da fertirrigação agrícola. A geração de informações nessa perspectiva pode contribuir para práticas mais sustentáveis, especialmente em regiões sujeitas à escassez hídrica. Além disso, pode ampliar a base técnica para o uso seguro do reúso agrícola.

Nesse contexto, a pesquisa também apresenta relação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (NAÇÕES UNIDAS, 2025). Destaca-se o ODS 6 – Água Potável e Saneamento, uma vez que o estudo aborda o pós-tratamento de águas residuárias e seu reúso seguro na agricultura, contribuindo para o uso mais sustentável dos recursos hídricos. O trabalho também se relaciona com o ODS 2 – Fome Zero e Agricultura Sustentável, ao avaliar o desempenho agrônômico de culturas alimentares fertirrigadas com água residuária tratada, promovendo maior eficiência no uso da água e dos nutrientes.

Além disso, a pesquisa apresenta interface com o ODS 3 – Saúde e Bem-Estar, ao considerar aspectos microbiológicos associados ao reúso agrícola; com o ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis, ao valorizar resíduos agroindustriais como matéria-prima para produção de biocarvão; e com o ODS 13 – Ação Contra a Mudança do Clima, devido ao potencial do biocarvão em contribuir para o armazenamento de carbono e para sistemas agrícolas mais resilientes. Também se relaciona com o ODS 15 – Vida Terrestre, ao incentivar práticas agrícolas ambientalmente mais sustentáveis, e com o ODS 9 e ODS 11, ao propor soluções tecnológicas de baixo custo para tratamento e reúso de efluentes domésticos.

A pesquisa foi conduzida a partir da hipótese de que o biocarvão melhora a qualidade microbiológica do efluente tratado e preserva os nutrientes presentes na

água residuária. Esses aspectos foram considerados essenciais para o desenvolvimento das culturas, uma vez que o objetivo não se limitou à economia de água de boa qualidade, mas também à redução da dependência de fertilizantes minerais. Além disso, o sistema proposto possibilita a destinação ambientalmente adequada de três subprodutos distintos: o efluente doméstico, o bagaço de laranja e a casca de coco.

Assim, o objetivo geral deste trabalho foi produzir biocarvões a partir de resíduos agrícolas e utilizá-los no pós-tratamento de água residuária para fins de fertirrigação. Como objetivos específicos, buscou-se desenvolver sistemas filtrantes de baixo custo e avaliar a qualidade do efluente após a filtração. Além disso, analisaram-se as características agronômicas e microbiológicas das culturas cultivadas em ambiente protegido que foram fertirrigadas com águas residuárias provenientes desses sistemas, considerando o aproveitamento dos nutrientes presentes no efluente tratado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. RECURSOS HÍDRICOS E AGRICULTURA IRRIGADA

A água é um recurso natural essencial à manutenção da vida, ao equilíbrio dos ecossistemas e ao desenvolvimento socioeconômico. Entretanto, o crescimento populacional, a expansão das atividades produtivas e os impactos das mudanças climáticas têm intensificado a pressão sobre os recursos hídricos disponíveis, comprometendo a segurança hídrica em várias regiões do planeta (BAMGBOYE et al., 2025; YANG et al., 2025; ZHOU e HAO, 2025).

Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO, 2025), a agricultura é responsável por aproximadamente 70% do consumo de água doce do planeta. Além disso, estima-se que 2,4 bilhões de pessoas residam em áreas com escassez severa de água e que a demanda por água na agricultura possa crescer cerca de 30% até 2050. Esse crescimento é impulsionado pela necessidade de expandir a produção de alimentos em resposta ao crescimento populacional e às mudanças climáticas.

No Brasil, a agricultura irrigada também representa o maior setor consumidor de água doce, mas em proporção inferior à média global. O Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos (ANA, 2024) indica que, em 2023, 50% do volume total de água retirada no país foi destinado à irrigação, seguido pelo abastecimento urbano (23,4%) e pela indústria (9,2%). Embora o percentual nacional seja menor que o global, ele evidencia a forte dependência do setor agrícola da disponibilidade hídrica e reforça a necessidade de políticas públicas e tecnologias voltadas ao uso eficiente da água e à sustentabilidade da produção agrícola.

Nesse contexto, a agricultura irrigada assume um papel importante tanto na segurança alimentar quanto na gestão racional dos recursos hídricos. A adoção de práticas sustentáveis vem sendo amplamente discutida como alternativa para mitigar os efeitos da escassez hídrica e reduzir a pressão sobre mananciais (KASSIS et al., 2025; SOUSA et al., 2025), em consonância com as diretrizes do Plano Nacional de Recursos Hídricos 2022–2040, instituído pela Resolução CNRH nº 232/2022 (BRASIL, 2022b).

Nas regiões semiáridas, onde a irregularidade das chuvas e a limitação dos aquíferos tornam o recurso ainda mais escasso, o reúso agrícola de águas residuárias surge como uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente

vantajosa (HAJJAR et al., 2025; SOUSA et al., 2025). Além de complementar a oferta hídrica, esse tipo de prática permite o reaproveitamento de nutrientes presentes nos efluentes, reduzindo o uso de fertilizantes minerais e os custos de produção, desde que sejam observados padrões de qualidade e segurança estabelecidos pela legislação vigente (SOUZA et al., 2022). QADIR et al., (2020) estimaram que as águas residuárias poderiam compensar 13,4% das necessidades globais de nutrientes agrícolas e 15% das necessidades de irrigação. Assim, a eficiência no uso da água e as práticas de reúso de efluentes tratados configuram estratégias essenciais para uma agricultura mais resiliente e sustentável, especialmente em regiões de vulnerabilidade climática.

2.2. REÚSO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS NA AGRICULTURA

O reúso de águas residuárias na agricultura tem sido amplamente estudado como alternativa sustentável para enfrentar a escassez hídrica e reduzir a pressão sobre os mananciais (SINGH, 2021; MANCUSO et al., 2024). Em escala global, o reúso planejado de efluentes tratados é reconhecido como estratégia-chave para a segurança alimentar e hídrica, especialmente em regiões áridas e semiáridas (CUMBANA et al., 2025). A FAO (2025) destaca que o reúso controlado pode reduzir em até 30% a demanda por fontes convencionais de água, além de diminuir a necessidade de fertilizantes minerais. Essa abordagem reforça a transição para sistemas agrícolas sustentáveis e alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente os ODS 6 e 12 (NAÇÕES UNIDAS, 2025).

Do ponto de vista conceitual, o reúso de águas residuárias pode ser classificado em não planejado e planejado. No reúso não planejado, a água é devolvida ao ambiente, geralmente por meio da descarga em corpos d'água, como rios. Posteriormente, essa água é utilizada a jusante, sem controle deliberado de sua qualidade ou de um uso específico, após a captação. Já o reúso planejado envolve a aplicação intencional de água tratada, com definição prévia de seu uso. Além disso, há controle de qualidade e adoção de medidas sanitárias e ambientais para tornar o efluente adequado ao fim pretendido (BAUER e WAGNER, 2022; STAFF, 1998).

No contexto agrícola, o reúso planejado apresenta vantagens claras em relação ao não planejado. Isso ocorre porque permite adequar o nível de tratamento às exigências da cultura, do sistema de irrigação e do tipo de solo (AL-HAZMI et al.,

2023; DRECHSEL, QADIR e GALIBOURG, 2022). Nesse caso, o tratamento e o pós-tratamento do efluente tornam-se etapas centrais para viabilizar o uso seguro da água residuária. Essas etapas contribuem para a redução de riscos agrônômicos, ambientais e sanitários (HASHIM e QI, 2021).

As águas residuárias de origem doméstica apresentam elevado potencial para o uso agrícola. Isso se deve à presença natural de macro e micronutrientes essenciais ao crescimento vegetal (SOUZA et al., 2022; CARTER et al., 2025; VOBRUBA et al., 2025). Esse aporte nutricional pode reduzir custos de produção e favorecer o aproveitamento contínuo dos nutrientes presentes no efluente, fortalecendo práticas de economia circular na agricultura (MAINARDIS et al., 2022). No entanto, o reúso também envolve riscos agrônômicos e ambientais, que variam conforme o tipo de tratamento adotado e a sensibilidade das culturas (MANCUSO et al., 2023; YALIN et al., 2023; DREI et al., 2025). Entre os principais desafios destacam-se a salinização do solo, o acúmulo de íons potencialmente tóxicos, a presença de patógenos, a possível ocorrência de metais pesados e a lixiviação de nitrogênio na forma de nitrato para as águas subterrâneas e mananciais (SINGH, 2021; CALISI et al., 2025; IBRAHIM et al., 2025; ROCHA et al., 2025).

O excesso de sais solúveis, por exemplo, reduz o potencial osmótico da solução do solo e compromete a absorção de água pelas plantas. Como consequência, pode afetar a produtividade agrícola (SINGH, 2021). A longo prazo, o uso contínuo de efluentes sem controle adequado pode degradar a estrutura do solo. Além disso, pode alterar a dinâmica dos nutrientes no sistema, afetando o desempenho das culturas (ORTEGA et al., 2025).

Diante desses riscos, o reúso agrícola deve ser orientado por parâmetros de qualidade que assegurem proteção sanitária e ambiental. No Brasil, as principais referências legais estão em normas gerais, como a Resolução CONAMA nº 357/2005, que define padrões de qualidade para corpos d'água (BRASIL, 2005). Além disso, a Resolução CONAMA nº 430/2011 estabelece condições e limites para o lançamento de efluentes (BRASIL, 2011). Embora não sejam específicas para reúso agrícola, ambas fornecem valores de referência para balizar limites microbiológicos e físico-químicos mínimos a serem atendidos.

Entretanto, o Brasil ainda não possui uma legislação nacional específica que regulamente de forma abrangente o reúso agrícola de águas residuárias, o que representa uma lacuna importante no arcabouço regulatório. Em diferentes países,

conjuntos próprios de leis e regulamentações vêm sendo elaborados para orientar essa prática, buscando equilibrar os benefícios agronômicos e ambientais com a proteção da saúde pública. No contexto brasileiro, as iniciativas existentes ainda são pontuais, e espera-se que futuras regulamentações considerem não apenas os aspectos sanitários, mas também os agronômicos e ambientais envolvidos na aplicação de efluentes no solo (MATOS e MATOS, 2017; SCHAER-BARBOSA; SANTOS; MEDEIROS, 2014).

Além das diretrizes regulatórias, cresce o interesse por tecnologias de pós-tratamento capazes de elevar a qualidade da água residuária para padrões seguros mesmo em contextos rurais (MNYANGO et al., 2025; SADHIYAN et al., 2025). Sistemas filtrantes compostos por materiais naturais, como areia, brita e biocarvão, vêm sendo estudados como alternativas acessíveis e eficazes para remover sólidos suspensos, diminuir carga orgânica e melhorar características físicas e químicas do efluente, permitindo adequá-lo para fins de irrigação (SOUZA et al., 2022).

O reúso agrícola de efluentes tratados representa, portanto, uma estratégia integrada de manejo de água e nutrientes. Quando realizado de forma planejada e associado a tecnologias adequadas de tratamento e pós-tratamento, contribui para a conservação hídrica, a valorização de resíduos e o fortalecimento da sustentabilidade dos sistemas produtivos.

2.3. PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES E TECNOLOGIAS DE BAIXO CUSTO

O pós-tratamento de efluentes consiste em uma etapa complementar aos sistemas convencionais de tratamento de esgoto. Seu objetivo é aprimorar a qualidade da água tratada e torná-la adequada a usos mais restritivos, como a fertirrigação de culturas alimentares (SIMPSON, SIMPSON e GERBER, 2024). Essa etapa visa promover a remoção adicional de sólidos suspensos finos, matéria orgânica residual, nutrientes em excesso e compostos potencialmente fitotóxicos. Também busca eliminar contaminantes persistentes que não são totalmente removidos pelos tratamentos primário e secundário, e, em alguns casos, nem pelo tratamento terciário (ADEEL et al., 2025).

Embora os processos biológicos empregados nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) reduzam substancialmente a carga orgânica e os sólidos em suspensão, eles apresentam limitações quanto à remoção de diversos

contaminantes, cuja presença é crítica para o reúso seguro na agricultura (MELONES-PEÑA et al., 2025). Estudos recentes apontam que a presença de coliformes termotolerantes, DQO residual, nitrogênio amoniacal e condutividade elétrica em quantidades elevadas permanecem como os principais entraves à reutilização agrícola de efluentes tratados (CHEN et al., 2025a).

Nesse cenário, tecnologias de baixo custo têm ganhado destaque como alternativas viáveis para o pós-tratamento do efluente. Elas são especialmente importantes em regiões rurais ou semiáridas, onde soluções avançadas podem ser economicamente inviáveis (COPPENS et al., 2025; HASANOGLU et al., 2025). Esses sistemas geralmente utilizam materiais naturais de ampla disponibilidade (como areia, brita, cascalho, zeólitas, carvão vegetal e biocarvões) que apresentam elevado potencial de filtração e adsorção (MA et al., 2024; SUHARTINI et al., 2025). Entre as configurações empregadas encontram-se filtros lentos de areia (MELLOUL et al., 2023), biofiltros multicamadas (ASDIOU et al., 2025) e sistemas de biofiltração utilizando carvão ativado ou biocarvão (SOUZA et al., 2022).

A eficiência desses sistemas depende tanto das características físico-químicas do efluente quanto das propriedades do material filtrante, incluindo porosidade, área superficial específica, reatividade química e composição elementar (CARVALHO et al., 2021). Além disso, esses filtros podem diminuir a condutividade elétrica, o teor de sólidos dissolvidos e a concentração de nutrientes. Com isso, contribuem para minimizar riscos de salinização, fitotoxicidade e impactos cumulativos sobre o solo (KARA et al., 2025).

Assim, os sistemas de pós-tratamento representam uma etapa estratégica para viabilizar o reúso agrícola de efluentes provenientes das ETEs (SOUZA et al., 2022). Entretanto, o desempenho desses sistemas pode variar consideravelmente em função do tipo de material filtrante empregado, das características do efluente e das condições operacionais (BUI et al., 2024; CHEN et al., 2025b). Dentre os materiais estudados, o biocarvão tem recebido destaque crescente por aliar baixo custo à sustentabilidade e à alta eficiência adsortiva.

2.4. BIOCARVÕES E SEU USO EM SISTEMAS DE FILTRAGEM

O biocarvão é um material carbonáceo obtido pela pirólise de resíduos orgânicos sob condições controladas de temperatura e restrição de oxigênio (XIANG

et al., 2020). Nos últimos anos, esse material tem recebido crescente atenção devido às suas propriedades físico-químicas singulares. Elas incluem elevada superfície específica, porosidade desenvolvida e estabilidade estrutural (YU et al., 2019). Essas características o tornam útil em diversas aplicações ambientais, agrícolas e industriais.

É importante distinguir o biocarvão bruto do biocarvão ativado. O biocarvão bruto é obtido diretamente do processo de pirólise, sem etapas adicionais de ativação. Ele apresenta menor área superficial quando comparado ao biocarvão ativado. O biocarvão ativado passa por processos físicos ou químicos de ativação que ampliam significativamente sua porosidade e capacidade adsorptiva. No entanto, esses processos implicam maior custo de produção e maior complexidade operacional (GEÇA, WIŚNIEWSKA e NOWICKI, 2022; TADESSE HUANG e ZHOU, 2025). Em sistemas de reúso agrícola, especialmente em contextos rurais, o biocarvão bruto tem sido considerado mais compatível, por aliar eficiência funcional, baixo custo e simplicidade de produção (LIU, BOFFA e CRAVOTTO, 2026).

No contexto agrícola, o biocarvão tem sido amplamente estudado como condicionador de solo, contribuindo para a retenção de água, aumento da capacidade de troca catiônica e retenção de nutrientes (PENG et al., 2026; YOO et al., 2018). Além disso, o material tem se destacado como adsorvente de origem renovável, com potencial para remover matéria orgânica, nutrientes em excesso e outros compostos presentes em matrizes aquosas, inclusive efluentes domésticos (CHAND et al., 2021; PALANSOORIYA et al., 2020; SOUZA et al., 2022).

A qualidade e as propriedades do biocarvão dependem diretamente do tipo de biomassa utilizada. Elas também são influenciadas pelas condições de pirólise, como temperatura, taxa de aquecimento e tempo de residência. Temperaturas mais elevadas (acima de 500 °C) tendem a aumentar a área superficial e a aromaticidade do material. Já temperaturas mais baixas resultam em maior teor de oxigênio superficial e maior presença de grupos funcionais polares (YU et al., 2019). Além disso, estudos apontam limitações relacionadas à saturação progressiva dos sítios adsorptivos e à redução da eficiência ao longo do uso. Esses estudos também destacam a necessidade de renovação ou substituição periódica do material filtrante (MUOGHALU et al., 2023; SHAKER et al., 2025).

Os biocarvões de origem agrícola, produzidos a partir de resíduos como cascas de frutas, restos de poda, palhadas e bagaços, representam uma solução

sustentável para o reaproveitamento de subprodutos agroindustriais (COLANTONI et al., 2016; ENAIME et al., 2020; XIONG et al., 2019). Materiais como casca de coco, casca de laranja, bagaço de cana e palha de milho têm sido amplamente investigados, apresentando rendimento adequado e propriedades estruturais compatíveis com aplicações ambientais (IAMSAARD et al., 2023; MISHRA et al., 2025; TANVEER et al., 2025). Além disso, sua produção contribui para a valorização de resíduos, redução de passivos ambientais e geração de alternativas tecnológicas de baixo custo para regiões rurais.

Entre os materiais agrícolas disponíveis, o bagaço de laranja e a casca de coco destacam-se como matérias-primas abundantes e de baixo custo, amplamente produzidas no Brasil (FAOSTAT, 2025). O biocarvão de bagaço de laranja, por exemplo, contém grupos funcionais oxigenados que favorecem a adsorção de metais e matéria orgânica dissolvida. Além disso, contribui para o equilíbrio iônico da água tratada (SHEHZAD et al., 2025; SOUZA et al., 2022). Já o biocarvão de casca de coco, rico em carbono fixo, apresenta elevada estabilidade estrutural e resistência mecânica, características desejáveis em sistemas filtrantes (MISHRA et al., 2025).

Dessa forma, embora o biocarvão apresente limitações inerentes ao seu uso como meio filtrante, como a redução da eficiência ao longo do tempo, sua versatilidade, baixo custo e origem renovável se destacam. Esses fatores justificam o interesse por sua aplicação em sistemas de pós-tratamento de efluentes voltados ao reúso agrícola.

2.5. CULTURAS AGRÍCOLAS E APLICABILIDADE DO REÚSO NA IRRIGAÇÃO

A seleção de culturas adequadas é essencial para a viabilidade do reúso de efluentes na irrigação. Espécies de ciclo curto e com alta demanda nutricional, quando cultivadas sob manejo controlado, podem se beneficiar do aporte de nutrientes contidos nas águas residuárias (CRISTÓVÃO et al., 2026). Contudo, essa escolha não deve considerar apenas o perfil nutricional, mas também a sensibilidade das culturas à salinidade, a tolerância a variações na qualidade da água e os riscos sanitários associados ao consumo do produto final (AYERS e WESTCOT, 1985; QADIR et al., 2020).

Culturas destinadas ao consumo *in natura*, especialmente hortaliças folhosas, exigem maior controle microbiológico do efluente. Já culturas cujo produto final passa por processamento ou cocção apresentam menor risco sanitário direto ao consumidor (VANMARCKE et al., 2024). Dessa forma, o nível de tratamento e as etapas de pós-tratamento da água residuária exercem papel determinante na definição das espécies a serem fertirrigadas.

Nesse contexto, a combinação de culturas com diferentes características agrônômicas permite uma avaliação mais abrangente do reúso agrícola. Espécies como o coentro, de ciclo curto e sensibilidade à qualidade da água, apresentam maior risco no reúso de efluentes. Por outro lado, culturas como o feijão-caupi, mais tolerantes e com parte comestível protegida, apresentam menor risco sanitário e maior capacidade de adaptação às condições impostas pelo reúso.

O coentro (*Coriandrum sativum*) é uma hortaliça folhosa amplamente cultivada no Nordeste brasileiro e caracterizada por alta sensibilidade à salinidade (SILVA, COELHO e SANTOS, 2012). Estudos com irrigação salina mostram que aumentos na condutividade elétrica da água reduzem significativamente o crescimento e o rendimento da cultura, evidenciando que mesmo variações moderadas de salinidade podem afetar seu desempenho agrônômico (BRENGI et al., 2024). Em sistemas de reúso agrícola, esse comportamento reforça a necessidade de monitoramento rigoroso da salinidade do efluente. Embora o biocarvão não reduza de forma substancial a concentração de sais altamente solúveis, como sódio e potássio, o pós-tratamento pode melhorar atributos como carga orgânica, turbidez e qualidade microbiológica. Essas melhorias contribuem para condições mais adequadas ao desenvolvimento da cultura (SOUZA et al., 2022).

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) é amplamente cultivado em regiões semiáridas devido à sua adaptação a altas temperaturas e a períodos de baixa disponibilidade hídrica. Quanto à salinidade, apresenta sensibilidade variável entre cultivares, sendo que alguns genótipos conseguem manter crescimento satisfatório sob condições de baixa a moderada salinidade, embora aumentos na condutividade elétrica reduzam o desenvolvimento e a produtividade (MURILLO-AMADOR et al., 2006; RAVELOMBOLA et al., 2018; WEST e FRANCOIS, 1982). Sua capacidade de fixação biológica de nitrogênio contribui para a manutenção da fertilidade do solo e reduz a necessidade de adubação nitrogenada (SOUZA et al., 2021). Estudos

indicam que o uso de efluentes tratados, quando adequadamente manejados, pode melhorar o desempenho agrônômico do feijão-caupi, sobretudo pela oferta adicional de nutrientes e, em alguns casos, pela mitigação parcial dos efeitos do estresse salino nas plantas (ALKHAMISI et al., 2017; OFORI et al., 2024).

Além dos benefícios agrônômicos, o uso de águas residuárias tratadas na irrigação pode apresentar viabilidade econômica quando associado a sistemas eficientes de aplicação de água. Estudos de análise financeira indicam que a fertirrigação com efluentes tratados via pivô central pode apresentar relação benefício/custo superior a 1 e retorno do investimento em menos de dez anos, evidenciando o potencial econômico do reúso agrícola em sistemas produtivos irrigados (CABREIRA et al., 2024; OLIVEIRA et al., 2021).

Assim, a escolha dessas duas espécies permite avaliar, de forma complementar, os benefícios e as limitações do reúso agrícola de águas residuárias. Enquanto o coentro representa uma cultura mais sensível e exigente quanto à qualidade da água, o feijão-caupi apresenta maior rusticidade e tolerância às condições do reúso. Essa diferença contribui para compreender a aplicabilidade do tratamento com biocarvão em diferentes cenários produtivos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. BIOCÁRVÕES

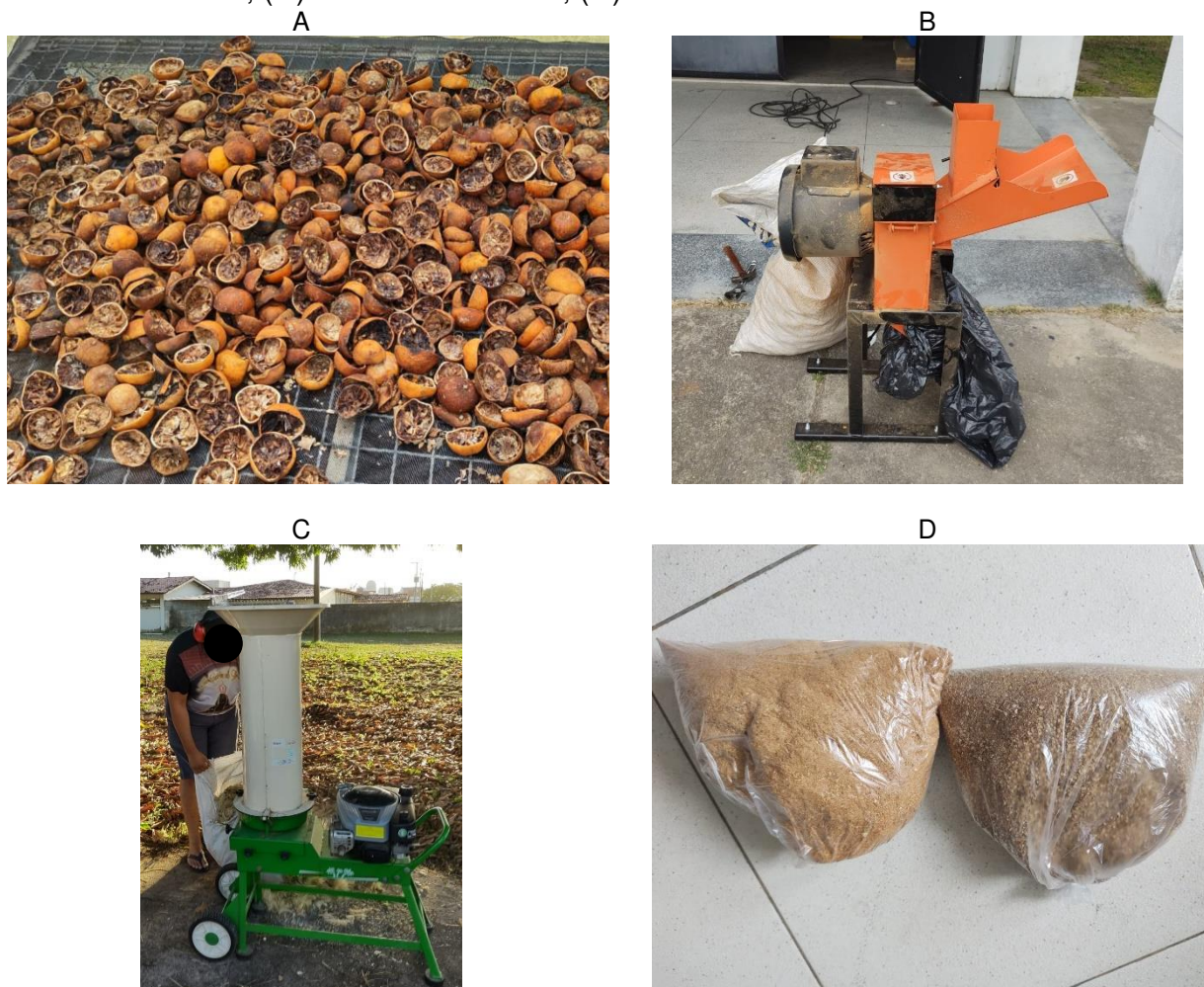
3.1.1. Produção dos biocarvões

Os biocarvões foram produzidos em forno tipo mufla sob condições controladas. O bagaço de laranja da variedade Pêra e a casca de coco da variedade Typica foram as matérias-primas empregadas.

O bagaço de laranja foi recolhido em um colégio de ensino infantil situado no bairro São José, em Aracaju, capital do estado de Sergipe. O material foi dividido em partes de 1 x 1 cm, dispostos em bancadas e deixados sob a luz do sol até desidratar (Figura 1A). Depois dessa etapa, o conteúdo foi acomodado em bandejas na estufa com circulação e renovação de ar, onde foi submetido ao processo de secagem à temperatura de 80 °C, por um período de 24 horas. Em seguida, o resíduo foi moído em um triturador elétrico, modelo TRE40MA com peneira de 5 mm (Figura 1B). Posteriormente, o resíduo foi homogeneizado e acondicionado em sacos plásticos (Figura 1D).

A casca do coco foi coletada em uma feira livre localizada no bairro Bugio, município de Aracaju, estado de Sergipe. Para desintegrar a casca do coco foi utilizado um triturador de coco (Figura 1C), modelo TRC-50, da marca Trapp. O material processado foi espalhado em bancadas e exposto à luz solar até sua desidratação. Em seguida, o resíduo foi moído em um triturador elétrico, modelo TRE40MA com peneira de 3 mm (Figura 1B). Posteriormente, o conteúdo resultante foi homogeneizado e acondicionado em sacos plásticos (Figura 1D).

Figura 1 - Etapas de preparo das biomassas: (A) bagaço de laranja desidratado; (B) triturador elétrico; (C) triturador de coco; (D) material triturado.



Durante o processo de carbonização, os resíduos foram alocados em cadinhos de porcelana. Esses cadinhos foram aquecidos no forno tipo mufla a 550 °C, a uma taxa de aquecimento de 25 °C min⁻¹. Depois de alcançar a temperatura pretendida, os cadinhos foram mantidos nessa condição durante 60 minutos. Esse método segue os procedimentos de Carvalho et al., (2021) e Souza et al. (2022), que investigaram a carbonização do bagaço de laranja a diferentes temperaturas (350 °C, 450 °C, 550 °C e 650 °C). Os estudos indicaram que a carbonização a 550 °C resultou nas características mais favoráveis, conforme observado na coloração, condutividade elétrica e pH do carvão produzido.

Para as análises de caracterização do biocarvão e a formulação dos filtros, o procedimento previamente descrito foi repetido até que aproximadamente cinco quilogramas de cada tipo de biocarvão fossem obtidos. Em seguida, todo o material

foi homogeneizado para garantir sua adequada aplicação nas diferentes finalidades propostas.

3.1.2. Caracterização dos biocarvões

Para a caracterização dos biocarvões, foram realizadas quatro amostragens distintas: duas correspondendo aos biocarvões *in natura* (bagaço de laranja e casca de coco) e duas referentes aos biocarvões após o uso como elementos filtrantes (bagaço de laranja e casca de coco). Essa abordagem possibilitou uma comparação do comportamento físico-químico dos biocarvões antes e após sua aplicação como filtros. Todas as análises foram conduzidas no Centro de Laboratórios de Química Multiusuários (CLQM), situado no Departamento de Química da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

As curvas termogravimétricas (TG) foram obtidas em equipamento da marca Shimadzu, modelo TG-50A. Cada amostra foi submetida a uma programação controlada de temperatura na faixa de 30 a 1000 °C em um porta-amostras de platina, com taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹. A análise foi realizada sob atmosfera inerte de nitrogênio, com vazão de 100 mL min⁻¹ e massa de aproximadamente 5 mg de amostra.

A determinação da composição elementar do material foi realizada em equipamento LECO CHN628 e os resultados tratados no Software CHN628, versão 1.30. O equipamento foi operado com hélio (99,995% de pureza) e oxigênio (99,999% de pureza), com temperatura do forno a 950 °C e a temperatura do Afterburner a 850 °C. Outros parâmetros foram ajustados para melhorar a sensibilidade. O equipamento foi calibrado com padrão de EDTA (41,0% C, 5,5% H e 9,5% N), usando intervalo de massa de 10 a 200 mg. Para execução das análises, aproximadamente 50 mg de amostra foram pesadas em folha de estanho.

Para determinação dos elementos foi empregado um espectrômetro de fluorescência de raios X de energia dispersiva modelo Ray Ny EDX-720 da Shimadzu. A tensão aplicada ao tubo de raios X foi de 15 keV e 50 keV, corrente de 100 µA com tempo morto do detector de 40% e colimador de 10 mm. Os espectros foram obtidos sequencialmente de 0 a 40 keV. O tempo de irradiação foi de 100 s. Segundo Lewis (2023), a análise de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX) é um método para identificar a composição elementar de uma amostra. Esta

permite a identificação qualitativa e quantitativa dos elementos químicos presentes na mesma amostra.

Antes da análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV), as amostras foram submetidas ao processo de recobrimento com camada de ouro de 5 nm no equipamento sputter coater (VG Microtech, SC7620, Inglaterra). Esse recobrimento evita o acúmulo de cargas elétricas durante a análise, além de melhorar a qualidade da imagem, proporcionando maior contraste e definição. Para a análise de MEV foi empregado um microscópio eletrônico de varredura de bancada da marca Hitachi, modelo TM3000, operando com tensão de 15 kV e amplificação das imagens variando de 50 a 10.000x. Essa técnica permite observar a morfologia da superfície dos materiais, bem como a distribuição e o formato dos poros presentes nos biocarvões.

A área superficial, o volume de poro e a porosidade média estimada dos biocarvões (método BET) foram determinadas utilizando um equipamento Quantachrome, modelo NOVA 1200e. O procedimento adotado seguiu o método descrito por Brunauer et al. (1938). Antes da análise, cada amostra passou por um processo de degaseificação a 200 °C, por um período de 6 horas sob vácuo, para que fossem eliminados toda a umidade e os gases adsorvidos. Após essa etapa, as amostras foram expostas à adsorção física de nitrogênio gasoso em suas superfícies externas e internas, a -195,85 °C. A análise foi conduzida com tempo de equilíbrio de 60 segundos para cada ponto de adsorção e dessorção, com tolerância de pressão de 0,100 e tempo máximo de estabilização de 240 segundos. O peso seco de cada amostra foi de aproximadamente 100 mg.

3.2. FERTIRRIGAÇÃO COM ÁGUA RESIDUÁRIA TRATADA COM BIOCARVÕES

Foram realizados estudos para analisar o impacto do tratamento de águas residuárias domésticas por meio de sistemas filtrantes. Os filtros foram montados utilizando o resíduo de laranja e a casca de coco. Depois de filtrado, o efluente doméstico foi empregado na fertirrigação dos cultivos agrícolas do coentro e do feijão-caupi. Portanto, foram montados quatro experimentos independentes:

- (i) Fertirrigação do coentro com água residuária tratada com biocarvão de bagaço da laranja;

- (ii) Fertirrigação do coentro com água residuária tratada com biocarvão de casca do coco;
- (iii) Fertirrigação do feijão-caupi com água residuária tratada com biocarvão de bagaço da laranja; e
- (iv) Fertirrigação do feijão-caupi com água residuária tratada com biocarvão de casca do coco.

Nesses estudos, foram avaliadas as características agronômicas de ambas as culturas e nível de contaminação microbiológica do feijão-caupi. Para investigar a reutilização dos efluentes filtrados na fertirrigação, foram desenvolvidos sistemas filtrantes adsorventes em escala de bancada.

Os experimentos consistiram em dois ciclos de cultivo. Após a conclusão de cada ciclo, foram realizadas análises agronômicas para cada cultura e análises microbiológicas apenas para o feijão-caupi. Também foram realizadas análises físicas, químicas e microbiológicas das fontes hídricas. As amostras das fontes hídricas e microbiológicas das culturas foram levadas ao ITPS (Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe) para realização das análises. É importante destacar que o ITPS dispõe de laboratórios que realizam ensaios acreditados, de acordo com os requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005.

3.2.1. Localização e caracterização da área experimental

Os cultivos agrícolas foram conduzidos em vasos cilíndricos de 6 L, confeccionados em plástico flexível (polietileno), com aproximadamente 22 cm de altura e 21 cm de diâmetro na abertura superior, providos de perfurações na base para drenagem, e mantidos em condições de ambiente protegido.

O experimento com feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) foi conduzido no Instituto Federal de Sergipe (IFS), no campus Estância, localizado nas coordenadas geográficas 11°14'07''S de latitude, 37°25'16''O de longitude. O ambiente protegido utilizado possui 15,0 m de comprimento, 9,0 m de largura, pé direito de 3,5 m e 46,0 m de altitude em relação ao nível do mar.

O experimento com coentro (*Coriandrum sativum*) foi conduzido no Departamento de Engenharia Agrônômica (DEA) da Universidade Federal de

Sergipe (UFS), no município de São Cristóvão, Sergipe (SE). O ambiente protegido utilizado possui 9,0 m de comprimento, 6,5 m de largura e pé direito de 3,0 m. As coordenadas geográficas do local são 10°55'46''S de latitude, 37°06'13''O de longitude, e a altitude em relação ao nível do mar é de 8,0 m.

Segundo a classificação climática de Köppen, São Cristóvão possui um clima tropical de savana (As), caracterizado por uma estação seca no verão e chuvas intensas concentradas entre abril e julho. A precipitação pluvial média anual é de aproximadamente 1.473 mm. As temperaturas são elevadas durante todo o ano, com médias anuais em torno de 25,8 °C, refletindo um clima quente e úmido típico da região (ALVARES et al., 2013; KÖPPEN BRASIL, 2024).

Antes de iniciarem os experimentos, foram realizadas limpezas nos locais, preparando-os adequadamente para as pesquisas. Foi removido todo o material que pudesse afetar os experimentos. Esta etapa teve como objetivo garantir que não houvesse interferências externas durante o processo de semeadura, manejo hídrico e desenvolvimento das culturas.

3.2.2. Fontes hídricas

Foram empregadas quatro fontes hídricas para fertirrigação:

- Água de consumo humano, fornecida pela concessionária que abastece a região, coletada em uma saída de tubulação localizada dentro do ambiente protegido;
- Água residuária tratada (efluente doméstico), proveniente da ETE (Estação de Tratamento de Esgoto) localizada no município de Estância-SE;
- Água pós-tratada com biocarvão do bagaço da laranja, proveniente do sistema filtrante montado para o experimento;
- Água pós-tratada com biocarvão da casca do coco, proveniente do sistema filtrante montado para o experimento.

3.2.3. Delineamento experimental

Foram conduzidos dois ciclos de cultivo seguindo o delineamento em blocos casualizados (DBC), com quatro repetições. O esquema experimental adotado foi o

fatorial 2 x 5 + testemunha. Foram utilizadas duas fontes de água residuária para fertirrigação e cinco proporções dessas águas residuárias misturadas em água de abastecimento humano.

As águas residuárias foram: (i) água residuária tratada proveniente da ETE; e (ii) água residuária tratada proveniente da filtração com biocarvão.

As proporções de água residuária misturadas em água de abastecimento humano foram de 20, 40, 60, 80 e 100%. Para melhor entendimento desse fator, o tratamento com proporção de 20% recebeu 20% de água residuária e 80% de água de abastecimento humano para reposição hídrica.

A testemunha recebeu apenas água de abastecimento humano e toda a adubação foi via fertilizantes químicos conforme as condições do solo e recomendações para a cultura. Considerando todos os tratamentos, cada experimento possuiu 44 unidades experimentais.

3.2.4. Montagem do sistema filtrante

Foram montados sistemas filtrantes (Figura 2) inspirados no esquema utilizado por Souza et al. (2022). As colunas de filtração foram montadas com baldes plásticos de 5 litros, com diâmetro aproximado de 20 cm e altura de 28 cm. Na base de cada coluna foi disposta uma camada de 5 cm de algodão, destinada à sustentação do material filtrante. Sobre essa camada foi adicionado o biocarvão, com altura de 5 cm. Para evitar a flutuação e dispersão do biocarvão durante a adição do efluente, foi inserida uma fina camada de gaze acima do material, atuando como elemento de contenção. Por fim, adicionou-se uma camada superior de 15 cm de esferas de vidro, com a finalidade de reduzir o impacto da queda do efluente e evitar a dispersão do biocarvão no sistema.

Figura 2 - Esquema ilustrativo do sistema de filtragem.



As colunas foram posicionadas verticalmente. Na base de cada balde de filtragem, foram feitos diversos furos para permitir a passagem do efluente filtrado. Para suportar os filtros e realizar a coleta do efluente, foram utilizados baldes plásticos de 20 litros. Cada balde de apoio foi equipado com uma tampa adaptada, na qual foi feito um corte com o diâmetro correspondente ao filtro, permitindo o encaixe dos filtros e a coleta eficiente do efluente filtrado.

3.2.5. Solo

O solo utilizado no experimento foi coletado no Campus Rural da Universidade Federal de Sergipe (UFS), fazenda experimental da instituição. A coleta foi realizada a uma profundidade de até 20 cm. Após a coleta, o solo foi peneirado, homogeneizado e colocado em vasos plásticos sobre uma camada de 10 cm de brita.

Para determinar a composição do solo antes da semeadura, foi retirada uma amostra de aproximadamente 500 g e enviada ao laboratório de solos certificado do Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe (ITPS) para análises químicas e físico-hídricas. Os resultados da caracterização inicial do solo estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização química e física do solo (0–20 cm) antes do início do experimento.

Parâmetro	Resultado	Unidade
pH em água	5,83	–
Fósforo (P)	2,00	mg dm ⁻³
Potássio (K)	23,70	mg dm ⁻³
Sódio (Na)	4,70	mg dm ⁻³
Matéria orgânica (MO)	3,22	g dm ⁻³
Cálcio (Ca ²⁺)	0,58	cmol _c dm ⁻³
Magnésio (Mg ²⁺)	0,35	cmol _c dm ⁻³
Alumínio (Al ³⁺)	< 0,08	cmol _c dm ⁻³
Hidrogênio + Alumínio (H+Al)	1,24	cmol _c dm ⁻³
Soma de bases trocáveis (SB)	1,01	cmol _c dm ⁻³
Capacidade de troca catiônica (CTC)	2,25	cmol _c dm ⁻³
Saturação de bases (V)	44,90	%
Percentual de sódio trocável (PST)	0,89	%
Condutividade elétrica (25 °C)	0,35	dS m ⁻¹
Densidade aparente	1,37	g cm ⁻³
Areia	86,14	%
Argila	7,36	%
Silte	6,50	%
Classe textural	Areia franca	–

O solo apresentou pH levemente ácido (5,83), baixa saturação por bases (44,9%) e baixos teores de fósforo e de cátions trocáveis. A CTC também foi reduzida (2,25 cmol_c dm⁻³), característica compatível com a textura arenosa observada. Diante desses atributos químicos, evidenciou-se a necessidade de correção da acidez e de ajuste da fertilidade do solo, procedendo-se à calagem e à adubação de plantio em todos os vasos. A adubação de cobertura foi efetuada de forma parcelada ao longo de cada ciclo de cultivo, de acordo com os tratamentos aplicados.

Na avaliação química do solo, determinou-se a necessidade de aplicação de calcário na dose aproximada de 2,67 g kg⁻¹ de solo. Após a incorporação do corretivo em todo o volume de solo dos vasos, procedeu-se à saturação com água até o início da percolação. Em seguida, aguardou-se um período de aproximadamente 90 dias, considerado adequado para a reação do corretivo e para a estabilização do pH e da fertilidade do solo.

3.2.6. Culturas agrícolas

O coentro (*Coriandrum sativum*) utilizado foi da variedade Verdão, da família Apiaceae. Essa cultivar caracteriza-se por seu vigor, folhas de coloração verde escura e excelente rusticidade, além de boa resistência a doenças foliares. O ciclo de crescimento é de 30 a 40 dias após o transplante. Segundo as recomendações do fornecedor das sementes, é essencial manter o solo bem adubado com matéria orgânica, manter a umidade adequada e assegurar que o solo esteja livre de plantas daninhas.

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) utilizado foi da variedade BRS Guariba, pertencente à família Fabaceae (*Leguminosae*). Desenvolvida pela Embrapa, essa variedade é adequada para condições tropicais e apresenta um ciclo de maturação de 60 a 65 dias. A BRS Guariba destaca-se pela boa produtividade, resistência a doenças e tolerância ao estresse hídrico e altas temperaturas. As plantas dessa variedade têm porte médio, vagens curtas e escuras, e grãos de cor creme e formato alongado.

Nos dois ciclos de cultivo de feijão-caupi e coentro, as sementes foram semeadas diretamente nos vasos, sendo colocadas cinco sementes por recipiente. Após a germinação e estabilização das plântulas, foi realizado o desbaste, mantendo apenas a planta mais vigorosa em cada vaso, momento em que foi iniciada a diferenciação dos tratamentos. Durante os sete primeiros dias após a semeadura, todas as parcelas foram irrigadas com água de abastecimento.

A adubação de plantio foi realizada em todas as parcelas no momento da semeadura. A adubação de cobertura foi realizada apenas nos vasos dos tratamentos testemunha.

A semeadura do primeiro ciclo do feijão-caupi ocorreu no dia 8 de maio de 2024. O experimento que utilizou biocarvão da casca de laranja foi colhido no dia 15 de julho de 2024, enquanto o que utilizou biocarvão de casca de coco foi colhido no dia 25 do mesmo mês. No ciclo subsequente, o plantio foi feito em 9 de setembro de 2024, com a colheita ocorrendo em 19 de novembro de 2024 para ambos os experimentos com biocarvão.

Para o cultivo do coentro, o primeiro ciclo teve início em 8 de setembro de 2024, com colheita realizada em 18 de outubro de 2024. Já o segundo ciclo foi

semeado no dia 28 de outubro de 2024 e colhido no dia 6 de dezembro de 2024, tanto para os tratamentos com biocarvão da casca de laranja quanto de coco.

Não foi necessário realizar controle químico de pragas ou doenças em nenhum dos cultivos.

O nível de contaminação microbiológica foi expresso pelos indicadores *Salmonella* spp. e Coliformes a 45 °C. Foram coletadas amostras das parcelas que possuíam lâmina de irrigação igual a 100% da ETc. As amostras consistiram em grãos de feijão-caupi colhidos ao final do ciclo de cultivo. Após a colheita, os grãos foram de acordo com seu tratamento, acondicionados em sacos plásticos estéreis devidamente identificados, cada um contendo cerca de 100 g de material. As amostras foram mantidas sob refrigeração a aproximadamente 4 °C e encaminhadas ao laboratório de microbiologia do ITPS. A interpretação e comparação dos valores obtidos foram realizadas com base nos critérios estabelecidos pela Instrução Normativa nº 161, de 1º de julho de 2022, do Ministério da Saúde (BRASIL, 2022a), atualmente vigente, que revogou a Resolução-RDC nº 12, de 02 de janeiro de 2001, da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Adicionalmente, a RDC nº 12/2001 (BRASIL, 2001), foi utilizada como referência técnica complementar, para fins comparativos, especialmente no que se refere aos limites anteriormente estabelecidos para coliformes a 45 °C.

No cultivo do feijão-caupi, foram avaliadas as seguintes características agronômicas: altura de planta (AP), número de folhas (NF), número de vagens (NV), grãos por vagem (GV), grãos por planta (GP), massa seca de vagens (MSV), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade do uso de água (PA). No procedimento da colheita, as plantas foram cortadas, separando-se a parte aérea e a raiz. A massa fresca da parte aérea, a altura da planta, o número de folhas e o número de vagens por unidade foram conferidas. Em seguida, as amostras da parte aérea e das vagens foram colocadas em sacos de papel e conduzidas para o laboratório do Departamento de Engenharia Agrônoma da UFS, onde secaram em estufa com ventilação forçada de ar, à temperatura de 65 °C, durante 72 horas. Após essa etapa, foram determinadas a massa seca da parte aérea e das vagens e o número de grãos por vagem e por planta. A produtividade do uso da água foi calculada pela relação entre a quantidade de massa vegetal colhida e o volume total de água consumido durante o ciclo.

No cultivo do coentro, foram avaliadas as seguintes características agronômicas: altura de planta (AP), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade do uso da água (PA). Os procedimentos de colheita e de determinação da massa seca foram realizados da mesma forma descrita para o feijão-caupi, incluindo o corte das plantas, separação da parte aérea e das raízes, pesagem da massa fresca, secagem em estufa com ventilação forçada de ar a 65 °C por 72 h e posterior determinação da massa seca. A produtividade do uso da água foi calculada conforme metodologia adotada para o feijão-caupi.

3.2.7. Estimativa da demanda hídrica

O cálculo da demanda hídrica da cultura foi realizado por meio do método direto, no qual cada vaso tinha a sua massa medida diariamente. A diferença entre a massa atual do vaso e a massa do vaso em condições de capacidade de campo correspondeu à perda de água por evapotranspiração. Assim, a evapotranspiração da cultura em qualquer período compreendido entre duas irrigações é dada pela Equação 1.

$$ET_c = CC - U_a + P_i \quad (1)$$

Em que:

ET_c é a evapotranspiração da cultura (L vaso⁻¹);

CC a massa do vaso na capacidade de campo (kg);

U_a a massa do vaso na umidade atual (kg);

e P_i a massa da planta no dia atual (kg).

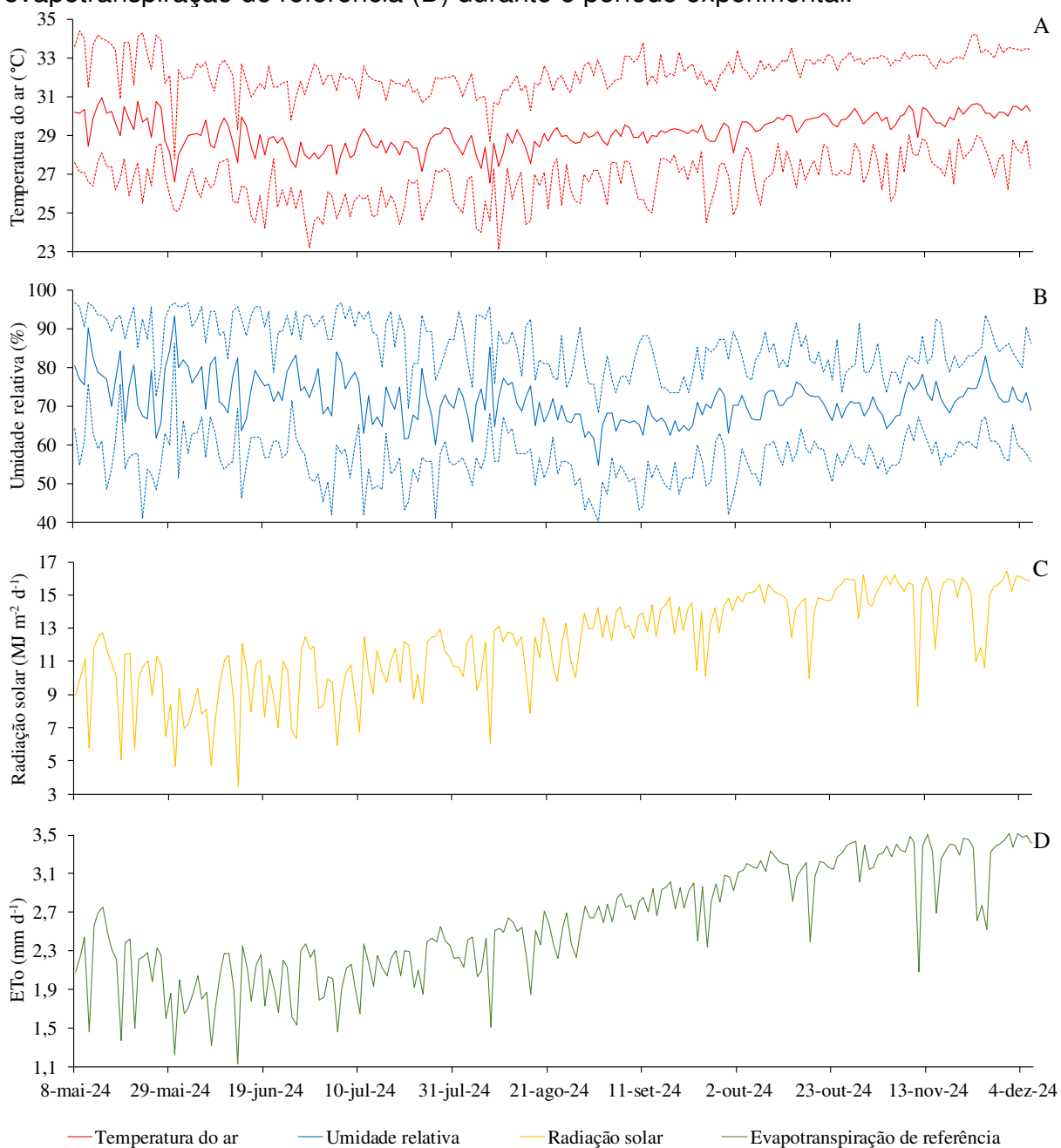
Em cada ciclo, para ajustar a variação de massa do vaso em função do crescimento da planta, foram plantadas, ao lado do experimento, mudas da mesma cultura utilizada. Todos os dias, uma planta era selecionada, sua parte aérea era separada e sua massa medida. Essa massa da planta estimada foi então inserida na equação.

A irrigação foi realizada manualmente, aplicando diretamente em cada vaso o volume de água correspondente à evapotranspiração estimada para cada tratamento. Esse procedimento foi realizado diariamente para repor a evapotranspiração da cultura e elevar a umidade do solo à capacidade de campo. A reposição da água foi realizada com o vaso posicionado sobre a balança, para melhor precisão do volume a ser aplicado. Foram usadas provetas graduadas de 100 mL para uma aplicação mais precisa. A aplicação localizada da água diretamente no solo dos vasos buscou simular condições semelhantes ao manejo de irrigação por gotejamento, no qual a água é fornecida de forma pontual e controlada na zona radicular das plantas, evitando o molhamento da parte aérea.

3.2.8. Dados meteorológicos

A temperatura média diária do ar e a umidade relativa foram calculadas a partir de todas as medições registradas ao longo de cada dia, enquanto os valores mínimos e máximos corresponderam aos extremos observados no mesmo intervalo. A radiação solar diária foi obtida pela integração dos registros realizados a cada 5 minutos durante um período de 24 horas. A partir dessas variáveis, a evapotranspiração de referência foi estimada pelo método de Penman-Monteith (PEREIRA et al., 2025). Os comportamentos dos dados meteorológicos estão apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Valores diários máximos, médios e mínimos da temperatura do ar (A) e da umidade relativa (B), bem como valores acumulados diários de radiação solar (C) e evapotranspiração de referência (D) durante o período experimental.



Nota: Temperatura do ar mínima, média e máxima do ar, com destaque em vermelho mais intenso para T média. Umidade relativa mínima, média e máxima do ar, com destaque em azul mais intenso para U média.

No primeiro ciclo experimental com feijão-caupi fertirrigado por biofiltro de casca de laranja, os valores mínimos, médios e máximos observados foram de 23,20; 28,91 e 34,40 °C para a temperatura do ar; 40,95; 75,24 e 96,60% para a umidade relativa do ar; 3,48; 9,34 e 12,73 MJ m⁻² d⁻¹ para a radiação solar e 1,12;

2,01 e 2,75 mm d⁻¹ para a evapotranspiração de referência, respectivamente. No segundo ciclo, os valores mínimos, médios e máximos foram de 27,16; 29,55 e 32,66 °C para a temperatura do ar; 55,71; 69,74 e 81,96% para a umidade relativa do ar; 8,28; 14,41 e 16,24 MJ m⁻² d⁻¹ para a radiação solar e 2,08; 3,09 e 3,50 mm d⁻¹ para a evapotranspiração de referência, respectivamente.

Para o experimento com feijão-caupi fertirrigado por biofiltro de casca de coco, as condições meteorológicas foram semelhantes às observadas para o biofiltro de casca de laranja. Houve pequenas variações apenas nas médias do primeiro ciclo, que foram de 28,83 °C para temperatura do ar, 74,56% para umidade relativa, 9,50 MJ m⁻² d⁻¹ para radiação solar e 2,03 mm d⁻¹ para a evapotranspiração de referência, mantendo-se os mesmos intervalos mínimos e máximos. No segundo ciclo, os valores foram os mesmos que os registrados no experimento com biofiltro de casca de laranja.

No experimento com coentro, as datas de início e término foram coincidentes para ambos os biofiltros. No primeiro ciclo, a temperatura do ar variou de 24,50 a 33,80 °C, com média de 29,29 °C, enquanto a umidade relativa oscilou entre 42,00 e 91,35%, com média de 68,96%. A radiação solar diária variou de 9,99 a 15,66 MJ m⁻² d⁻¹ (média de 13,90 MJ m⁻² d⁻¹), e a evapotranspiração de referência apresentou valores entre 2,34 e 3,33 mm d⁻¹, com média de 2,95 mm d⁻¹. No segundo ciclo, observaram-se temperaturas entre 27,76 e 33,13 °C (média de 30,06 °C) e umidade relativa entre 59,09 e 83,24% (média de 72,14%). A radiação solar diária variou de 8,28 a 16,43 MJ m⁻² d⁻¹, com média de 14,95 MJ m⁻² d⁻¹, enquanto a evapotranspiração de referência oscilou de 2,08 a 3,52 mm d⁻¹, com média de 3,27 mm d⁻¹.

3.2.9. Análises das fontes hídricas

As fontes hídricas aplicadas no estudo foram avaliadas por meio de análises físicas, químicas e microbiológicas. Para as características físicas e químicas, foram verificados os seguintes parâmetros: pH, condutividade elétrica (CE), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), oxigênio dissolvido (OD) e fósforo total. A análise microbiológica concentrou-se na detecção dos níveis populacionais de coliformes termotolerantes. É importante ressaltar que a

água de consumo humano, fornecida pela concessionária, não passou por uma análise microbiológica. Isso se deve ao fato de que, por ser considerada potável, presume-se, conforme a legislação vigente, que a água esteja em conformidade com os padrões microbiológicos estabelecidos para o abastecimento público, estando, portanto, isenta de agentes patogênicos.

As amostras foram coletadas quinzenalmente ao longo de cada ciclo de cultivo, acondicionadas em recipientes padronizados de aproximadamente 1 litro e entregues ao laboratório no mesmo dia da coleta, seguindo os procedimentos estabelecidos pelo ITPS. Os resultados foram comparados com os padrões de qualidade estabelecidos para as diferentes classes de corpos de água doce superficiais, conforme a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 (BRASIL, 2005), e a Resolução complementar nº 430, de 13 de maio de 2011 (BRASIL, 2011). Como referência complementar, também foram consideradas diretrizes internacionais relacionadas à qualidade da água para irrigação e reúso agrícola, incluindo as recomendações clássicas da FAO descritas por Ayers e Westcot (1985), bem como orientações publicadas pela Organização Mundial da Saúde (WHO, 2006), pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2012) e pela União Europeia (EUROPEAN UNION, 2020).

Durante a condução dos experimentos, os níveis de pH, condutividade elétrica (CE), temperatura (°C) e salinidade das fontes hídricas foram monitorados diariamente. Esses parâmetros, indicadores da qualidade da água, foram medidos com um medidor multiparâmetros SensoDirect 150, que possui software intuitivo, display de fácil visualização, maleta com eletrodos, soluções de calibração e acessórios para coleta de dados em tempo real.

Embora o experimento tenha sido conduzido em ambiente protegido, a temperatura e a radiação solar puderam afetar diretamente os níveis dos parâmetros verificados. Os resultados foram então comparados com os padrões estabelecidos para as três classificações de água doce para irrigação, de acordo com as resoluções mencionadas.

3.2.10. Análises estatísticas

As variáveis agronômicas e do solo foram submetidas à análise de variância (ANOVA) com um nível de significância de 5% no teste F. Para verificar a homogeneidade das variâncias, foi aplicado o teste de Bartlett também a 5% de significância. O teste de Shapiro-Wilk foi utilizado para avaliar a normalidade dos dados, com um nível de significância de 5%.

Considerando os objetivos do estudo e o interesse em compreender o comportamento das variáveis em função dos fatores avaliados, optou-se por desdobrar as interações entre os fatores. Essa decisão foi adotada independentemente de as interações apresentarem significância estatística na ANOVA, procedendo-se à análise detalhada dos efeitos simples.

A comparação entre a testemunha e os demais tratamentos foi realizada pelo teste de Dunnett, com um nível de significância de 5%. Para a comparação das médias entre as diferentes fontes hídricas, foi utilizado o teste de Tukey, também ao nível de 5% de significância. No caso dos fatores quantitativos, os modelos foram selecionados com base nos coeficientes de determinação (r^2), na significância dos coeficientes de regressão e na relevância biológica.

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R, versão 3.6.3, e as plotagens dos gráficos de regressão foram feitas com o software SigmaPlot, versão 15.0.

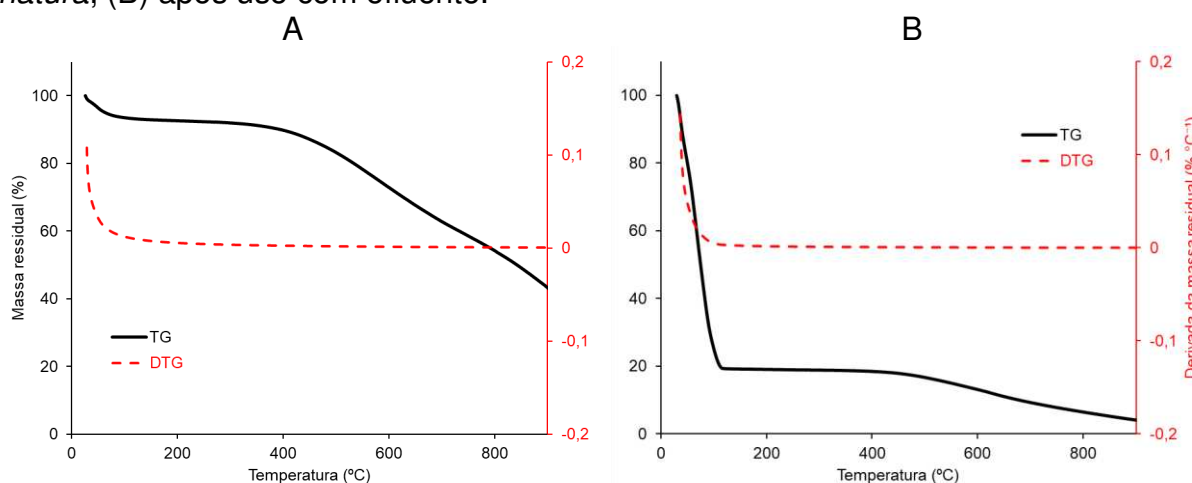
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização dos biocarvões

4.1.1. Análise termogravimétrica (ATG)

Nos gráficos a seguir (Figura 4) visualizam-se a perda de massa (%) em função da temperatura (°C), com a curva termogravimétrica (TG) (linha contínua) e a derivada da curva termogravimétrica (DTG, linha tracejada). Observa-se que, na Figura 4A, há três regiões principais de perda de massa, enquanto na Figura 4B, identificam-se duas regiões principais. A análise termogravimétrica (ATG) dos biocarvões de casca de coco *in natura* (Figura 4A) e após o uso como elemento filtrante (Figura 4B) evidenciou alterações na estabilidade térmica provocadas pela passagem da água residuária, com destaque para diferenças no comportamento térmico, especialmente nas faixas iniciais de degradação.

Figura 4 – Curvas termogravimétricas dos biocarvões de casca de coco: (A) *in natura*; (B) após uso com efluente.



Nas faixas de temperatura mais baixas (de 30 °C até 143 °C) o biocarvão de casca de coco que filtrou efluente da ETE teve perda de massa inicial de 7,026 mg (76,39%). Em compensação, em uma faixa semelhante de temperatura (26 °C a 100 °C), a perda de massa do biocarvão de coco *in natura* foi menor, correspondendo a 0,381 mg (5,84%). Essa diferença sugere que o biocarvão utilizado na filtração do

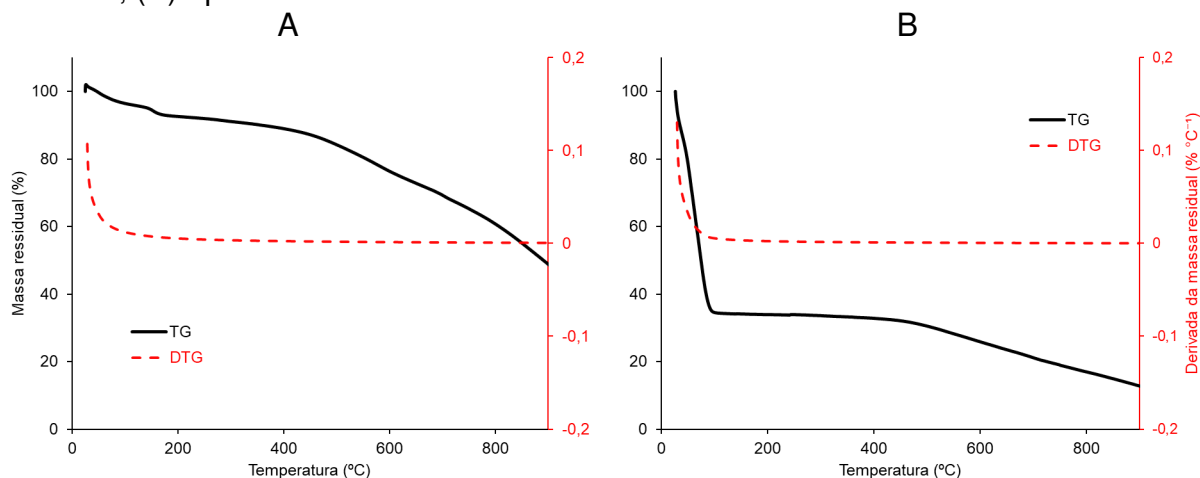
efluente reteve mais substâncias voláteis, água e possivelmente mais compostos orgânicos.

Na faixa média de temperatura (de 365 °C até 865 °C para o biocarvão pós-efluente e de 361 °C até 661 °C para o *in natura*), perdas de 1,267 mg (13,78%) e 1,593 mg (24,40%) foram detectadas, respectivamente. Essa degradação pode ser atribuída à decomposição da parte carbonácea do material, especialmente resíduos de celulose e lignina. Resultados semelhantes foram observados por Hanif et al. (2023), que reportaram perda expressiva de massa entre as temperaturas de 300 °C a 450 °C, associada à degradação da hemicelulose e celulose.

Na última faixa, entre 818 °C e 996 °C, apenas o biocarvão de casca de coco não tratado apresentou perda considerável de massa (1,337 mg, representando 20,48%), enquanto o material pós-efluente apresentou maior estabilidade térmica, não mostrando perda relevante nesta fase. Esse comportamento reforça os achados de Pang et al. (2021), que observaram início de decomposição a partir de 350 °C e resíduo final de 42% a 1000 °C, indicando boa resistência térmica do biocarvão de coco.

Nos gráficos referentes às Figuras 5A e 5B, são visualizadas a perda de massa (%) em função da temperatura (°C), com a curva termogravimétrica (linha contínua) e a derivada da curva termogravimétrica (linha tracejada). Observa-se que, em ambas as figuras, há duas regiões principais de perda de massa. A ATG evidenciou diferenças nos comportamentos térmicos dos biocarvões produzidos a partir do bagaço de laranja *in natura* (Figura 5A) e após a passagem da água residuária (Figura 5B), evidenciando alterações na composição e estabilidade dos materiais.

Figura 5 - Curvas termogravimétricas (TG) dos biocarvões de bagaço de laranja: (A) *in natura*; (B) após uso com efluente.



No intervalo de temperatura inicial, associado à liberação de umidade e compostos voláteis leves, o biocarvão de laranja, após a passagem do efluente doméstico, mostrou uma redução de massa de 62,02%, de 27 °C a 119 °C (Figura 5B), indicando uma alta instabilidade térmica inicial. Isso pode estar relacionado à adsorção de compostos orgânicos ou à maior capacidade de reter água e sais presentes no efluente, mesmo após a secagem do material. Já o biocarvão da laranja *in natura* nas mesmas faixas foi significativamente menor, apenas 7,95% de 25 °C a 192 °C (Figura 5A), o que sugere uma maior estabilidade térmica inicial e menor quantidade de compostos voláteis ou água remanescente.

Em temperaturas elevadas, o padrão é o oposto. Foi constatada uma perda de massa de 48,60% no biocarvão de laranja *in natura* na faixa de temperatura de 448 °C a 976 °C, ao passo que uma perda de 23,45% no biocarvão pós-efluente foi encontrada em uma faixa de temperatura de 450 °C a 986 °C, indicando que a passagem do efluente pode ter contribuído para as mudanças estruturais na matriz do biocarvão, incluindo a formação de compostos mais estáveis ou a incorporação de minerais que fazem a matriz do biocarvão perder peso mais lentamente em temperaturas mais altas.

Os resultados estão de acordo com os achados de Kalengyo et al. (2024) e Souza et al., (2022), que observaram que o biocarvão de laranja *in natura* é mais sensível à degradação térmica, enquanto o biocarvão após utilização como elemento filtrante apresentou maior estabilidade, possivelmente devido a modificações estruturais durante o uso como elemento filtrante.

4.1.2. Comparativo entre biocarvões: estabilidade térmica e adsorção

Ao comparar os biocarvões de casca de coco e da casca de laranja (antes e depois do tratamento com efluente doméstico), observaram-se diferenças na estabilidade térmica e na capacidade de adsorção.

Na Tabela 2 apresenta-se o comparativo das perdas de massa, estabilidade térmica e capacidade de adsorção de biocarvões produzidos a partir de casca de coco e bagaço de laranja, nas condições *in natura* e após a filtragem de efluente doméstico, com base na análise termogravimétrica.

Tabela 2 - Comparativo das perdas de massa, estabilidade térmica e capacidade de adsorção de biocarvões produzidos a partir de casca de coco e bagaço de laranja, nas condições *in natura* e após a filtragem de efluente doméstico, com base na análise termogravimétrica.

Propriedade/ Resultado	Coco <i>in natura</i>	Laranja <i>in natura</i>	Coco após efluente	Laranja após efluente
% perda inicial (umidade)	5,84%	7,95%	76,39%	62,02%
% perda orgânica intermediária	24,40%	48,60%	13,78%	23,45%
Carbono fixo / estabilidade térmica	Alta	Média	Reduzida	Reduzida
Adsorção de compostos do efluente	Moderada	Alta	Evidente	Evidente

O biocarvão de coco *in natura* apresentou a menor perda de massa na faixa inicial de temperatura, de 5,84%, indicando baixa capacidade de retenção de umidade. Na faixa intermediária, a perda foi de 24,40%, associada à decomposição de compostos orgânicos ainda presentes após a pirólise. Esses resultados refletem o maior teor de carbono fixo do material, o que contribui para sua estabilidade estrutural e integridade física, características importantes para sua utilização como elemento filtrante (SOUZA, PASSOS e GONÇALVES, 2023; TADESSE, HUANG e ZHOU, 2025).

O biocarvão de bagaço de laranja *in natura* apresentou perdas mais elevadas. Na etapa inicial, a redução de massa foi de 7,95%, enquanto na faixa intermediária atingiu 48,60%. Esses valores indicam menor grau de carbonização em relação ao biocarvão de casca de coco, provavelmente devido à composição da

biomassa e à estrutura lignocelulósica da laranja, que retém frações orgânicas menos resistentes ao calor (ATINAFU et al., 2025; ĐUKANOVIĆ et al., 2025).

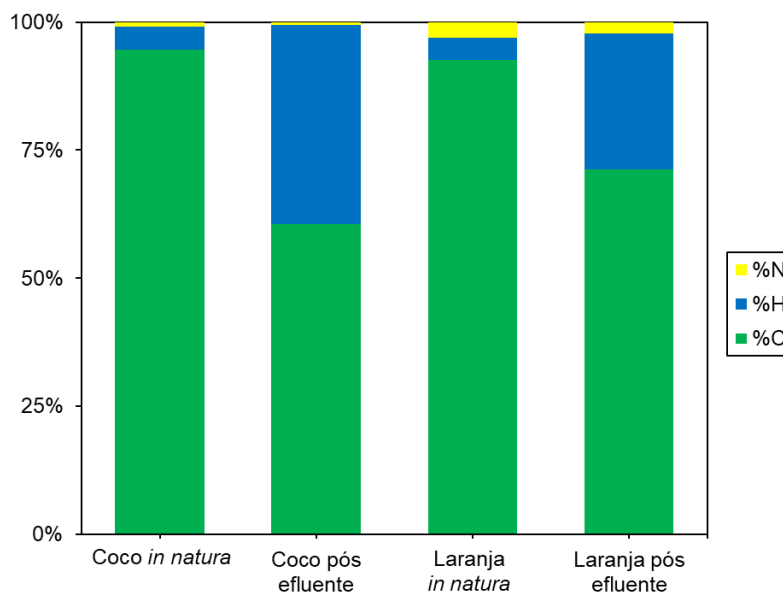
Após a utilização como biofiltro do efluente doméstico, ambos os biocarvões apresentaram alterações em seu comportamento térmico. O biocarvão de coco mostrou perda inicial de 76,39%, principalmente devido à liberação de água e de compostos voláteis adsorvidos durante o contato com o efluente. Como consequência, a estabilidade térmica nas faixas iniciais de temperatura foi reduzida, embora o material tenha apresentado menor variação de massa em temperaturas mais elevadas.

O biocarvão de laranja, após o contato com o efluente, apresentou perda inicial de 62,02%, associada à adsorção de água e compostos orgânicos, que alteraram sua matriz. Na faixa intermediária, a perda de massa foi de 23,45%, valor inferior ao observado no material *in natura*. Esses resultados indicam que, apesar da menor estabilidade inicial, o biocarvão se mostra mais resistente ao aquecimento nas faixas de temperatura mais elevadas, refletindo mudanças estruturais provocadas pelo uso como meio filtrante.

4.1.3. Análise elementar CNH

A análise elementar evidenciou diferenças nos teores de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) dos biocarvões de casca de coco e de bagaço de laranja, antes e após a utilização como elementos filtrantes. Na Figura 6 apresentam-se os resultados das análises.

Figura 6 - Composição elementar de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) dos biocarvões de casca de coco e bagaço de laranja, antes e após a utilização na filtragem de efluente doméstico.



O biocarvão *in natura* de casca de coco apresentou a maior concentração de carbono (70,22%), seguido pelo biocarvão de bagaço de laranja *in natura* (65,82%). Essa diferença está associada à composição original das biomassas. A casca de coco possui maior teor de lignina. Esses compostos são mais resistentes à degradação térmica, favorecendo a formação de carbono fixo após a pirólise. No bagaço de laranja predominam celulose, hemicelulose e compostos voláteis. Esses componentes são degradados com maior facilidade durante o aquecimento, limitando a retenção de carbono no biocarvão. Corroborando os resultados observados, Rizzioli et al., (2024), Salam et al., (2022) e El-Gamal et al., (2017) relatam que biocarvões produzidos a 550 °C tendem a apresentar elevados teores de carbono em função da degradação térmica da matéria orgânica e da concentração do carbono fixo.

Após o processo de filtragem, foi observada uma redução no teor de carbono dos biocarvões. O biocarvão de coco reduziu para 14,06%, enquanto o de laranja reduziu para 22,15%. Essa diminuição pode estar relacionada à incorporação de compostos provenientes do efluente, ricos em oxigênio, hidrogênio e nitrogênio. Esses compostos alteram a composição elementar do material. A deposição de matéria orgânica e o recobrimento da superfície do biocarvão também podem contribuir para a diluição relativa do teor de carbono. Segundo Qiu et al. (2023), o

contato do biocarvão com efluentes provoca modificações na superfície do material, o que pode alterar sua composição elementar e reduzir o teor de carbono.

Nos biocarvões utilizados na filtração, observou-se aumento nos teores de hidrogênio. No biocarvão de casca de coco, o teor de H passou de 3,34% para 9,05%. Já no biocarvão de bagaço de laranja, o valor aumentou de 3,12% para 8,21%. Esse comportamento indica maior retenção de compostos orgânicos e de umidade após o uso como elemento filtrante. Todos os biocarvões foram produzidos sob as mesmas condições de pirólise, e as diferenças observadas estão relacionadas exclusivamente ao uso do material na filtração do efluente doméstico. Poopisut et al., (2023) observaram que biocarvões produzidos a 550 °C readquirem umidade quando expostos ao ambiente, influenciando sua composição elementar.

Em relação ao nitrogênio, foi observada diminuição dos teores após o processo de filtração. No biocarvão de casca de coco, o teor reduziu de 0,70% para 0,14%. No biocarvão de bagaço de laranja, a redução ocorreu de 2,14% para 0,71%. Esse comportamento pode estar relacionado à lixiviação de compostos nitrogenados mais solúveis durante a filtração do efluente. É possível, também, que transformações químicas desses compostos tenham ocorrido ao longo do processo. A incorporação de outros elementos à matriz do biocarvão contribui para a redução relativa do teor de nitrogênio. Resultados semelhantes foram relatados por Poopisut et al., (2023) para biocarvões produzidos a 550 °C, que apresentaram altos teores de carbono e menores concentrações de hidrogênio e nitrogênio.

4.1.4. Fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDX)

Na Tabela 3 apresentam-se a composição elementar do biocarvão de casca de coco, determinada por Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (EDX), para as amostras *in natura* e após a utilização como elemento filtrante de efluente doméstico. Os dados permitem comparar as variações nos teores dos principais elementos químicos presentes no material antes e após o contato com o efluente, evidenciando possíveis processos de adsorção, dessorção ou solubilização de espécies minerais.

Tabela 3 - Composição elementar (%) determinada por Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (EDX) do biocarvão de casca de coco *in natura* e após a utilização como elemento filtrante de efluente doméstico.

Parâmetro	Coco <i>in natura</i> (%)	Coco após efluente (%)
K	68,420	4,650
Cl	23,273	-
Ca	5,726	70,079
P	1,183	-
Fe	0,620	13,978
S	0,396	-
Zn	0,152	6,921
Cu	0,071	4,373
Br	0,061	-
Ag	0,056	-
Rb	0,027	-
Sr	0,015	-

- : concentração abaixo do limite de detecção.

Observa-se na Tabela 3 que o biocarvão de coco apresentava 68,42% de teor de potássio e esse valor foi reduzido para 4,65% após a passagem do efluente. Também foi notado o desaparecimento de elementos como cloro, fósforo e enxofre após a filtragem do efluente doméstico. Essas mudanças podem indicar a dessorção ou solubilização desses sais durante o processo de filtragem. Biswal e Balasubramanian (2023) relataram um comportamento similar ao de íons solúveis em biocarvões quando submetidos à interação com águas residuárias.

Por outro lado, o aumento expressivo dos teores de cálcio (de 5,73% para 70,08%), ferro, zinco e cobre no biocarvão de coco indica um processo eficiente de adsorção desses elementos presentes no efluente de esgoto doméstico. Esse acúmulo foi também observado por Mian et al. (2024), que utilizaram a técnica EDX para demonstrar a retenção de Ca, Fe, Zn e Cu em biocarvões aplicados no tratamento de efluentes agroindustriais. De forma semelhante, Khan et al., (2024) atribuíram a retenção ao acúmulo de minerais e à presença de grupos funcionais na matriz carbonácea. Sahoo, Kale e Chowdhury (2023) também observaram mudanças na composição superficial de adsorventes após o contato com efluentes, com acúmulo de minerais detectado por EDX, corroborando os processos identificados neste estudo.

Na Tabela 4 apresentam-se os resultados da análise EDX do biocarvão de bagaço de laranja *in natura* e após o uso na filtragem do efluente doméstico. A

comparação entre as duas condições possibilitou avaliar as alterações na composição elementar do material decorrentes do contato com o efluente, bem como identificar a retenção ou liberação de elementos potencialmente relevantes para a aplicação do biocarvão no tratamento de águas residuárias e na fertirrigação.

Tabela 4 - Composição elementar (%) determinada por Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (EDX) do biocarvão de bagaço de laranja *in natura* e após a utilização como elemento filtrante de efluente doméstico.

Parâmetro	Laranja <i>in natura</i> (%)	Laranja após efluente (%)
K	59,426	11,176
Ca	37,911	84,034
P	1,544	0,765
S	0,366	-
Fe	0,334	2,298
Sr	0,192	1,728
Cu	0,078	-
Zn	0,077	-
Rb	0,073	-

- : concentração abaixo do limite de detecção.

No biocarvão de bagaço de laranja, o teor de cálcio aumentou de forma acentuada após o uso como elemento filtrante. O valor passou de 37,91% na amostra *in natura* para 84,03% após o contato com o efluente doméstico. Também foram observados aumentos nos teores de ferro e estrôncio. Esse comportamento indica a retenção de íons presentes no efluente pela matriz do biocarvão, processo que pode ocorrer por diferentes mecanismos, como adsorção física nos poros do material, interações eletrostáticas entre íons e grupos funcionais da superfície do biocarvão e possíveis processos de troca iônica. Resultados semelhantes foram descritos por Khan et al. (2024) e Mian et al. (2024) em estudos de adsorção multielementar em águas residuárias.

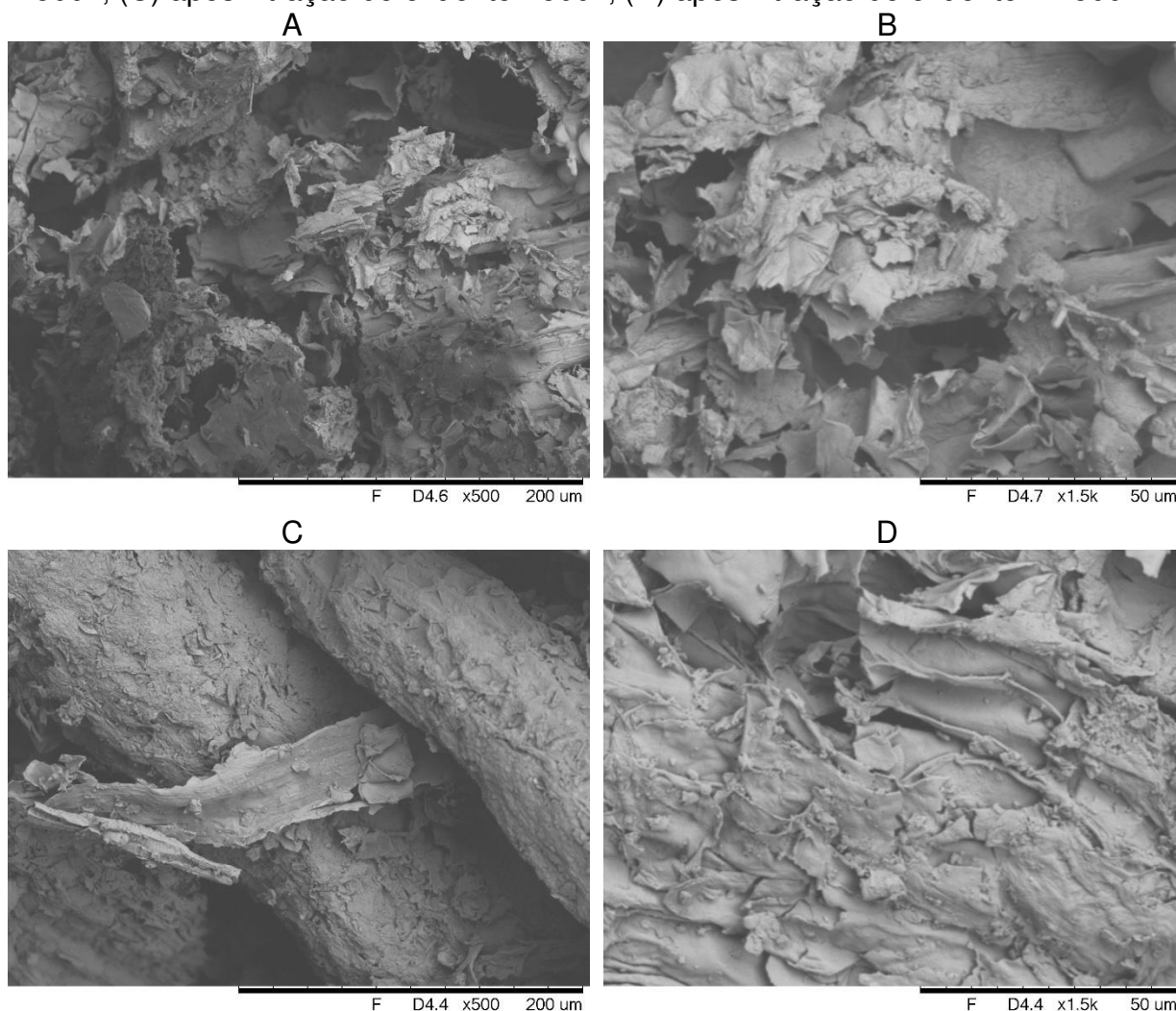
Adicionalmente, foi constatada uma redução nos teores de potássio (59,43% para 11,18%) e fósforo (1,54% para 0,77%) após a filtragem. Esses resultados indicam a dessorção desses elementos ou sua liberação para o efluente, possivelmente devido à sua maior solubilidade ou afinidade com a matriz aquosa. Este comportamento pode afetar a composição do efluente que será usado para fertirrigação, aumentando a presença de nutrientes como P e K na água. A redução do teor de enxofre e a ausência de metais como Cu e Zn sugerem uma possível restrição na absorção de determinados compostos pela estrutura do biocarvão de

laranja. Isso pode estar relacionado a diferenças na sua morfologia e funcionalidade superficial em relação ao biocarvão do coco.

4.1.5. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi empregada com o objetivo de comparar a morfologia dos biocarvões de casca de coco e de bagaço de laranja *in natura* e após sua utilização como meio filtrante de efluente doméstico. Na Figura 7 apresentam-se as micrografias de MEV do biocarvão de casca de coco, obtidas antes e após a filtração do efluente, em diferentes ampliações, possibilitando a visualização detalhada da estrutura porosa e das modificações ocorridas após o uso como filtro.

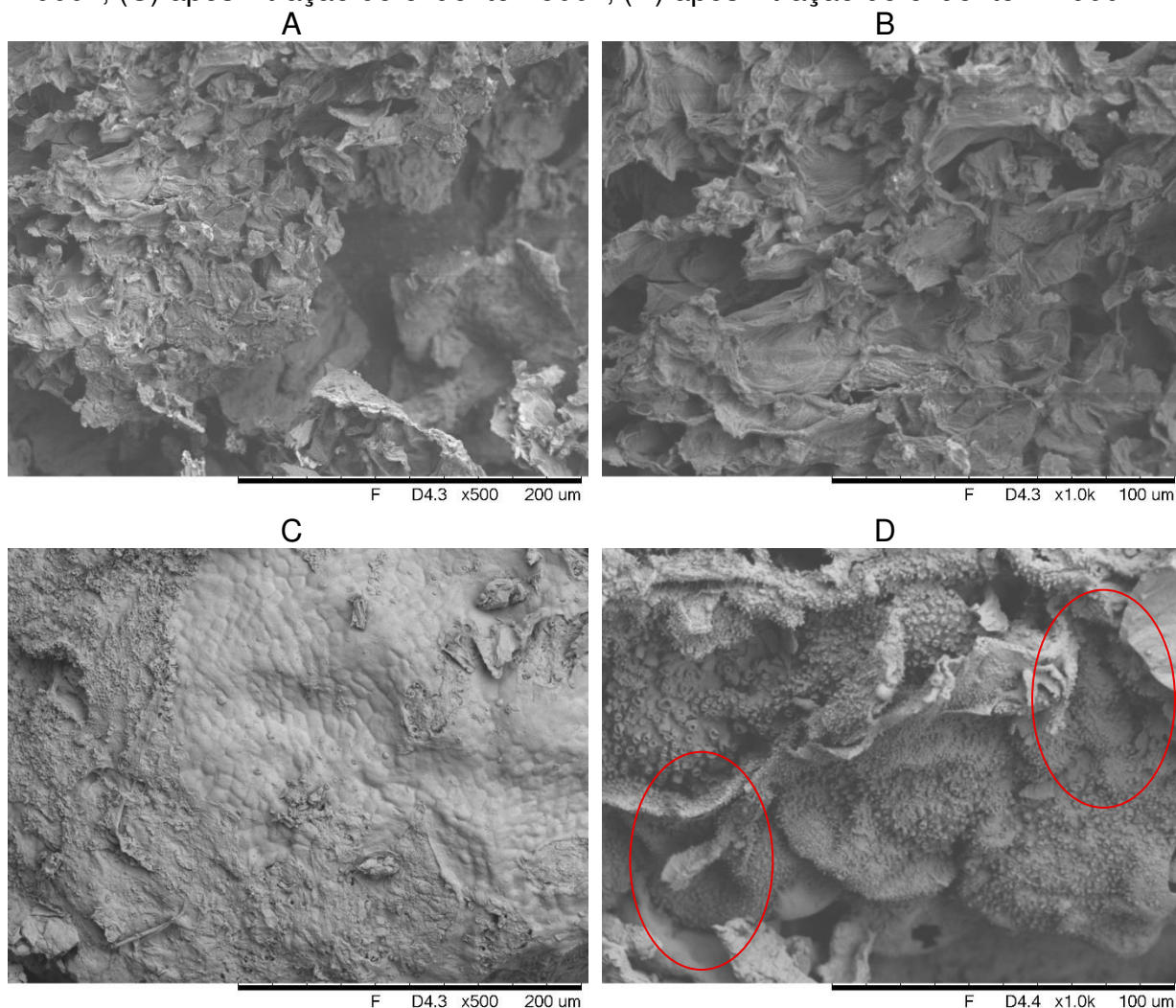
Figura 7 – Micrografias de MEV do biocarvão de casca de coco *in natura* e após a filtração do efluente, em diferentes condições: (A) *in natura* - 500x; (B) *in natura* - 1.500x; (C) após filtração do efluente - 500x; (D) após filtração do efluente - 1.500x.



O biocarvão de casca de coco *in natura* apresentou estrutura altamente porosa, com cavidades interconectadas e paredes celulares bem definidas. Essa morfologia é típica de materiais carbonizados de origem lignocelulósica. Após o uso como meio filtrante, observaram-se mudanças pontuais na superfície do material. Em maior ampliação, algumas regiões apresentam material aderido, enquanto certas cavidades mostram menor definição quando comparadas ao biocarvão original. Parte dessas estruturas aparenta preenchimento parcial, o que sugere a ocupação dos poros por partículas e substâncias presentes no efluente. Esse comportamento pode estar relacionado à retenção de matéria orgânica e de sólidos suspensos ao longo do processo de filtração.

Na Figura 8 apresentam-se as micrografias de MEV do biocarvão de bagaço de laranja, antes e após a filtração do efluente, permitindo comparar a distribuição dos poros e as alterações morfológicas induzidas pelo processo de tratamento.

Figura 8 – Micrografias de MEV do biocarvão de bagaço de laranja *in natura* e após a filtração do efluente, em diferentes condições: *in natura* - 500x; (B) *in natura* - 1.000x; (C) após filtração do efluente - 500x; (D) após filtração do efluente - 1.000x



Círculos destacam regiões com presença de material aderido à superfície e cavidades com preenchimento parcial após a filtração do efluente.

O biocarvão de bagaço de laranja *in natura* apresentou superfície irregular, com cavidades e vazios distribuídos de forma heterogênea. Após o uso como meio filtrante, as micrografias revelam alterações na morfologia do material, caracterizadas pela presença de material aderido à superfície e pela redução da evidência visual das cavidades, quando comparadas ao material *in natura*. Em maior ampliação, observa-se que parte dessas estruturas apresenta preenchimento

parcial, sugerindo a ocupação de poros por partículas e substâncias provenientes do efluente. Ressalta-se que a análise por MEV permite apenas uma avaliação qualitativa dessas alterações, não sendo possível quantificar o grau de obstrução apenas com base nas imagens.

4.1.6. Parâmetros texturais e isotermas de adsorção

Os parâmetros texturais dos biocarvões obtidos pelas análises BET e BJH estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros texturais dos biocarvões.

Amostra	Área BET (m ² g ⁻¹)	Volume específico* de poros (cm ³ g ⁻¹)	Raio médio dos poros** (nm) (Ads./Dess.)
Coco <i>in natura</i>	20,66	0,00643	1,823 / 7,807
Coco pós-efluente	65,77	0,01513	1,798 / 1,794
Laranja <i>in natura</i>	2,34	0,00250	1,828 / 4,328
Laranja pós-efluente	2,88	0,00282	1,829 / 4,321

* Volume específico de poros obtido pelo método BJH cumulativo de adsorção.

** Raio de poro pelo método BJH (adsorção e dessorção), expresso em nanômetros (nm).

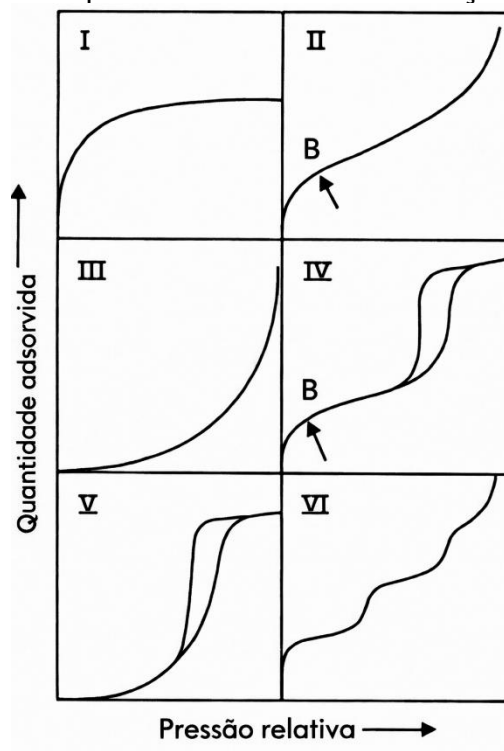
O biocarvão de coco apresentou área superficial de 20,66 m² g⁻¹ no material *in natura*, com volume de poros de 0,00643 cm³ g⁻¹ e raio médio de 1,82 nm (adsorção). Após a filtragem do efluente doméstico da ETE, a área BET aumentou para 65,77 m² g⁻¹ e o volume específico de poros para 0,01513 cm³ g⁻¹, sem alteração expressiva do raio médio, que permaneceu em torno de 1,8 nm. Esse resultado sugere que parte dos resíduos remanescentes da pirólise pode ter sido removida ou que poros antes obstruídos foram liberados. Os valores de raio médio dos poros, variando aproximadamente entre 1,8 e 7,8 nm, situam-se na faixa de micro a mesoporos segundo a classificação da IUPAC, o que é compatível com o comportamento observado nas isotermas do tipo IV discutidas posteriormente.

Em contrapartida, o biocarvão de casca de laranja apresentou área superficial muito inferior, com 2,34 m² g⁻¹ no estado *in natura* e um discreto aumento para 2,88 m² g⁻¹ após a passagem do efluente. O volume de poros permaneceu baixo ($\leq 0,003$ cm³ g) e o raio médio dos poros, embora semelhante ao do coco ($\approx 1,8$ nm por adsorção), revelou valores elevados na dessorção (4,3 nm), indicando instabilidade ou a existência de poros com gargalos fechados.

Para interpretar as isotermas de adsorção de N₂ obtidas neste estudo, é fundamental compreender a classificação proposta pela IUPAC. Ela categoriza as

isotermas em diferentes tipos com base nas características dos materiais adsorventes. Na Figura 9 estão apresentados os seis tipos principais de isotermas definidos por Sing et al., (1985), servindo como referência para a análise dos dados experimentais.

Figura 9 - Classificação dos tipos de isotermas de adsorção segundo a IUPAC.

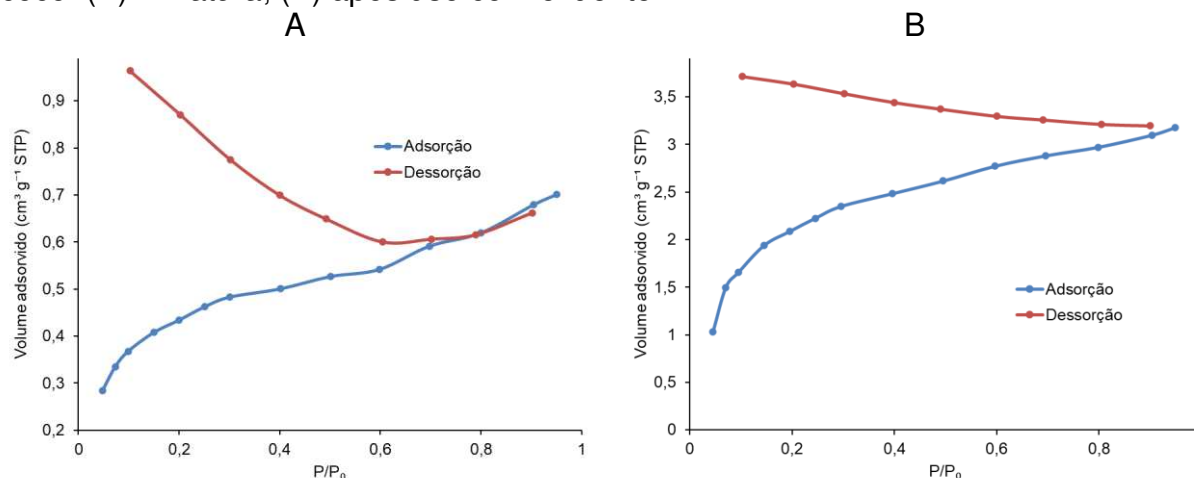


- I: Isoterma do tipo I (microporosos);
- II: Isoterma do tipo II (superfícies não porosas ou macroporosas);
- III: Isoterma do tipo III;
- IV: Isoterma do tipo IV (mesoporosos, com histerese);
- V: Isoterma do tipo V;
- VI: Isoterma do tipo VI (adsorção em multicamadas).

Fonte: Adaptado de SING et al., (1985).

Na Figura 10 são apresentadas as isotermas de adsorção e dessorção obtidas para o biocarvão de coco. Elas possibilitam a avaliação do comportamento do material antes e depois da filtragem do efluente, evidenciando mudanças em sua estrutura porosa.

Figura 10 - Isotermas de adsorção e dessorção de N_2 do biocarvão da casca do coco: (A) *in natura*; (B) após uso com efluente.

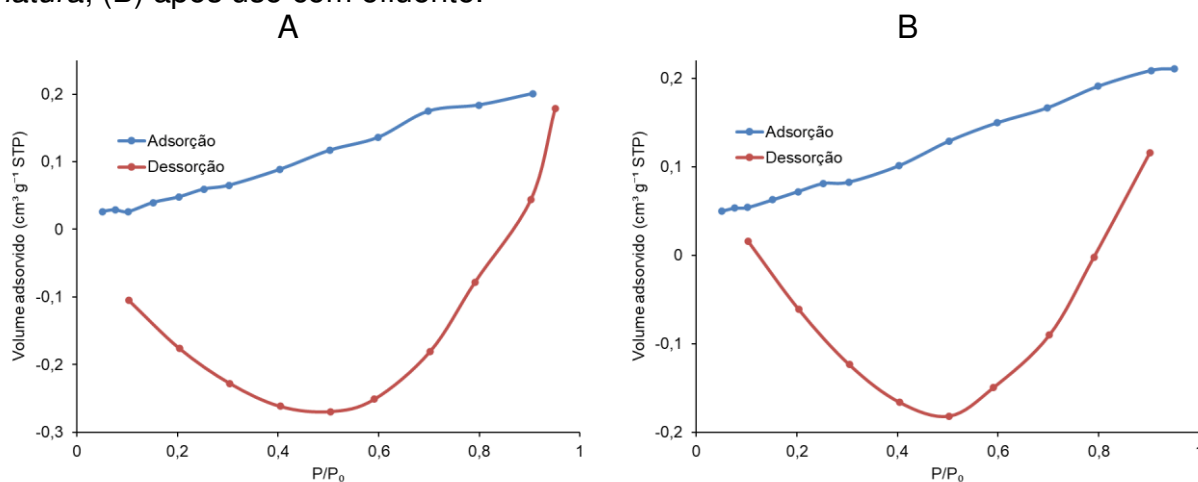


As isotermas de adsorção (Figura 10) demonstram padrão característico do Tipo IV da classificação da IUPAC, com histerese entre os ramos de adsorção e dessorção (do tipo H4), confirmando a presença predominante de mesoporos e uma estrutura porosa complexa com poros do tipo fenda. Esse comportamento ficou ainda mais evidente após a passagem do efluente, demonstrando o aumento na capacidade de retenção de adsorvato.

Resultados semelhantes foram descritos por Kalengyo et al., (2024) em biocarvões de casca de laranja, nos quais o uso em efluentes promoveu aumento da área superficial e do volume de poros. Embora a biomassa seja diferente, os autores associam esse efeito à interação entre o biocarvão e o meio líquido. Esse mecanismo ajuda a explicar o comportamento observado no biocarvão de casca de coco neste estudo. Além disso, Mohamed et al., (2025) relataram que modificações estruturais em biocarvões provenientes de resíduos alimentares aumentaram sua área específica e eficiência de adsorção. Essas observações indicam que o biocarvão da casca do coco, além de manter sua estrutura, também pode apresentar aumento de sua área superficial após o uso, favorecendo sua reutilização em sistemas de tratamento de águas residuárias.

Na Figura 11 estão apresentadas as isotermas de adsorção e dessorção do biocarvão de casca de laranja, possibilitando a análise das mudanças estruturais que ocorreram após a filtração do efluente.

Figura 11 - Isotermas de adsorção e dessorção de N₂ do biocarvão de laranja: (A) *in natura*; (B) após uso com efluente.



As isotermas de adsorção (Figura 11) apresentaram perfil semelhante ao Tipo II da IUPAC, típico de materiais pouco porosos ou com poros não acessíveis. O comportamento irregular das curvas de dessorção, incluindo valores negativos, indica uma instabilidade estrutural, condensação capilar incompleta e limitada interação entre a fase gasosa e a superfície do biocarvão. Isso sugere que o biocarvão de bagaço de laranja possui estrutura pouco desenvolvida, com limitada capacidade de adsorção.

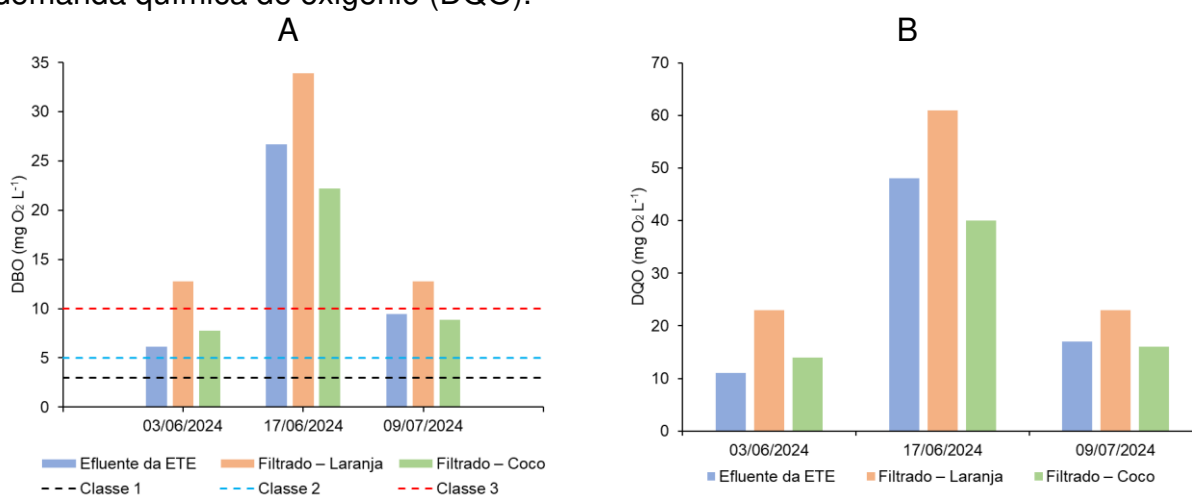
Esse desempenho é coerente com os resultados de Hua, Pan e Hong (2023), que reportaram áreas BET abaixo de 3 m² g⁻¹ para biocarvões de bagaço de laranja mesmo após ativação química. Já Zhang et al., (2022) demonstraram que modificação química pode elevar expressivamente a área superficial dos biocarvões (> 1000 m² g⁻¹), ressaltando que o resíduo de laranja tem potencial, mas requer tratamentos específicos para atingir desempenho eficiente. Biswal e Balasubramanian (2023) também confirmam que biocarvões agrícolas sem ativação costumam apresentar áreas entre 2 e 25 m² g⁻¹, o que valida os dados obtidos neste estudo.

4.2. Ensaio experimental

4.2.1. Caracterização das fontes hídricas utilizadas na fertirrigação

Na Figura 12 estão apresentados os valores de DBO e DQO obtidos nas análises quinzenais das fontes hídricas. São comparados o efluente doméstico da ETE (antes da filtragem) e os efluentes após a filtragem com biocarvões de casca de coco e de bagaço de laranja. Esses resultados permitiram avaliar o desempenho dos sistemas na redução da carga orgânica.

Figura 12 - Indicadores de matéria orgânica no efluente doméstico da ETE (antes da filtragem) e nos efluentes filtrados com biocarvões de casca de coco e de bagaço de laranja ao longo do experimento: (A) demanda bioquímica de oxigênio (DBO); (B) demanda química de oxigênio (DQO).



Os valores de demanda bioquímica de oxigênio ao longo das coletas (Figura 12A) mostraram que o efluente doméstico continha presença significativa de matéria orgânica biodegradável, com pico de $26,67 \text{ mg L}^{-1}$ em 17/06. Segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, águas doces destinadas à irrigação convencional devem ter DBO máxima de 10 mg L^{-1} para se enquadrar na Classe 3. Na primeira coleta, em 03/06, o efluente doméstico da ETE apresentou $6,11 \text{ mg L}^{-1}$, e o efluente filtrado com biocarvão de coco teve $7,78 \text{ mg L}^{-1}$, ambos dentro desse limite. O mesmo ocorreu em 09/07, após a troca dos filtros em 03/07, com DBO de $9,44 \text{ mg L}^{-1}$ no efluente doméstico e $8,89 \text{ mg L}^{-1}$ no efluente tratado com coco. Embora esses limites legais se refiram à irrigação de água limpa, o foco deste estudo é a fertirrigação com efluentes tratados, que exige atenção adicional à matéria orgânica. Nesse contexto, o biocarvão de coco mostrou capacidade de reduzir a carga orgânica, principalmente após a renovação do material filtrante. Por exemplo, na coleta de 09/07, a DBO foi reduzida de $9,44$ para $8,89 \text{ mg L}^{-1}$, correspondendo a uma remoção aproximada de 5,8%.

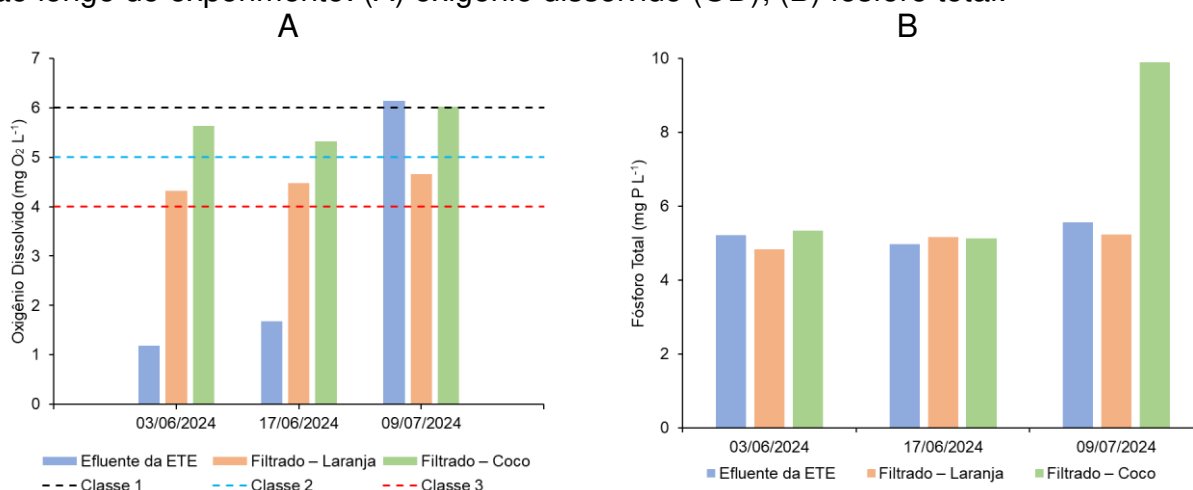
O tratamento com biocarvão de laranja apresentou os maiores valores de DBO em todas as datas, variando de 12,78 a 33,89 mg L⁻¹, sem atender ao padrão da Classe 3 em nenhum momento. Esse comportamento sugere menor eficiência do material na remoção da matéria orgânica biodegradável. A liberação de compostos residuais do próprio biocarvão poderia ocorrer, mas considerando a relação entre a massa do filtro e o volume de efluente, esse efeito provavelmente é pouco significativo. Essa liberação inicial também foi observada por El Barkouti et al. (2025) em biocarvões derivados de biomassa orgânica. Apesar de todos os valores estarem dentro do limite de 60 mg L⁻¹ estabelecido pela Resolução CONAMA nº 430/2011 para o despejo de efluentes em corpos receptores, o uso pretendido neste trabalho é a fertirrigação, exigindo padrões mais restritivos. Dessa forma, o sistema filtrante com coco mostrou maior potencial para adequar a água residuária aos requisitos legais e práticos para reúso agrícola seguro.

Os valores de demanda química de oxigênio observados nas amostras (Figura 12B) refletem a carga orgânica total presente na água, incluindo frações biodegradáveis e não biodegradáveis. Na coleta de 03/06, o efluente filtrado com biocarvão de coco apresentou DQO levemente superior ao do efluente doméstico (14 e 11 mg L⁻¹, respectivamente), possivelmente devido à liberação inicial de compostos residuais do material filtrante, conforme relatado por El Barkouti et al. (2025). Nas coletas seguintes, o sistema com coco demonstrou melhor desempenho, reduzindo a DQO de 48 para 40 mg L⁻¹ em 17/06 (remoção de aproximadamente 16,7%) e de 17 para 16 mg L⁻¹ em 09/07 (remoção de cerca de 5,9%), resultado que pode ter sido favorecido pela troca dos filtros realizada em 03/07. Esse comportamento foi igualmente observado por Perez-Mercado et al., (2018) em sistemas de biocarvões aplicados ao tratamento descentralizado. O biocarvão de laranja, por outro lado, apresentou os maiores valores de DQO em todas as coletas, chegando a 61 mg L⁻¹ em 17/06, sem apresentar reduções consistentes em relação ao efluente doméstico. Essa variação entre materiais também foi destacada por Soundari e Prasanna (2025), que relacionaram a eficiência do biocarvão à sua matéria-prima, área superficial e estabilidade térmica. Embora a DQO não seja um parâmetro regulado pela legislação para lançamento de efluentes ou uso na irrigação, ela é amplamente utilizada como indicador da carga poluente total e da eficiência de tratamento. Etedali e Eslamian (2020) mostraram que adsorventes naturais removem até 79% da DQO de efluentes. Nesse sentido,

os menores valores obtidos com o biocarvão de coco reforçam seu potencial como material filtrante para o tratamento complementar de águas residuárias visando ao reúso agrícola.

Na Figura 13 apresentam-se os resultados de oxigênio dissolvido (OD) e fósforo total nas fontes hídricas ao longo do experimento. Esses parâmetros permitiram avaliar, respectivamente, as condições de oxigenação da água e a carga nutricional associada ao uso do efluente tratado na fertirrigação.

Figura 13 - Indicadores de oxigenação e carga nutricional no efluente doméstico bruto e nos efluentes filtrados com biocarvões de casca de coco e bagaço de laranja ao longo do experimento: (A) oxigênio dissolvido (OD); (B) fósforo total.



Os resultados de oxigênio dissolvido (Figura 13A) indicaram que o efluente da ETE apresentou níveis baixos nas duas primeiras coletas (1,19 e 1,68 mg L⁻¹), evidenciando baixa disponibilidade de oxigênio dissolvido no meio aquático. Esses valores indicam condições de reduzida oxigenação, comuns em efluentes com elevada carga orgânica, nas quais o consumo de oxigênio pelos microrganismos durante a degradação da matéria orgânica tende a superar sua reposição no sistema. Esses resultados são incompatíveis com qualquer classe de água doce para irrigação. Os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 determinam valores não inferiores a 6, 5 e 4 mg L⁻¹ de O₂ para as classes 1, 2 e 3, nesta ordem.

Depois de filtrados, ambos os materiais aumentaram os níveis de OD. O biocarvão de coco se destacou, alcançando os maiores valores em todas as datas, chegando a 6,02 mg L⁻¹ em 09/07 (representando um aumento superior a 250%), o

que enquadra o efluente na Classe 1. Já o biocarvão de laranja resultou em valores entre 4,32 e 4,66 mg L⁻¹, compatíveis com a Classe 3.

Apesar disso, observou-se que o efluente doméstico da ETE apresentou valores menores de DBO e DQO em comparação ao efluente filtrado com biocarvão de laranja. Isso pode parecer contraintuitivo, já que se espera que maior carga orgânica leve a menor OD. Portanto, essa discrepância pode ser explicada pelo armazenamento do efluente doméstico em uma caixa d'água próxima ao ambiente protegido, onde ele permaneceu por algum tempo antes da coleta e análise. Durante esse período, processos biológicos naturais podem ter consumido parte da matéria orgânica biodegradável, reduzindo a DBO e DQO medidos.

Por outro lado, o efluente filtrado com biocarvão de laranja foi coletado e filtrado imediatamente, mas pode ter liberado compostos residuais orgânicos do próprio material filtrante. Isso resultou em valores mais altos de DBO e DQO no efluente filtrado, mesmo com níveis superiores de OD. Essa liberação temporária de compostos é conhecida em biocarvões derivados de biomassa e já foi relatada em estudos similares, nos quais o biocarvão aumentou inicialmente o carbono orgânico dissolvido em água antes de estabilizar o processo de adsorção (SAARELA et al., 2020; SCHREITER et al., 2020; ZHOU et al., 2024).

É importante destacar que os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 referem-se à classificação e aos padrões de qualidade de corpos de água, não sendo normas específicas para o uso de efluentes em fertirrigação. No presente estudo, o foco é a fertirrigação com efluentes tratados, que contêm nutrientes dissolvidos e podem modificar as propriedades físico-químicas da solução. Por isso, a comparação com esses valores deve ser interpretada apenas como referência de qualidade da água, sendo realizada com cautela. Mesmo assim, os resultados mostram que ambos os sistemas filtrantes melhoram a oxigenação da água. O biocarvão de coco teve desempenho melhor, principalmente após a troca do filtro em 03/07.

Os valores de fósforo total nas amostras (Figura 13B) superaram os limites da Resolução CONAMA nº 357/2005 para ambientes lênticos, como lagoas e reservatórios, os quais recomendam concentrações máximas de 0,020, 0,030 e 0,050 mg L⁻¹ para as classes 1, 2 e 3, respectivamente. Como o efluente tratado ficou armazenado por longos períodos em uma caixa d'água antes do uso nos

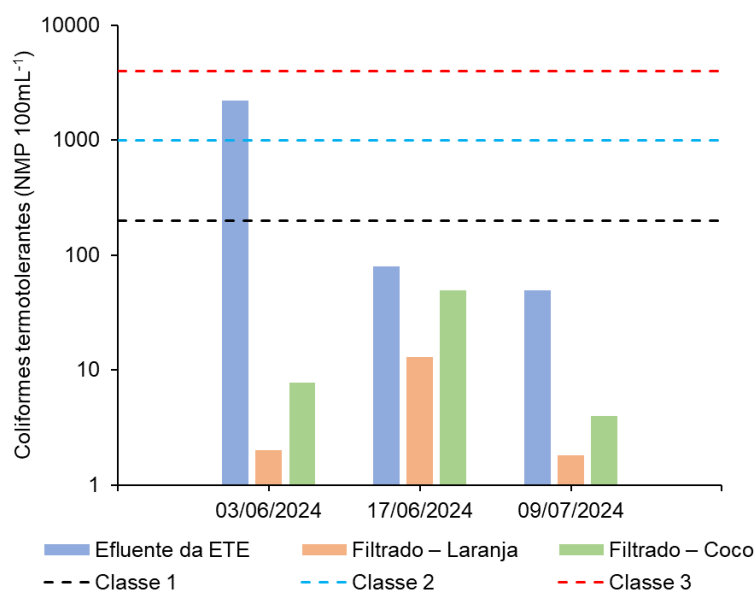
experimentos, optou-se por considerar essa classificação, que reflete melhor as condições práticas.

O efluente da ETE apresentou concentrações entre 4,98 e 5,56 mg L⁻¹, indicando uma alta carga de nutrientes. Após a filtração, os valores permaneceram elevados nos tratamentos com biocarvão de bagaço de laranja (4,84 a 5,24 mg L⁻¹) e com biocarvão de casca de coco (5,13 a 9,90 mg L⁻¹), sendo este último responsável pelo pico em 09/07. Esse aumento pode indicar a liberação de fósforo previamente adsorvido ou saturação do meio filtrante. Souza et al., (2022) também observaram variações de fósforo em efluentes tratados com biocarvão de laranja, sugerindo possível dessorção.

Embora os valores estejam fora dos padrões estabelecidos, é importante ressaltar que este é um nutriente fundamental para as plantas. Seu reaproveitamento por meio da fertirrigação pode ser vantajoso, desde que seja feito um manejo adequado para prevenir perdas e minimizar impactos ambientais, como a eutrofização de corpos hídricos próximos.

Na Figura 14 visualiza-se o nível populacional de coliformes termotolerantes nas diferentes fontes hídricas avaliadas. Os resultados foram comparados com os limites definidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, permitindo avaliar a eficácia dos sistemas filtrantes na remoção de microrganismos patogênicos. Eles mostraram uma redução substancial da carga microbológica após o uso dos sistemas filtrantes. A Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece valores máximos de 200, 1000 e 4000 NMP 100 mL⁻¹ para as classes 1, 2 e 3, respectivamente, para coliformes termotolerantes em águas doces destinadas à irrigação.

Figura 14 - Contagem de coliformes termotolerantes no efluente doméstico da ETE e nos efluentes filtrados com biocarvões de casca de coco e bagaço de laranja ao longo do experimento.



Na primeira coleta, o efluente da ETE apresentou 2200 NMP 100 mL⁻¹, valor que se enquadra na Classe 3, mas excede os limites das classes 1 e 2. Já nas coletas seguintes (17/06 e 09/07), os valores do efluente foram de 79 e 49 NMP 100 mL⁻¹, atendendo inclusive à Classe 1. Após a passagem pelos filtros, os valores apresentaram redução acentuada. O biocarvão de coco apresentou 7,8; 49,0 e 4,0 NMP 100 mL⁻¹ e o biocarvão de laranja apresentou os menores valores, com 2,0; 13,0 e 1,8 NMP 100 mL⁻¹ nas respectivas datas. Ambos os sistemas atenderam aos limites estabelecidos para a Classe 1 ao longo de todas as coletas. Considerando a primeira amostragem, em que o efluente doméstico da ETE apresentou 2200 NMP 100 mL⁻¹, a passagem pelo biofiltro de coco reduziu a contagem para 7,8 NMP 100 mL⁻¹ (remoção aproximada de 99,6%), enquanto o biofiltro de laranja reduziu para 2,0 NMP 100 mL⁻¹ (remoção superior a 99,9%), evidenciando elevada eficiência microbiológica dos sistemas filtrantes.

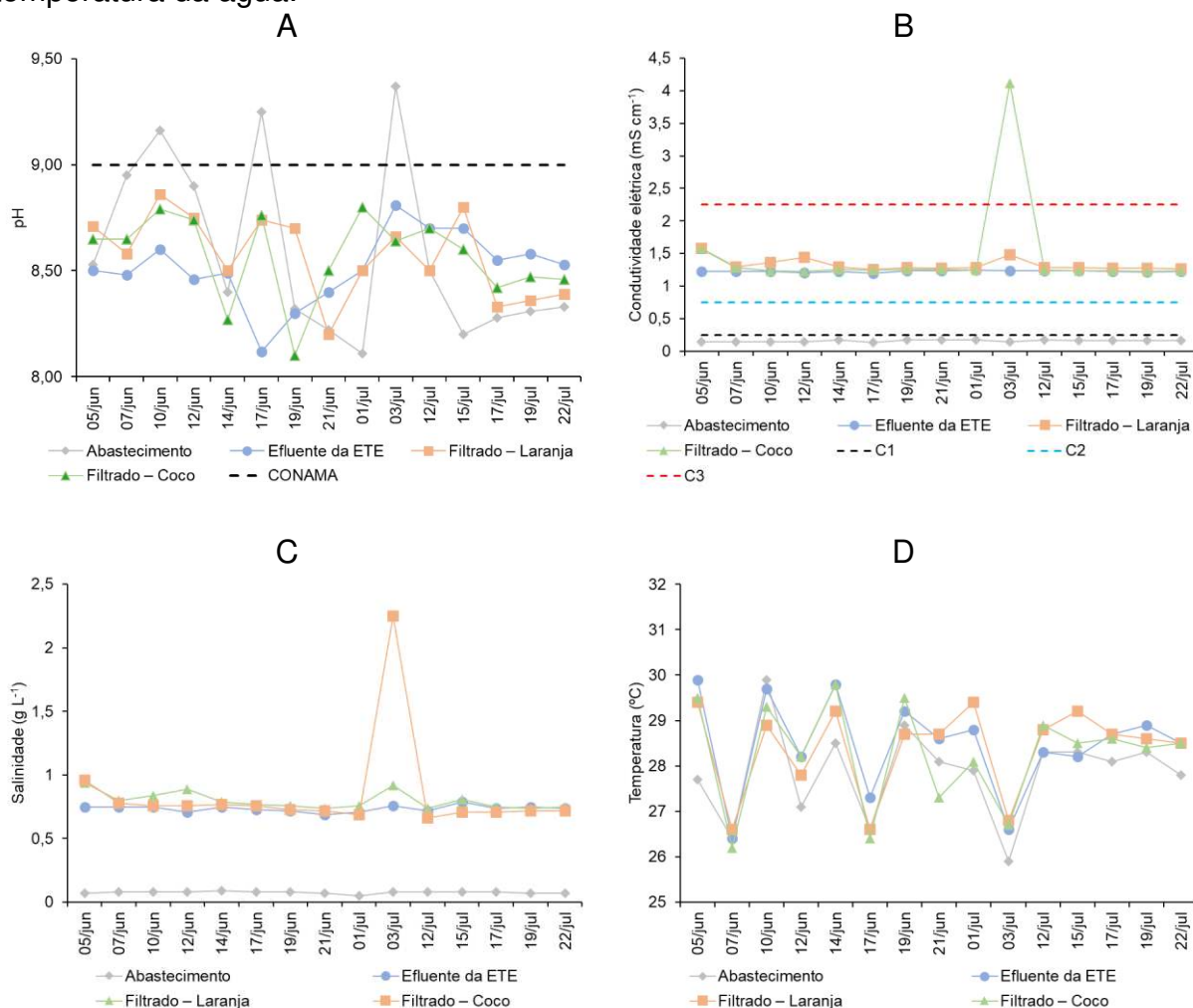
Apesar de ter apresentado os piores resultados nos parâmetros físico-químicos, como DBO e DQO, o biocarvão de laranja demonstrou o melhor desempenho na remoção microbiológica, o que reforça seu potencial específico para controle sanitário. Esses resultados indicam que ambos os sistemas são eficazes na remoção de patógenos, com destaque para o material de laranja, e podem ser

utilizados com segurança no reúso agrícola, desde que associados a monitoramento regular da qualidade da água.

A elevada remoção de coliformes termotolerantes observada nos biofiltros pode ser atribuída a diferentes mecanismos físicos e químicos associados ao biocarvão. A estrutura altamente porosa do material favorece processos de filtração física e adsorção, nos quais microrganismos presentes no efluente podem ficar retidos nos poros e nas superfícies do material. Além disso, o pH naturalmente alcalino do biocarvão pode contribuir para a redução da viabilidade de alguns microrganismos. Interações eletrostáticas entre a superfície do biocarvão e as células bacterianas também podem favorecer a adsorção e retenção dos coliformes, reduzindo sua presença no efluente filtrado. Estudos recentes relatam que biocarvões aplicados em sistemas filtrantes podem promover elevada remoção microbiológica justamente pela combinação desses processos de retenção física, adsorção superficial e condições químicas menos favoráveis à sobrevivência (ASLAM et al., 2025; BUI et al., 2024; HE et al., 2025).

Durante o experimento, foram monitorados diariamente quatro parâmetros físico-químicos das fontes hídricas utilizadas: pH, condutividade elétrica (CE), salinidade e temperatura da água. Na Figura 15 é apresentada a variação desses indicadores ao longo do tempo, permitindo avaliar a estabilidade e a influência dos sistemas filtrantes sobre a qualidade da água destinada à fertirrigação.

Figura 15 - Variação dos parâmetros físico-químicos no efluente doméstico da ETE e nos efluentes filtrados com biocarvões de casca de coco e bagaço de laranja ao longo do experimento (A) pH; (B) condutividade elétrica; (C) salinidade; (D) temperatura da água.



Os valores de pH das quatro fontes hídricas monitoradas diariamente ao longo do experimento (Figura 15A) oscilaram entre 8,10 e 9,37, com predominância de características levemente alcalinas. De acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005, águas doces destinadas à irrigação devem apresentar pH na faixa de 6,0 a 9,0, limite que foi respeitado por todas as amostras de efluente da ETE e pelos efluentes tratados com biocarvão de coco e de laranja. Apenas a água de abastecimento ultrapassou esse limite superior em algumas datas, como em 10/06 (9,16), 17/06 (9,25) e 03/07 (9,37), podendo representar risco pontual de alcalinização, especialmente em solos com baixa resistência à variação do pH.

Conforme Ayers e Westcot (1985), a faixa ideal de pH para irrigação situa-se entre 6,5 e 8,4 dentro da qual a disponibilidade de nutrientes essenciais no solo tende a ser maior. Os resultados obtidos para o efluente da ETE e para os

tratamentos com biocarvão ficaram, em geral, muito próximos ou ligeiramente acima desse intervalo técnico. Isso pode reduzir a disponibilidade de micronutrientes como ferro e manganês, embora sem representar, isoladamente, limitação severa ao uso agrícola. A troca dos filtros em 03/07 não alterou significativamente os valores de pH nas águas filtradas, sugerindo estabilidade química do sistema. Assim, pode-se considerar que, com exceção da água de abastecimento, as demais fontes mantiveram pH compatível com os usos agrícolas, sobretudo quando aplicadas em solos bem tamponados.

A condutividade elétrica das fontes hídricas monitoradas ao longo do experimento (Figura 15B) variou de acordo com as características de cada fonte. A água de abastecimento apresentou os menores valores ($0,1388$ a $0,1741$ mS cm^{-1}), sendo enquadrada na classe C1 (salinidade baixa), segundo a classificação do Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos (RICHARDS, 1954), o que caracteriza uso irrestrito para irrigação. Já o efluente doméstico variou entre $1,196$ e $1,242$ mS cm^{-1} , sendo classificado como C3 (salinidade alta), recomendando-se uso com cautela, principalmente em solos com drenagem limitada. Após a filtração com biocarvão, os valores de CE se mantiveram estáveis no sistema com laranja ($1,259$ a $1,582$ mS cm^{-1}). No sistema com biocarvão de coco, houve um pico isolado de $4,12$ mS cm^{-1} no dia 03/07, coincidindo com a troca do filtro, o que pode indicar a liberação temporária de sais retidos no novo material. Desconsiderando esse valor atípico, os dados do coco ficaram entre $1,235$ e $1,571$ mS cm^{-1} , semelhantes ao efluente da ETE. Conforme Ayers e Westcot (1985), águas com CE entre $0,7$ e $3,0$ mS cm^{-1} exigem manejo moderado, como o uso de irrigação localizada, drenagem eficiente e a escolha de culturas com tolerância média à salinidade. Embora os sistemas filtrantes não tenham promovido reduções significativas na CE, os valores permaneceram tecnicamente aceitáveis para uso agrícola, desde que aliado a práticas de manejo adequadas.

Ressalta-se que, no segundo ciclo experimental, foram registradas maiores médias de radiação solar e de evapotranspiração de referência em comparação ao primeiro ciclo (Figura 3). Em condições de maior demanda evaporativa, a concentração de sais na solução do solo pode ser intensificada, mesmo quando a água aplicada apresenta CE dentro de faixas consideradas manejáveis. Assim, a interpretação dos efeitos agronômicos deve considerar a interação entre qualidade da água e ambiente atmosférico ao longo dos ciclos de cultivo.

Os valores de salinidade observados durante o experimento (Figura 15C) oscilaram entre 0,05 e 2,25 g L⁻¹. A água destinada ao abastecimento humano apresentou os valores mais baixos (0,05 a 0,09 g L⁻¹), sendo classificada como de salinidade extremamente baixa, tornando seu uso irrestrito, inclusive em solos e culturas sensíveis (AYERS e WESTCOT, 1985; BERNARDO et al., 2019). O efluente doméstico da ETE apresentou salinidade de 0,69 a 0,79 g L⁻¹, e os tratamentos com biocarvão mantiveram valores semelhantes. O sistema com biocarvão de coco se destacou, tendo um pico pontual de 2,25 g L⁻¹ no dia 03/07, atribuído, possivelmente, à troca do filtro. Excluindo esse ponto, a salinidade da água filtrada variou de 0,66 a 0,96 g L⁻¹. De acordo com Ayers e Westcot (1985), valores abaixo de 0,7 g L⁻¹ não representam restrição para irrigação. Entre 0,7 e 2,0 g L⁻¹, é necessária atenção com a cultura e o manejo. Considerando que as culturas utilizadas no experimento foram o feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) e o coentro (*Coriandrum sativum*), ambas com tolerância moderada à salinidade, os dados indicam que as águas tratadas com biocarvão, especialmente a de laranja, podem ser utilizadas de forma segura na fertirrigação, desde que associadas a práticas de manejo hídrico adequadas. Além disso, a estabilidade dos valores ao longo do tempo reforça o potencial desses sistemas para o reúso agrícola controlado.

Ao longo do experimento, a temperatura da água medida nas fontes hídricas (Figura 15D) variou entre 25,9 °C e 29,9 °C, com oscilações compatíveis com as condições ambientais e os horários de coleta. A água de abastecimento apresentou as temperaturas mais baixas possivelmente devido à sua menor exposição ao calor externo. O efluente da ETE e as águas tratadas com biocarvão exibiram valores mais elevados, especialmente nos dias mais quentes. Segundo Bernardo et al., (2019), a faixa ideal de temperatura da água para irrigação situa-se entre 20 °C e 30 °C, sendo atendido por todas as amostras ao longo do experimento. Dentro dessa faixa, a temperatura da água não compromete a solubilidade de oxigênio, a absorção de nutrientes nem a saúde microbiológica do solo. Além disso, a substituição dos filtros em 03/07 não provocou alterações relevantes no perfil térmico das águas tratadas. Dessa forma, os resultados indicam que, do ponto de vista térmico, todas as fontes hídricas foram adequadas para uso na fertirrigação das culturas testadas.

4.2.2. Características agronômicas do feijão-caupi fertirrigado com água residuária filtrada pelo biocarvão de laranja

Os resultados obtidos para os nove parâmetros avaliados encontram-se na Tabela 6, que apresenta os quadrados médios, a significância do teste F e os valores médios de cada variável nos dois ciclos de cultivo. Nessa tabela é possível visualizar de forma integrada o desempenho das três fontes hídricas aplicadas em diferentes proporções, facilitando a identificação dos efeitos da qualidade da água e das diluições sobre o crescimento vegetativo, a produção e a eficiência do uso da água pelo feijão-caupi.

Tabela 6 - Quadrados médios, significância do teste F (ANOVA) e valores médios da altura de planta (AP), número de folhas (NF), número de vagens (NV), grãos por vagem (GV), grãos por planta (GP), massa seca de vagens (MSV), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade da água (PA) do feijão em diferentes ciclos de cultivo, comparando três fontes hídricas: água de abastecimento (Testemunha), água residuária tratada convencionalmente (Tratada) e água tratada e filtrada com biofiltro de biocarvão de laranja (Filtrada), ambas aplicadas em distintas proporções com água de abastecimento.

Ciclos de Cultivo		Ciclo 1		Ciclo 2			
Altura de planta (cm)	Quadrado Médio	FH	7,94 x 10 ^{3**}		1,75 x 10 ^{4**}		
		AR	3,33 x 10 ^{3**}		9,66 x 10 ^{2**}		
		FH*AR	1,17 x 10 ^{2ns}		3,43 x 10 ^{2†}		
		FH*AR*T	1,39 x 10 ^{3**}		1,72 x 10 ^{3**}		
		CV (%)	7,99		10,44		
	Fonte Hídrica	Tratada		Filtrada		Tratada	
		Dose de AR (%)	20	154,40 b	191,03 †a	69,95 b	122,68 †a
		40	131,98 b	154,85 a	58,43 b	110,08 †a	
		60	129,50 b	165,55 †a	64,08 b	110,63 †a	
		80	174,73 †b	194,90 †a	89,00 b	125,93 †a	
100		173,90 †b	199,10 †a	97,25 b	118,48 †a		
Testemunha	186,53 †		118,40 †				
Número de folhas (ud planta ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	3,03 x 10 ^{2**}		1,33 x 10 ^{2**}		
		AR	3,17 x 10 ^{1†}		3,36 x 10 ^{1**}		
		FH*AR	1,91 x 10 ^{1ns}		2,07 x 10 ^{1**}		
		FH*AR*T	4,01 x 10 ^{0ns}		8,12 x 10 ^{1**}		
		CV (%)	10,07		8,28		
	Fonte Hídrica	Tratada		Filtrada		Tratada	
		Dose de AR (%)	20	24,750 b	32,250 †a	18,750 b	27,000 †a
		40	23,750 b	33,500 †a	21,250 a	20,500 a	
		60	28,000 †a	30,000 †a	20,500 b	23,500 a	
		80	31,250 †a	35,250 †a	24,250 †b	27,750 †a	
100		28,250 †a	32,500 †a	22,500 b	26,750 †a		
Testemunha	31,000 †		28,000 †				

Continuação Tabela 6...

Ciclos de Cultivo			Ciclo 1		Ciclo 2	
Número de vagens (ud planta ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	2,03 x 10 ^{0*}		6,25 x 10 ^{-1ns}	
		AR	7,59 x 10 ^{0**}		1,00 x 10 ^{0**}	
		FH*AR	1,09 x 10 ^{0ns}		2,50 x 10 ^{-1ns}	
		FH*AR*T	3,46 x 10 ^{0**}		1,42 x 10 ^{0**}	
	CV (%)		8,55		14,32	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	7,000 †a	7,250 †a	3,500 a	3,500 a
		40	9,250 a	8,750 a	2,750 †a	2,750 †a
		60	7,250 †a	6,500 †a	3,000 †a	2,500 †a
		80	8,750 a	9,000 a	2,750 †a	2,750 †a
100		8,750 a	7,250 †b	3,000 †a	2,250 †b	
Testemunha		7,000 †		2,250 †		
Grãos por vagem (ud vagem ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	5,71 x 10 ^{0**}		2,96 x 10 ^{1**}	
		AR	6,71 x 10 ^{0**}		6,17 x 10 ^{0**}	
		FH*AR	2,38 x 10 ^{0**}		2,52 x 10 ^{0**}	
		FH*AR*T	2,15 x 10 ^{0**}		1,19 x 10 ^{0ns}	
	CV (%)		5,56		5,32	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	9,926 †b	10,863 †a	9,705 †a	10,250 †a
		40	7,806 b	8,552 a	10,911 †b	12,190 a
		60	9,823 †a	9,780 †a	8,677 b	12,250 a
		80	8,802 a	8,475 a	10,225 †b	11,850 a
100		7,500 b	9,964 †a	11,417 †b	13,000 a	
Testemunha		9,918 †		10,475 †		
Grãos por planta (ud planta ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	4,41 x 10 ^{1ns}		2,56 x 10 ^{1ns}	
		AR	1,19 x 10 ^{2ns}		5,02 x 10 ^{1**}	
		FH*AR	8,08 x 10 ^{1ns}		3,07 x 10 ^{1*}	
		FH*AR*T	2,01 x 10 ^{1ns}		2,18 x 10 ^{2**}	
	CV (%)		10,52		10,23	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	68,500 †a	78,000 †a	33,500 a	35,750 a
		40	72,250 †a	74,250 †a	29,500 †a	32,500 a
		60	69,750 †a	63,250 †a	26,000 †a	29,500 †a
		80	76,750 †a	75,500 †a	27,750 †b	32,250 a
100		65,500 †a	72,250 †a	34,250 a	29,000 †b	
Testemunha		69,250 †		23,250 †		
Massa seca de vagens (g planta ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	3,01 x 10 ^{0ns}		1,76 x 10 ^{-1ns}	
		AR	6,80 x 10 ^{0ns}		1,17 x 10 ^{0**}	
		FH*AR	2,81 x 10 ^{0ns}		3,26 x 10 ^{0**}	
		FH*AR*T	6,46 x 10 ^{0ns}		9,18 x 10 ^{0**}	
	CV (%)		13,80		6,29	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	15,603 †a	14,295 †a	8,898 a	7,728 b
		40	14,603 †a	14,458 †a	7,743 b	8,640 a
		60	14,020 †a	12,185 †a	6,890 †b	8,215 a
		80	14,835 †a	14,140 †a	7,938 b	8,883 a
100		12,295 †a	13,535 †a	8,370 a	7,035 †b	
Testemunha		15,330 †		6,445 †		

Continuação Tabela 6...

Ciclos de Cultivo			Ciclo 1		Ciclo 2	
Massa fresca da parte aérea (g planta ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	7,10 x 10 ^{2**}		1,69 x 10 ^{3**}	
		AR	1,91 x 10 ^{2*}		2,52 x 10 ^{2**}	
		FH*AR	1,12 x 10 ^{2ns}		2,83 x 10 ^{2**}	
		FH*AR*T	3,60 x 10 ^{1ns}		4,82 x 10 ^{2**}	
	CV (%)		9,14		6,74	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	72,978 †b	91,840 a	53,318 b	82,490 †a
		40	66,845 †b	79,523 †a	59,128 a	58,523 a
		60	75,608 †a	76,125 †a	63,575 a	69,875 †a
		80	83,220 †a	85,955 †a	60,175 b	80,973 †a
100		78,723 †a	86,068 †a	69,193 b	78,568 †a	
Testemunha		76,540 †		79,090 †		
Massa seca da parte aérea (g planta ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	2,66 x 10 ^{1**}		5,92 x 10 ^{1**}	
		AR	1,11 x 10 ^{1**}		1,23 x 10 ^{1**}	
		FH*AR	2,83 x 10 ^{0ns}		1,07 x 10 ^{1**}	
		FH*AR*T	3,85 x 10 ^{0ns}		1,17 x 10 ^{1**}	
	CV (%)		8,46		7,83	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	13,570 †b	16,453 a	9,415 b	15,775 †a
		40	11,573 †b	14,460 †a	10,258 a	10,875 a
		60	13,658 †a	13,968 †a	11,018 a	12,310 †a
		80	14,720 †a	15,580 †a	11,788 b	14,400 †a
100		15,385 †a	16,600 a	13,075 †a	14,355 †a	
Testemunha		13,568 †		14,120 †		
Produtividade da água (kg m ⁻³)	Quadrado Médio	FH	1,06 x 10 ^{-1**}		1,88 x 10 ^{-1**}	
		AR	4,40 x 10 ^{-2**}		3,89 x 10 ^{-2**}	
		FH*AR	1,12 x 10 ^{-2ns}		3,39 x 10 ^{-2**}	
		FH*AR*T	1,53 x 10 ^{-2ns}		3,71 x 10 ^{-2**}	
	CV (%)		8,46		7,83	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	0,8553 †b	1,0370 a	0,5305 b	0,8889 †a
		40	0,7294 †b	0,9114 †a	0,5780 a	0,6128 a
		60	0,8609 †a	0,8804 †a	0,6208 a	0,6937 †a
		80	0,9278 †a	0,9820 †a	0,6642 b	0,8115 †a
100		0,9697 †a	1,0463 a	0,7368 †a	0,8089 †a	
Testemunha		0,8552 †		0,7957 †		

FH*AR*T: interação entre fontes hídricas, proporções de água residuária e a testemunha; CV: coeficiente de variação; * e ** indicam significância a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ns: não significativo ($p > 0,05$); médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem entre si quanto às fontes hídricas, segundo o teste de Tukey ($p \leq 0,05$); médias seguidas de † não diferem da testemunha conforme o teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

A resposta do feijão-caupi às diferentes proporções de água residuária apresentou padrões consistentes nos dois ciclos de cultivo. Esses resultados evidenciam a influência conjunta da qualidade da água, do nível de diluição e do uso contínuo do efluente no solo. De modo geral, a água filtrada com biocarvão de laranja apresentou desempenho superior nas variáveis vegetativas e reprodutivas. A água tratada sem filtração, por sua vez, esteve associada à redução do crescimento e da produção, especialmente no segundo ciclo. Esse resultado é coerente com

estudos prévios sobre o uso de biocarvão em sistemas de pós-tratamento de efluentes.

Esses sistemas têm sido associados à redução de sólidos suspensos, matéria orgânica biodegradável, microrganismos e nutrientes dissolvidos, como compostos de nitrogênio e fósforo, melhorando a qualidade do efluente destinado ao uso agrícola (LIU, BOFFA e CRAVOTTO, 2026; PANDEY et al., 2025; ZHU et al., 2023). Além disso, as respostas observadas ocorreram sob condições meteorológicas contrastantes ao longo do experimento (Figura 3). No segundo ciclo, registraram-se maior radiação solar média ($14,41 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) e maior evapotranspiração de referência média ($3,09 \text{ mm d}^{-1}$) em relação ao primeiro ciclo ($9,34 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $2,01 \text{ mm d}^{-1}$). Esse cenário indica maior demanda atmosférica, o que pode ter contribuído para ampliar a sensibilidade das plantas às variações na qualidade e proporção do efluente.

A altura das plantas do feijão-caupi ilustrou claramente esse padrão. No primeiro ciclo, todas as proporções de água tratada apresentaram valores inferiores à água filtrada, evidenciando que o filtrado forneceu melhores condições químicas e osmóticas para o crescimento inicial. Em relação à testemunha, apenas as proporções de 80 e 100% da água tratada foram estatisticamente iguais, enquanto as demais resultaram em reduções. Para a água filtrada, apenas a proporção de 40% apresentou valor inferior à testemunha, indicando que o biocarvão preservou a qualidade do efluente mesmo nas diluições intermediárias. No segundo ciclo, o contraste entre as fontes tornou-se mais evidente. Todas as proporções da água tratada apresentaram valores inferiores tanto à água filtrada quanto à testemunha. Em contrapartida, todas as doses da água filtrada permaneceram estatisticamente iguais à testemunha. Esse comportamento reforça a hipótese de que, após um ciclo de uso, a água tratada pode ter intensificado restrições relacionadas à salinidade e ao acúmulo de compostos residuais, enquanto o filtrado manteve sua capacidade de atenuação, fenômeno amplamente relatado em cultivos irrigados continuamente com efluentes (ABOU JAOUDE et al., 2025; GAO et al., 2021). Observa-se também que o segundo ciclo ocorreu sob maior demanda evaporativa (Figura 3), com ETo média de $3,09 \text{ mm d}^{-1}$ e radiação média de $14,41 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Nessas condições, pequenas diferenças na qualidade do efluente tendem a se refletir mais rapidamente em variáveis de crescimento, o que ajuda a contextualizar o contraste observado entre água tratada e água filtrada.

O número de folhas apresentou padrão semelhante. No primeiro ciclo, apenas as proporções de 20 e 40% da água tratada resultaram em valores inferiores tanto à filtrada quanto à testemunha, enquanto as demais proporções foram estatisticamente iguais. Esse comportamento indica que níveis elevados de diluição reduziram o aporte nutricional necessário para a emissão foliar. A água filtrada, por outro lado, apresentou valores iguais à testemunha em todas as proporções, sugerindo maior estabilidade das condições de crescimento.

No segundo ciclo, apenas a proporção de 40% da água tratada foi semelhante à filtrada. As demais doses resultaram em valores inferiores, com exceção da dose de 80%, que se igualou à testemunha. Para a água filtrada, as proporções de 20, 80 e 100% foram semelhantes à testemunha, enquanto as doses intermediárias apresentaram reduções. Esse padrão indica que, com o uso contínuo do efluente, o efeito da salinidade pode se tornar mais expressivo sobre a emissão foliar. Nesse contexto, a presença do biocarvão pode contribuir para reduzir a disponibilidade imediata de sais na solução do solo e para manter maior equilíbrio hídrico, favorecendo a expansão e a manutenção das folhas. Resultados semelhantes são descritos na literatura, que atribui ao biocarvão a capacidade de atenuar o estresse salino e preservar o crescimento vegetativo das plantas (ELSAMAN et al., 2025; EL-SAYED et al., 2021; JABBOROVA et al., 2023).

Para o número de vagens por planta, as respostas foram mais estáveis no primeiro ciclo. Apenas na proporção de 100% houve diferença entre as fontes, com a água filtrada apresentando valor inferior à tratada. Todas as demais doses foram semelhantes entre si. Em relação à testemunha, as proporções de 20 e 60% da água tratada foram estatisticamente iguais, enquanto as demais foram superiores. Para a água filtrada, as proporções de 20, 60 e 100% foram semelhantes à testemunha, sendo as demais superiores. No segundo ciclo, novamente, apenas a dose de 100% da água filtrada foi inferior à tratada. Em relação à testemunha, apenas a dose de 20% de ambas as fontes apresentou incremento significativo, enquanto as demais foram semelhantes. Esses resultados revelam que o componente “número de vagens”, por ser menos sensível ao estresse salino moderado, sofreu pouca interferência direta da qualidade da água. Assim, permaneceu principalmente influenciado pelo aporte nutricional do efluente, padrão relatado também para culturas de baixa sensibilidade relativa à salinidade (CHENG et al., 2021; OSORIO et al., 2025).

O número de grãos por vagem apresentou maior sensibilidade às variações de qualidade da água. No primeiro ciclo, o filtrado superou a água tratada nas proporções de 20, 40 e 100%, indicando melhor ambiente reprodutivo quando o efluente foi pós-filtrado. Em relação à testemunha, as proporções de 20 e 60% da água tratada, bem como as de 20, 60 e 100% da água filtrada, apresentaram valores semelhantes. Esse comportamento indica que esses níveis de diluição favoreceram o equilíbrio entre o aporte nutricional e o baixo estresse osmótico.

No segundo ciclo, o contraste entre as fontes tornou-se mais pronunciado. Com exceção da dose de 20%, todas as proporções da água filtrada apresentaram valores superiores aos da água tratada. Em relação à testemunha, apenas a dose de 60% da água tratada resultou em redução. A água filtrada, por sua vez, manteve valores superiores em quase todas as proporções. Esse resultado reforça a eficiência do biocarvão em atenuar os efeitos do acúmulo de sais ao longo do cultivo (SUDRATT e FAIYUE, 2023; ZHANG et al., 2023). Adicionalmente, o segundo ciclo foi marcado por maior demanda atmosférica (Figura 3), o que pode ter aumentado a exigência hídrica durante fases reprodutivas e de enchimento. Nesse contexto, a manutenção de valores superiores para a água filtrada sugere que o pós-tratamento contribuiu para preservar condições mais favoráveis ao desempenho reprodutivo, mesmo sob ambiente mais demandante.

O número de grãos por planta apresentou estabilidade no primeiro ciclo. Não houve diferença entre as fontes hídricas dentro de cada proporção de água residuária, demonstrando que a formação total de grãos não foi sensível às alterações iniciais de qualidade da água. No segundo ciclo, entretanto, surgiram diferenças pontuais entre as fontes, com reduções observadas na proporção de 80% da água tratada e de 100% da água filtrada em relação à fonte oposta. Ainda assim, várias proporções de ambas as águas residuárias resultaram em valores superiores à testemunha, sugerindo que o aporte nutricional do efluente compensou parcialmente o estresse salino acumulado ao longo do tempo.

A massa seca de vagens mostrou forte estabilidade no primeiro ciclo, sem diferenças significativas em relação à testemunha ou entre fontes, evidenciando que o ambiente radicular ainda não apresentava condições limitantes. No segundo ciclo, a resposta tornou-se mais heterogênea: as proporções de 60% da água tratada e de 100% da filtrada foram iguais à testemunha, enquanto as demais superaram-na. Entre fontes, a água tratada apresentou menores valores em 40, 60 e 80%,

enquanto superou o filtrado em 20 e 100%, evidenciando interações fisiológicas mais complexas quando o solo passou a refletir efeitos do uso continuado do efluente.

A massa fresca da parte aérea apresentou padrão semelhante ao das variáveis foliares. No primeiro ciclo, todas as proporções foram iguais à testemunha, exceto a dose de 20% do filtrado, que apresentou incremento. A água tratada teve desempenho inferior ao filtrado nas proporções de 20 e 40%. No segundo ciclo, todas as proporções da água tratada resultaram em valores inferiores à testemunha, enquanto a água filtrada permaneceu semelhante em todas as doses, exceto em 40%, confirmando a maior estabilidade promovida pelo biocarvão.

A massa seca da parte aérea reforçou essa tendência. No primeiro ciclo, apenas as proporções de 20 e 100% da água filtrada resultaram em valores superiores à testemunha. A água tratada apresentou desvantagem em relação ao filtrado nas doses de 20 e 40%. No segundo ciclo, apenas a proporção de 100% da tratada foi igual à testemunha, enquanto todas as demais foram inferiores. A água filtrada manteve valores semelhantes à testemunha em todas as proporções, exceto em 40%, e superou a água tratada nas proporções de 20 e 80%.

A produtividade da água manteve comportamento estável no primeiro ciclo, com exceção das proporções de 20 e 100% do filtrado, que apresentaram incrementos em relação à testemunha. Esse resultado indica que, mesmo em baixas diluições, o efluente pós-filtrado manteve qualidade suficiente para promover produção com menor volume de água aplicada. A água tratada foi inferior ao filtrado nas doses de 20 e 40%, sugerindo maior limitação fisiológica associada à sua composição. No segundo ciclo, a produtividade da água foi reduzida nas maiores proporções da água tratada. Essa redução ocorreu em um período com ETo média mais elevada ($3,09 \text{ mm d}^{-1}$) e maior radiação ($14,41 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) (Figura 3), o que indica maior demanda atmosférica sobre o sistema. Assim, parte da variação na eficiência pode estar associada às condições meteorológicas do ciclo, além dos efeitos acumulativos do uso do efluente no solo, com possível influência do aumento da salinidade. Em contraste, a água filtrada manteve valores semelhantes à testemunha na maioria das proporções, indicando que o biocarvão contribuiu para preservar a eficiência produtiva do sistema, mesmo sob uso continuado do efluente.

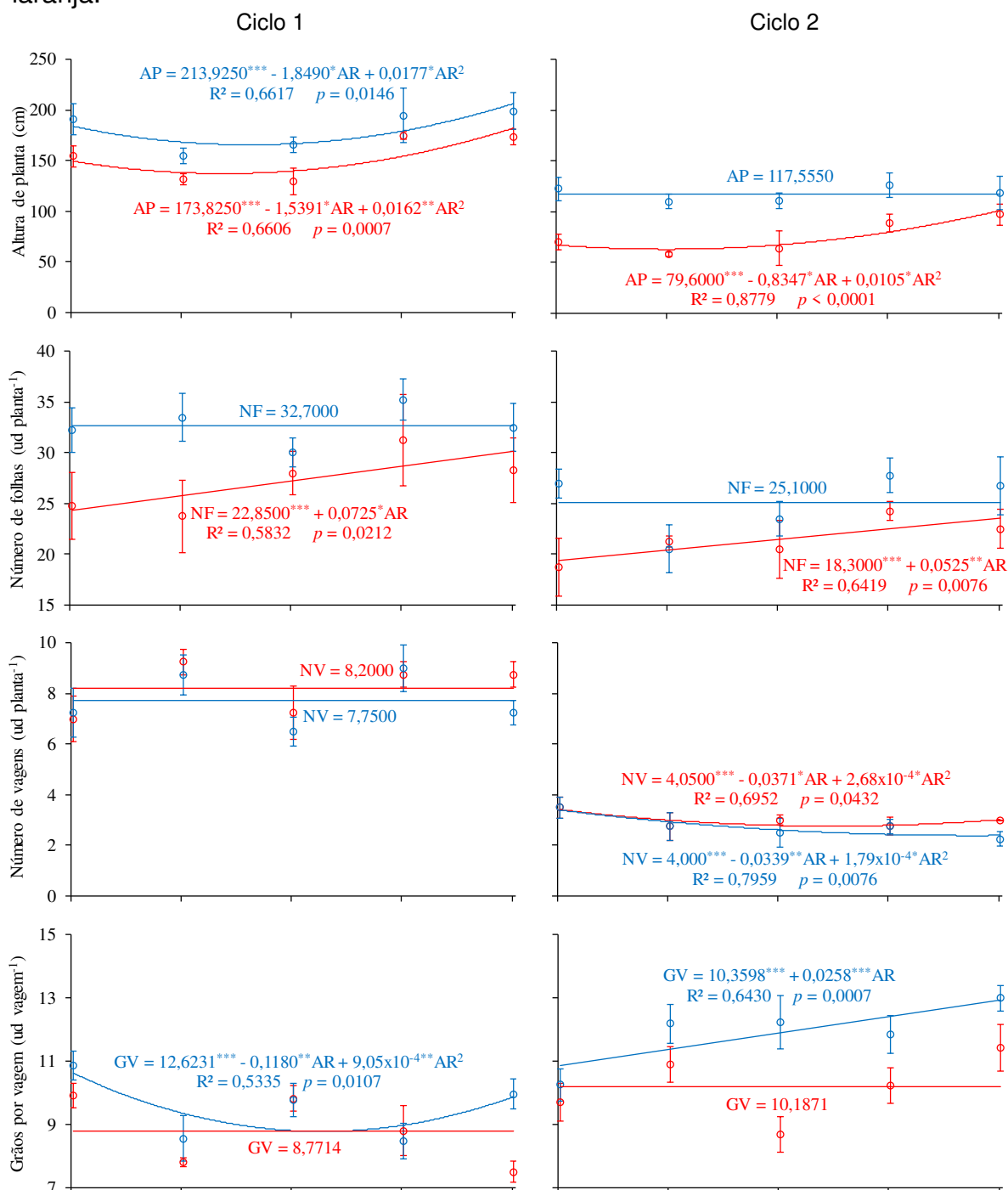
Os nove parâmetros analisados demonstram que a água filtrada com biocarvão de laranja manteve desempenho agrônômico próximo ou equivalente ao

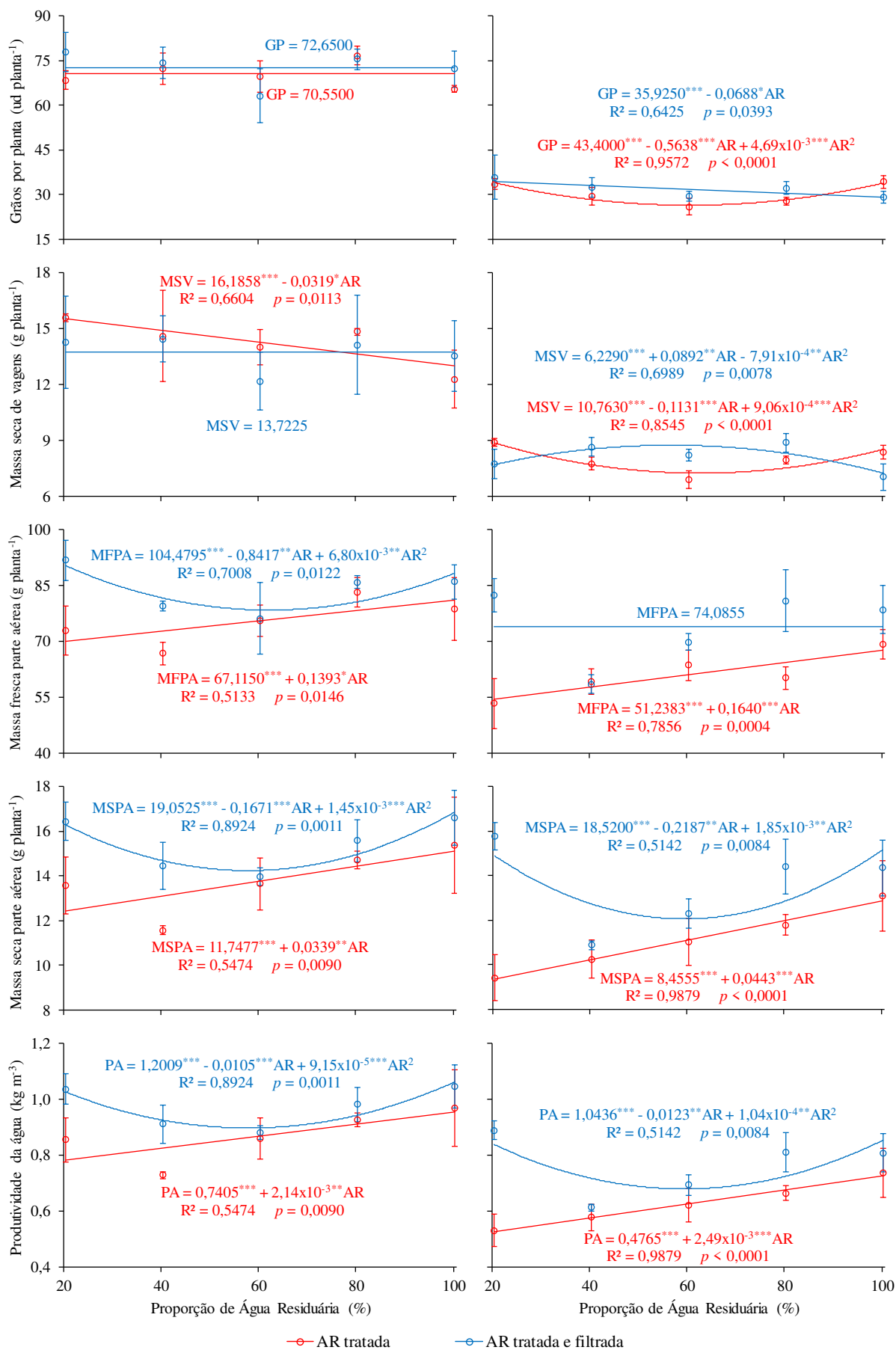
da testemunha, mesmo após dois ciclos sucessivos de fertirrigação. Em contraste, a água tratada sem filtração apresentou perda progressiva de desempenho, especialmente no segundo ciclo de cultivo.

Esse comportamento indica que o sistema filtrante atuou na atenuação dos fatores limitantes associados ao uso do efluente. O biocarvão favoreceu a retenção de sólidos suspensos e de parte dos compostos orgânicos, reduzindo a carga aplicada ao solo ao longo dos ciclos. Sua estrutura porosa e as propriedades superficiais do material podem ter contribuído para a adsorção de íons relacionados à salinidade, o que ajudou a reduzir o estresse osmótico imposto às plantas. Adicionalmente, a maior estabilidade hídrica do solo irrigado com a água filtrada pode explicar a manutenção do crescimento vegetativo e dos componentes de produção observados. A atuação conjunta desses processos justifica o melhor desempenho agrônomico do feijão-caupi irrigado com água pós-filtrada. Esse resultado reforça o potencial do biocarvão como alternativa eficiente, estável e de baixo custo para o reúso agrícola sustentável, conforme relatado por Asirifi et al. (2023), Pradhan et al. (2024), Souza et al. (2022).

Na Figura 16 são apresentadas as variações das características agrônômicas do feijão-caupi em função de proporções de água residuária misturada à água de abastecimento. Foram utilizados dois ciclos de cultivo e duas fontes hídricas: uma composta por água tratada convencionalmente e outra por água tratada e filtrada em biofiltro de casca de laranja. De modo geral, no primeiro ciclo, observou-se maior estabilidade das respostas, bem como ajustes quadráticos para várias variáveis, enquanto no segundo ciclo as respostas tornaram-se mais sensíveis às proporções de água residuária, refletindo a influência do uso continuado do efluente no sistema solo-planta.

Figura 16 - Altura de planta (AP), número de folhas (NF), número de vagens (NV), grãos por vagem (GV), grãos por planta (GP), massa seca de vagens (MSV), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade da água (PA) do feijão em dois ciclos de cultivo, em função de proporções de água residuária misturada à água de abastecimento, sendo uma água tratada convencionalmente e a outra, além de tratada, filtrada com biofiltro de biocarvão de laranja.





*p≤0,05; **p≤0,01; ***p≤0,001

Para a altura de plantas do feijão-caupi, no primeiro ciclo de cultivo, ambas as fontes hídricas apresentaram ajuste quadrático significativo. A partir das equações de regressão, e com a aplicação da derivada parcial, estimou-se que as proporções de água residuária associadas aos valores mínimos de altura foram de 47,5 e 52,2%. Esses valores correspondem a alturas de 137,3 e 165,6 cm para a água tratada convencionalmente e para a água tratada e filtrada em biofiltro de casca de laranja, respectivamente. Os menores valores ocorreram nas faixas intermediárias de AR. Nessa condição, o aporte de nutrientes do efluente não foi suficiente para compensar o aumento da concentração de sais na solução do solo, limitando o crescimento em altura. Nas menores proporções de AR, a diluição do efluente pode ter reduzido o aporte de nutrientes. Em contrapartida, nas maiores proporções, o aumento da concentração salina pode ter limitado a expansão celular. A combinação desses efeitos contribui para o ajuste quadrático observado. No segundo ciclo, a altura das plantas irrigadas com água filtrada não apresentou ajuste significativo em função das proporções, mantendo-se relativamente constante ao longo do intervalo avaliado. Em contraste, a água tratada apresentou ajuste quadrático, novamente com redução da altura nas faixas intermediárias de AR. Esse resultado reforça que o filtrado proporcionou maior estabilidade do crescimento mesmo após uso contínuo do efluente.

O número de folhas apresentou respostas distintas às proporções de AR em função das fontes hídricas, em ambos os ciclos de cultivo. Para a água filtrada, não houve ajuste significativo às proporções de água residuária no primeiro nem no segundo ciclo, com valores médios constantes de 32,7 ud planta⁻¹ no primeiro ciclo e 25,1 ud planta⁻¹ no segundo. Esse comportamento indica estabilidade da emissão foliar ao longo das proporções avaliadas, mesmo com o uso continuado do efluente. Diferentemente, a água tratada apresentou ajuste linear crescente nos dois ciclos. No primeiro ciclo, o número de folhas estimado na proporção de 100% de água residuária foi de aproximadamente 30,1 ud planta⁻¹, enquanto no segundo ciclo esse valor foi de cerca de 23,6 ud planta⁻¹. Esse padrão indica maior dependência do aporte nutricional direto do efluente quando o pós-tratamento por biofiltro não foi empregado.

A estabilidade observada para a água filtrada pode ser associada à menor variabilidade da matéria orgânica aplicada ao solo. As análises de DBO indicaram que, apesar de o efluente filtrado apresentar valores pontualmente superiores aos da

água tratada, não houve tendência de acúmulo ao longo do período experimental, com retorno a níveis próximos aos iniciais após o pico registrado em 17/06. Associada à relativa constância dos teores de fósforo total, essa condição favoreceu um suprimento mais equilibrado de nutrientes, evitando oscilações na emissão foliar. Dessa forma, o uso do biofiltro contribuiu para reduzir efeitos limitantes do efluente, permitindo a manutenção do número de folhas mesmo em menores proporções de água residuária.

Para o número de vagens por planta, no primeiro ciclo não foram observados ajustes significativos para nenhuma das fontes, indicando baixa sensibilidade desse componente às proporções de água residuária. No segundo ciclo, entretanto, ambas as fontes apresentaram ajuste quadrático, com valores mínimos próximos às faixas intermediárias de AR. Ainda assim, as diferenças entre as fontes foram pouco expressivas, confirmando que o número de vagens é um componente produtivo relativamente estável e menos sensível às variações de qualidade da água.

O número de grãos por vagem apresentou respostas mais sensíveis às proporções de água residuária, sobretudo quando o efluente foi submetido ao pós-tratamento com biocarvão. No primeiro ciclo de cultivo, a água filtrada apresentou ajuste quadrático, com valor mínimo estimado de aproximadamente $8,8 \text{ ud vagem}^{-1}$ na proporção de 65,2% de água residuária, seguido de recuperação nas proporções mais elevadas. Em contraste, a água tratada manteve comportamento constante, com valor médio de $8,77 \text{ ud vagem}^{-1}$, indicando menor resposta desse componente às variações na proporção de efluente.

No segundo ciclo, a água filtrada apresentou ajuste linear crescente, alcançando valor estimado de $12,9 \text{ ud vagem}^{-1}$ na proporção de 100% de água residuária, evidenciando efeito positivo do aumento da fração de efluente filtrado sobre o enchimento dos grãos. A água tratada, por sua vez, manteve ajuste constante, com valor médio de $10,19 \text{ ud vagem}^{-1}$, sem resposta significativa às proporções aplicadas. Esses resultados indicam que o número de grãos por vagem é particularmente sensível à qualidade da água ao longo dos ciclos de cultivo, sendo favorecido pelo uso do efluente pós-filtrado, especialmente sob maiores proporções e após o uso continuado do sistema.

Para o número de grãos por planta, não houve resposta significativa às proporções de AR no ciclo 1, com valores médios semelhantes entre a água filtrada ($72,65 \text{ ud planta}^{-1}$) e a água tratada ($70,55 \text{ ud planta}^{-1}$), confirmando a estabilidade

desse componente produtivo nas condições iniciais de uso do efluente. No segundo ciclo, entretanto, as fontes hídricas apresentaram comportamentos contrastantes. A água filtrada apresentou ajuste linear decrescente, com valor estimado de aproximadamente 29,0 ud planta⁻¹ na proporção de 100% de água residuária, indicando leve redução desse componente com o aumento da proporção de efluente, ainda que de forma gradual. Em contraste, a água tratada apresentou ajuste quadrático, com redução mais acentuada do número de GP nas proporções médias de AR, atingindo valor mínimo estimado em cerca de 60,1% de AR (26,4 ud planta⁻¹). Esse comportamento reforça que, embora o aporte nutricional do efluente contribua para a formação de grãos, o uso contínuo da água residuária tratada, sem pós-tratamento, pode intensificar restrições fisiológicas em faixas intermediárias de proporção. A maior estabilidade observada sob irrigação com água filtrada é coerente com as respostas previamente discutidas para o número de grãos por viagem e para o número de folhas, reforçando o efeito moderador do biofiltro sobre os componentes reprodutivos.

A massa fresca e a massa seca da parte aérea apresentaram comportamentos diferentes entre as fontes hídricas ao longo dos ciclos de cultivo. No primeiro ciclo, a água filtrada apresentou ajustes quadráticos para ambas as variáveis. O valor mínimo da MFPA foi estimado em 61,9% de AR (78,4 g planta⁻¹), enquanto para a MSPA o mínimo ocorreu em 57,6% de AR (14,2 g planta⁻¹). Esse padrão indica maior sensibilidade das variáveis às proporções intermediárias de água residuária. No segundo ciclo, a MFPA sob irrigação com água filtrada manteve-se estável, alcançando valores próximos a 74,1 g planta⁻¹. Contudo, a MSPA apresentou ajuste quadrático, com valor mínimo estimado em 59,1% (12,1 g planta⁻¹). Esses resultados indicam maior estabilidade da biomassa aérea sob irrigação com água filtrada, mesmo após o uso contínuo do efluente. A resposta é coerente com a constância observada para o número de folhas e para os componentes reprodutivos ao longo dos ciclos.

Em contraste, a água tratada apresentou ajuste linear crescente para a massa fresca e para a massa seca da parte aérea nos dois ciclos de cultivo. No primeiro ciclo, os valores estimados na proporção de 100% de água residuária foram de aproximadamente 81,0 g planta⁻¹ para a massa fresca e 15,1 g planta⁻¹ para a massa seca. No segundo ciclo, esses valores foram de cerca de 67,6 g planta⁻¹ e

12,9 g planta⁻¹, respectivamente. Esse comportamento indica que, na ausência do pós-tratamento por biofiltro, maiores proporções de efluente foram necessárias para sustentar o acúmulo de biomassa aérea. Esse padrão pode estar relacionado a limitações impostas pela qualidade da água ao longo do tempo. Assim, enquanto a água tratada dependeu do aumento progressivo da proporção de efluente para promover crescimento vegetativo, a água filtrada manteve maior equilíbrio fisiológico e menor variação na produção de biomassa aérea.

Por fim, a produtividade da água apresentou respostas distintas entre as fontes hídricas nos dois ciclos de cultivo. Para a água filtrada, houve ajuste quadrático em ambos os ciclos. No primeiro ciclo, o valor mínimo ocorreu em aproximadamente 57,4% de água residuária, com produtividade da água de cerca de 0,90 kg m⁻³. No segundo ciclo, o mínimo foi estimado em 59,1%, com produtividade próxima de 0,68 kg m⁻³. Esses resultados indicam que, mesmo nas proporções intermediárias menos favoráveis, o sistema manteve eficiência relativamente elevada. Para a água tratada, a produtividade da água apresentou ajuste linear crescente nos dois ciclos de cultivo. Os valores máximos ocorreram somente na proporção de 100% de água residuária, sendo estimados em cerca de 0,95 kg m⁻³ no primeiro ciclo e 0,73 kg m⁻³ no segundo. A proximidade entre os valores mínimos da água filtrada e os valores máximos da água tratada evidencia que o uso do biofiltro promoveu maior eficiência no uso da água ao longo de toda a faixa de proporções avaliadas. Esse comportamento reforça a importância do pós-tratamento com biocarvão na atenuação das limitações associadas ao uso do efluente. Como resultado, a produtividade da cultura foi preservada mesmo sob uso contínuo da água residuária.

De forma geral, os resultados indicam que a água residuária filtrada em biofiltro de biocarvão de bagaço de laranja apresentou maior estabilidade de resposta ao longo dos ciclos de cultivo. Para a maioria das variáveis agrônomicas avaliadas, o desempenho foi semelhante ou superior ao obtido com a água residuária tratada convencionalmente. Esses resultados reforçam que o sistema filtrante pode ser uma alternativa de baixo custo para o reúso agrícola. Mesmo com o uso de água residuária, o desempenho agrônomico do feijão-caupi foi mantido.

Apesar disso, o experimento foi conduzido sob condições controladas e com número limitado de ciclos de cultivo. Dessa forma, os efeitos do uso contínuo da água residuária filtrada sobre o solo não podem ser plenamente extrapolados para o

longo prazo. Além disso, não foram avaliadas possíveis respostas fisiológicas das plantas nem interações com diferentes classes de solo.

Assim, estudos futuros devem considerar períodos mais longos de cultivo, bem como diferentes condições edafoclimáticas. Também é importante aprofundar a investigação dos mecanismos envolvidos na retenção de sais e nutrientes pelo biocarvão e seus efeitos na dinâmica solo-água-plantas. Essas abordagens são fundamentais para consolidar o uso dessa tecnologia em sistemas de reúso agrícola sustentável.

4.2.3. Características agronômicas do feijão-caupi fertirrigado com água residuária filtrada pelo biocarvão de coco

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados da análise de variância e os valores médios das variáveis agronômicas do feijão-caupi, obtidos em dois ciclos de cultivo, considerando diferentes fontes hídricas e proporções de água residuária, incluindo água sem e com pós-tratamento por biocarvão de coco. De modo geral, os parâmetros agronômicos do feijão-caupi responderam de forma diferenciada em relação às proporções de água residuária, com variações entre as fontes hídricas e os ciclos de cultivo. As respostas agronômicas também devem ser interpretadas considerando o ambiente meteorológico do período experimental (Figura 3). No segundo ciclo, registrou-se maior demanda atmosférica, com radiação solar média de $14,41 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e ETo média de $3,09 \text{ mm d}^{-1}$, enquanto no primeiro ciclo esses valores foram de $9,50 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $2,03 \text{ mm d}^{-1}$. Esse contexto pode ter contribuído para tornar algumas variáveis mais sensíveis às diferenças de qualidade do efluente ao longo do uso continuado.

Tabela 7 - Quadrados médios, significância do teste F (ANOVA) e valores médios da altura de planta (AP), número de folhas (NF), número de vagens (NV), grãos por vagem (GV), grãos por planta (GP), massa seca de vagens (MSV), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade da água (PA) do feijão em diferentes ciclos de cultivo, comparando três fontes hídricas: água de abastecimento (Testemunha), água residuária tratada convencionalmente (Tratada) e água tratada e filtrada com biofiltro de biocarvão de coco (Filtrada), ambas aplicadas em distintas proporções com água de abastecimento.

Ciclos de Cultivo			Ciclo 1		Ciclo 2	
Altura de planta (cm)	Quadrado Médio	FH	1,39 x 10 ^{3ns}		1,88 x 10 ^{3**}	
		AR	1,45 x 10 ^{2ns}		4,89 x 10 ^{2**}	
		FH*AR	3,40 x 10 ^{3**}		9,24 x 10 ^{1ns}	
		FH*AR*T	1,33 x 10 ^{3ns}		7,27 x 10 ^{2**}	
		CV (%)	10,76		9,97	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	181,65 †a	168,95 †a	88,35 a	95,18 †a
		40	175,33 †a	179,00 †a	76,95 b	99,98 †a
		60	225,33 a	142,95 †b	89,65 b	108,08 †a
		80	169,25 †a	183,63 †a	90,48 a	99,45 †a
100		163,73 †a	181,70 †a	103,10 †a	114,38 †a	
Testemunha		158,03 †		110,70 †		
Número de folhas (ud planta ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	1,89 x 10 ^{2**}		3,60 x 10 ^{0ns}	
		AR	2,00 x 10 ^{1**}		2,87 x 10 ^{1**}	
		FH*AR	4,40 x 10 ^{1**}		1,54 x 10 ^{1**}	
		FH*AR*T	1,97 x 10 ^{1†}		1,10 x 10 ^{0ns}	
		CV (%)	7,04		6,02	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	29,25 †a	26,75 †a	26,00 †b	29,75 †a
		40	33,50 a	30,00 †b	25,25 †a	22,50 b
		60	35,75 a	25,75 †b	28,50 †a	28,25 †a
		80	28,50 †a	30,50 †a	27,00 †a	26,50 †a
100		35,50 a	27,75 †b	30,00 a	26,75 †b	
Testemunha		28,00 †		26,50 †		
Número de vagens (ud planta ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	1,60 x 10 ^{0†}		2,25 x 10 ^{-1ns}	
		AR	3,79 x 10 ^{0**}		1,88 x 10 ^{-1ns}	
		FH*AR	3,91 x 10 ^{0**}		3,75 x 10 ^{-2ns}	
		FH*AR*T	3,27 x 10 ^{-1ns}		5,69 x 10 ^{-2ns}	
		CV (%)	7,97		13,02	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	7,500 †a	8,000 †a	1,750 †a	2,000 †a
		40	7,250 †a	7,250 †a	2,000 †a	2,250 †a
		60	7,000 †b	8,500 a	2,000 †a	2,250 †a
		80	6,750 †b	8,500 a	2,250 †a	2,250 †a
100		7,000 †a	5,250 b	2,250 †a	2,250 †a	
Testemunha		7,000 †		2,000 †		
Grãos por vagem (ud vagem ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	4,12 x 10 ^{0**}		1,96 x 10 ^{1**}	
		AR	3,90 x 10 ^{0**}		6,98 x 10 ^{0**}	
		FH*AR	5,12 x 10 ^{-1ns}		5,70 x 10 ^{0**}	
		FH*AR*T	5,08 x 10 ^{-1ns}		7,58 x 10 ^{0†}	
		CV (%)	6,52		11,29	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	10,379 †a	9,543 †a	13,083 †a	9,833 †b
		40	10,174 †a	10,223 †a	9,500 †a	8,268 a
		60	8,936 †a	8,567 †a	11,883 †a	9,112 b
		80	10,217 †a	9,455 †a	10,950 †a	10,250 †a
100		9,386 †a	8,096 †b	9,689 †a	10,650 †a	
Testemunha		9,124 †		11,766 †		

Continuação Tabela 7...

Ciclos de Cultivo			Ciclo 1		Ciclo 2	
Grãos por planta (ud planta ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	6,40 x 10 ^{0ns}		1,56 x 10 ^{1ns}	
		AR	7,09 x 10 ^{2**}		2,82 x 10 ^{1**}	
		FH*AR	4,10 x 10 ^{2**}		1,05 x 10 ^{1ns}	
		FH*AR*T	1,18 x 10 ^{2*}		1,49 x 10 ^{1ns}	
	CV (%)		6,93		11,81	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	77,75 a	75,50 a	22,25 †a	19,50 †a
		40	73,75 a	74,00 a	19,00 †a	18,25 a
		60	62,25 †b	72,75 †a	23,75 †a	20,00 †b
		80	68,75 †b	80,25 a	24,25 †a	23,00 †a
100		65,50 †a	41,50 b	21,25 †a	23,50 †a	
Testemunha		63,50 †		23,50 †		
Massa seca de vagens (g planta ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	3,55 x 10 ^{-1ns}		2,48 x 10 ^{-1ns}	
		AR	2,92 x 10 ^{1**}		7,56 x 10 ^{-1ns}	
		FH*AR	1,17 x 10 ^{1**}		4,09 x 10 ^{1**}	
		FH*AR*T	5,19 x 10 ^{-1ns}		7,29 x 10 ^{1**}	
	CV (%)		7,71		11,10	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	17,695 †a	18,450 †a	7,128 †a	5,783 b
		40	18,310 †a	17,933 †a	4,788 b	6,495 †a
		60	15,970 †a	16,213 †a	5,690 a	6,598 †a
		80	16,455 †b	18,955 †a	6,090 †a	5,623 a
100		15,680 †a	11,618 b	6,758 †a	5,168 b	
Testemunha		16,350 †		7,428 †		
Massa fresca da parte aérea (g planta ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	3,04 x 10 ^{0ns}		1,64 x 10 ^{2*}	
		AR	4,06 x 10 ^{2**}		9,53 x 10 ^{1*}	
		FH*AR	5,52 x 10 ^{2**}		6,05 x 10 ^{1ns}	
		FH*AR*T	1,50 x 10 ^{-2*}		3,22 x 10 ^{1ns}	
	CV (%)		9,13		8,91	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	75,03 †a	73,15 †a	59,75 †a	58,00 †a
		40	70,71 †b	92,70 a	59,50 †a	49,25 †b
		60	91,52 a	67,70 †b	62,50 †a	61,75 †a
		80	61,14 a	66,61 †a	61,00 †a	63,00 †a
100		80,97 †a	76,46 †a	67,25 †a	57,75 †b	
Testemunha		75,53 †		57,00 †		
Massa seca da parte aérea (g planta ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	1,47 x 10 ^{0ns}		1,38 x 10 ^{0ns}	
		AR	1,58 x 10 ^{1**}		2,62 x 10 ^{0*}	
		FH*AR	2,68 x 10 ^{1**}		1,93 x 10 ^{0ns}	
		FH*AR*T	2,73 x 10 ^{-1ns}		1,66 x 10 ^{0ns}	
	CV (%)		8,87		7,93	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	15,558 †a	14,533 †a	11,183 †a	11,220 †a
		40	14,158 †b	18,683 a	11,460 †a	10,703 †a
		60	18,783 a	13,190 †b	11,668 †a	12,135 †a
		80	12,338 †a	13,278 †a	11,965 †a	12,273 †a
100		15,845 †a	15,078 †a	13,343 a	11,428 †b	
Testemunha		14,870 †		11,063 †		

Continuação Tabela 7...

Ciclos de Cultivo			Ciclo 1		Ciclo 2	
Produtividade da água (kg m ⁻³)	Quadrado Médio	FH	5,86 x 10 ^{-3ns}		4,39 x 10 ^{-3ns}	
		AR	6,28 x 10 ^{-2**}		8,32 x 10 ^{-3*}	
		FH*AR	1,06 x 10 ^{-1**}		6,13 x 10 ^{-3ns}	
		FH*AR*T	1,08 x 10 ^{-3ns}		5,26 x 10 ^{-3ns}	
		CV (%)	8,87		7,93	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	0,9806 †a	0,9160 †a	0,6301 †a	0,6323 †a
		40	0,8924 †b	1,1776 a	0,6458 †a	0,6031 †a
		60	1,1839 a	0,8314 †b	0,6575 †a	0,6838 †a
		80	0,7777 †a	0,8369 †a	0,6742 †a	0,6916 †a
100		0,9987 †a	0,9504 †a	0,7519 a	0,6439 †b	
Testemunha		0,9373 †		0,6234 †		

FH*AR*T: interação entre fontes hídricas, proporções de água residuária e a testemunha; CV: coeficiente de variação; * e ** indicam significância a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ns: não significativo ($p > 0,05$); médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem entre si quanto às fontes hídricas, segundo o teste de Tukey ($p \leq 0,05$); médias seguidas de † não diferem da testemunha conforme o teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

No primeiro ciclo de cultivo, a altura de plantas e o número de folhas apresentaram comportamento semelhante entre as fontes hídricas na maior parte das proporções avaliadas. A água residuária tratada promoveu maior crescimento em altura na proporção de 60%, acompanhado por maior emissão de folhas. Esse resultado indica resposta positiva ao aporte nutricional do efluente nessa fase inicial. A água filtrada, por sua vez, manteve valores próximos aos da testemunha em praticamente todas as proporções, sugerindo um padrão de crescimento mais equilibrado e menos dependente da concentração de água residuária aplicada.

No segundo ciclo, as diferenças entre as fontes tornaram-se mais evidentes. Nas proporções de 40 e 60%, a água tratada resultou em plantas mais baixas e com menor número de folhas, evidenciando maior sensibilidade ao uso contínuo do efluente. Em contraste, a água filtrada manteve altura e número de folhas semelhantes aos da testemunha ao longo das proporções avaliadas. Esse comportamento indica que o pós-tratamento com biocarvão de coco contribuiu para atenuar efeitos associados à qualidade da água, como o acúmulo de sais ou possíveis desequilíbrios nutricionais, favorecendo a manutenção da expansão foliar e do alongamento do caule ao longo dos ciclos. Além disso, o segundo ciclo ocorreu sob maior radiação e maior ETo (Figura 3), indicando ambiente mais demandante do ponto de vista evaporativo. Nessas condições, a manutenção de AP e NF próximos à testemunha sob irrigação com água filtrada sugere maior regularidade das condições de crescimento, mesmo com aplicações sucessivas de AR.

Em conjunto, a associação entre altura de plantas e número de folhas mostra que o uso da água filtrada proporcionou um crescimento vegetativo mais estável. Já a água tratada apresentou respostas mais dependentes da proporção aplicada, especialmente no segundo ciclo. Essa diferença no padrão de crescimento inicial é relevante, pois a formação e a manutenção da área foliar condicionam o desempenho das fases reprodutivas subsequentes.

O número de vagens por planta apresentou baixa sensibilidade às fontes hídricas e às proporções de água residuária, sobretudo no segundo ciclo de cultivo. No primeiro ciclo, a água filtrada resultou em maior número de vagens nas proporções de 60 e 80%, enquanto na proporção de 100% ocorreu redução desse componente. A água tratada, por outro lado, apresentou menor variação entre as doses, com valores próximos aos da testemunha. No segundo ciclo, o número de vagens manteve-se estável, sem diferenças significativas entre fontes ou proporções, indicando que esse componente reprodutivo é menos responsivo a variações moderadas na qualidade da água.

O número de grãos por vagem apresentou comportamento distinto. No primeiro ciclo, os valores foram relativamente uniformes entre as fontes, com redução pontual na proporção de 100% da água filtrada. No segundo ciclo, observaram-se reduções em algumas proporções da água filtrada, especialmente em 20 e 60%, quando comparadas à água tratada e à testemunha. Esse resultado indica maior sensibilidade do enchimento de grãos às condições impostas pelo uso continuado do efluente. Diferentemente do número de vagens, esse componente depende mais diretamente do equilíbrio nutricional e das condições fisiológicas durante a fase reprodutiva, podendo ser afetado por alterações na disponibilidade de nutrientes e pelo acúmulo gradual de sais na solução do solo. Considerando que o segundo ciclo apresentou maior demanda atmosférica (Figura 3), é plausível que componentes ligados ao enchimento e ao acúmulo de biomassa reprodutiva tenham sido mais sensíveis a variações pontuais na qualidade do efluente. Assim, as reduções observadas em algumas proporções podem refletir a interação entre uso continuado da AR e um ambiente meteorologicamente mais demandante.

De forma integrada, enquanto o número de vagens apresentou elevada estabilidade entre os tratamentos, o número de grãos por vagem respondeu de maneira mais sensível às variações na qualidade da água ao longo dos ciclos. Esse padrão sugere que o pós-tratamento com biocarvão de coco contribuiu para reduzir

oscilações nesse componente reprodutivo, ainda que efeitos pontuais tenham sido observados em algumas proporções.

O número de grãos por planta apresentou respostas mais evidentes no primeiro ciclo de cultivo. Nessa fase, as proporções intermediárias da água tratada resultaram em menores valores quando comparadas à água filtrada, indicando maior sensibilidade desse componente à qualidade da água. Na proporção de 100%, entretanto, a água filtrada apresentou redução em relação à água tratada e à testemunha. Esses resultados refletem o comportamento combinado do número de vagens e do número de grãos por vagem, que apresentaram respostas específicas às fontes hídricas e às proporções aplicadas.

No segundo ciclo, o número de grãos por planta mostrou menor variação entre os tratamentos. Destacou-se apenas a redução observada na proporção de 60% da água filtrada, enquanto os demais tratamentos permaneceram semelhantes à testemunha. Esse padrão indica que, apesar do uso continuado do efluente, a formação total de grãos foi relativamente preservada, com efeitos restritos a proporções específicas.

A massa seca de vagens apresentou comportamento semelhante. No primeiro ciclo, esse parâmetro mostrou maior estabilidade, com poucas diferenças entre fontes e proporções. No segundo ciclo, entretanto, as reduções tornaram-se mais evidentes, sobretudo nas proporções intermediárias da água tratada e em algumas doses da água filtrada, quando comparadas à testemunha. Esse resultado sugere que o acúmulo de matéria seca nas vagens foi mais sensível às condições impostas ao longo do tempo do que o número absoluto de grãos.

Ao analisar essas respostas em conjunto, o número de grãos por planta e a massa seca de vagens responderam de maneira complementar. Enquanto o primeiro refletiu alterações na formação dos componentes reprodutivos, o segundo evidenciou possíveis limitações no enchimento das vagens, especialmente no segundo ciclo. Esses efeitos reforçam que o uso do efluente, mesmo com pós-tratamento, pode impor restrições graduais ao acúmulo de biomassa reprodutiva, dependendo da proporção aplicada.

A biomassa aérea, avaliada pela massa fresca e pela massa seca da parte aérea, apresentou respostas pontuais às proporções de água residuária, com diferenças mais evidentes no primeiro ciclo. Nessa fase, a água tratada promoveu maior acúmulo de biomassa apenas na proporção de 60%. Em contraste, na

proporção de 40%, os valores foram inferiores aos obtidos com a água filtrada. Esse comportamento indica que o crescimento vegetativo respondeu ao equilíbrio entre disponibilidade nutricional e possíveis restrições associadas à qualidade da água.

No segundo ciclo, a biomassa aérea apresentou maior uniformidade entre os tratamentos. Não foram observadas diferenças consistentes em relação à testemunha. Ainda assim, nas proporções de 40 e 100%, a água filtrada apresentou valores inferiores aos da água tratada, mostrando que o uso contínuo do efluente pode gerar efeitos específicos, mesmo quando o crescimento vegetativo geral é mantido.

A produtividade da água acompanhou, em grande parte, o comportamento da biomassa aérea. No primeiro ciclo, ocorreram diferenças entre as fontes, especialmente nas proporções de 40 e 60%, associadas às variações no acúmulo de massa fresca e seca. No segundo ciclo, a maioria dos tratamentos apresentou valores semelhantes à testemunha. Nessa fase, apenas a proporção de 100% da água filtrada resultou em produtividade inferior à da água tratada, enquanto a água tratada, nessa mesma proporção, apresentou valor superior à testemunha.

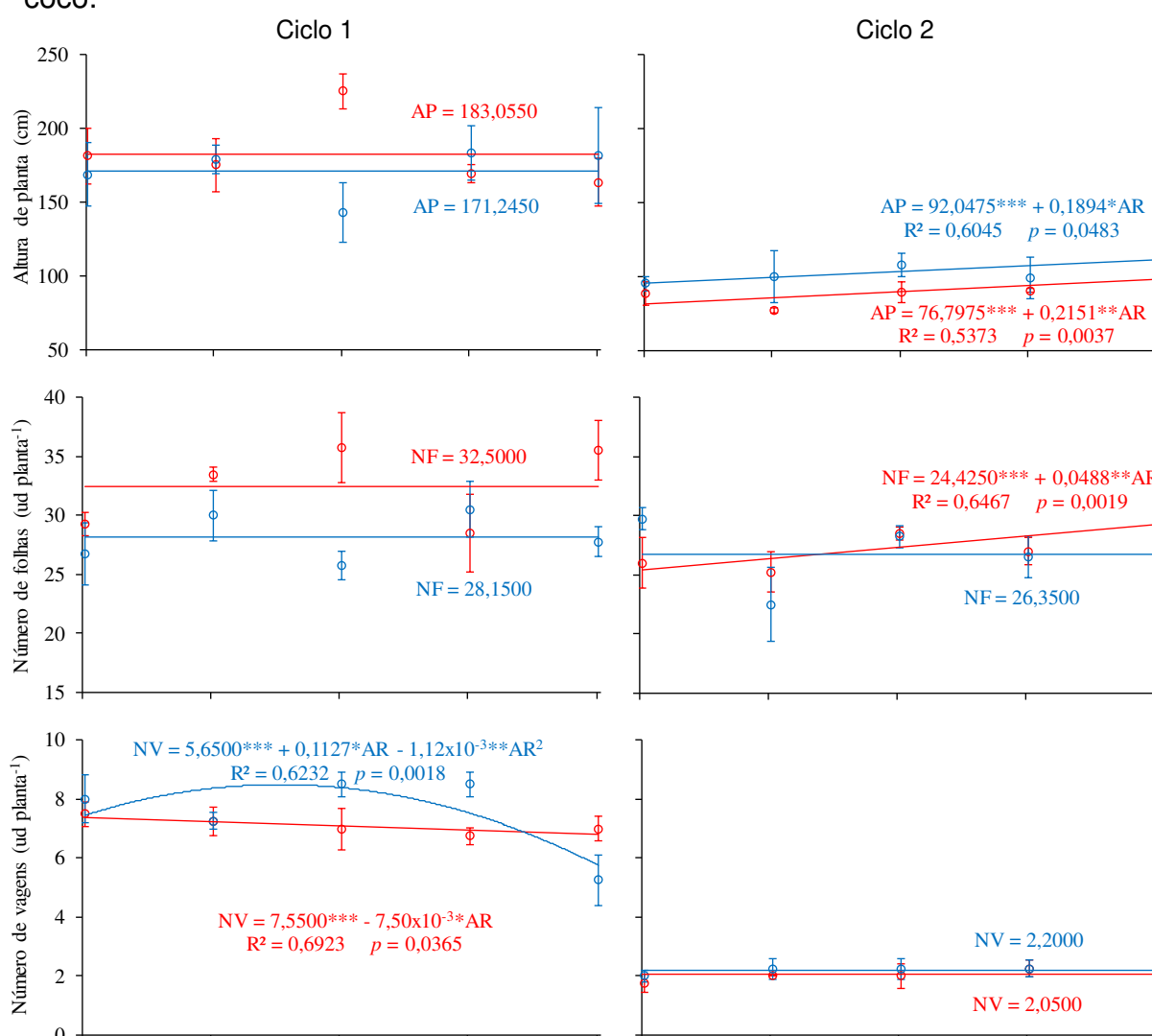
A associação entre biomassa aérea e produtividade da água indica que a eficiência do uso da água esteve diretamente relacionada ao crescimento vegetativo das plantas. O uso do biofiltro com biocarvão de coco contribuiu para reduzir oscilações ao longo dos ciclos e para aumentar a previsibilidade das respostas agrônômicas, aspecto relevante para o manejo do reúso agrícola.

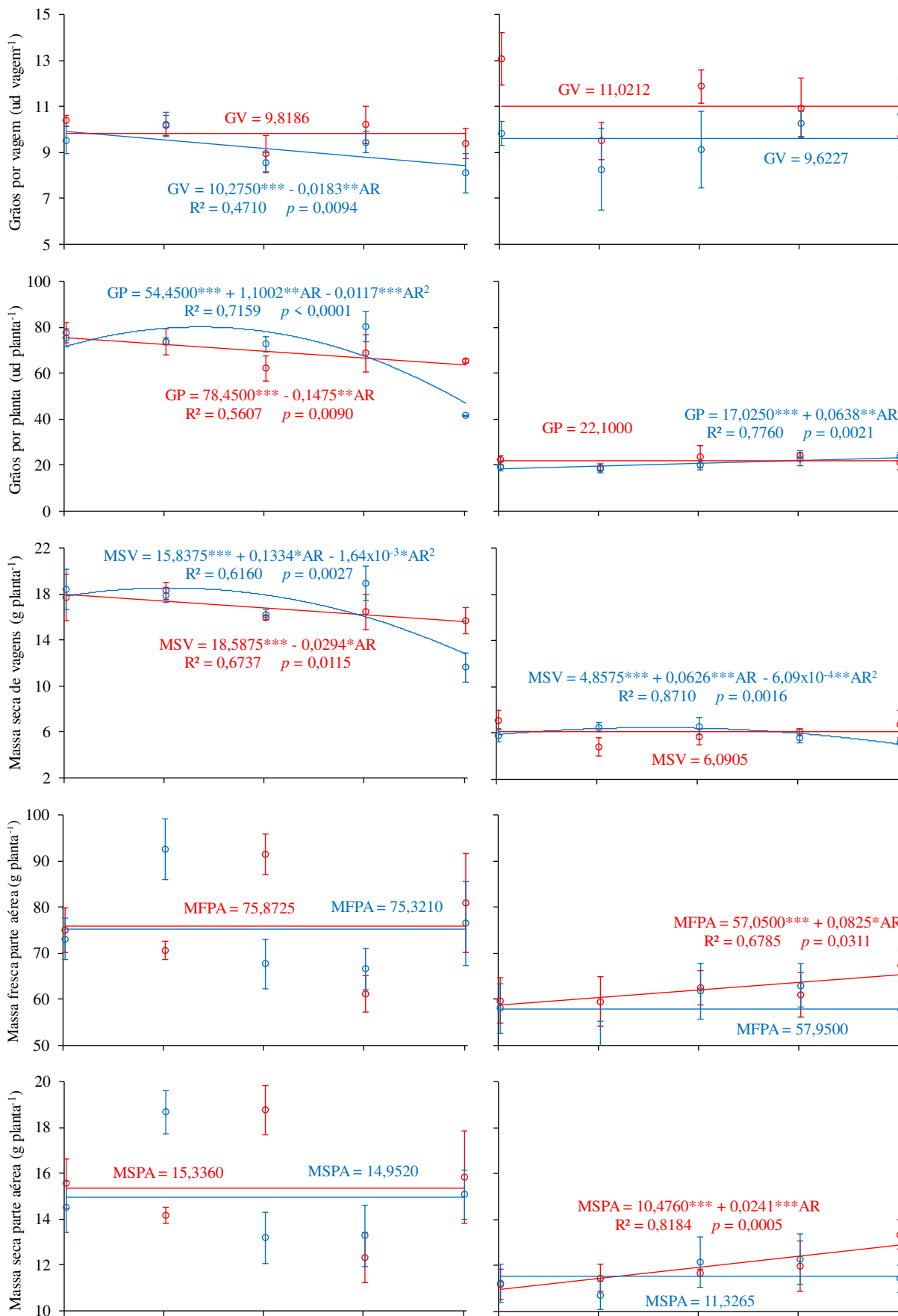
De modo geral, os resultados mostram que a água residuária pós-tratada com biocarvão de coco permitiu manter o desempenho agrônômico do feijão-caupi nos dois ciclos avaliados. A maioria das variáveis vegetativas e reprodutivas apresentou comportamento estável entre as proporções aplicadas, com alterações restritas a situações específicas do uso continuado do efluente. Características como altura de plantas, número de folhas, biomassa aérea e produtividade da água evidenciam que o pós-tratamento contribuiu para reduzir efeitos associados à qualidade da água, como desequilíbrios nutricionais e acúmulo de sais. Assim, o biofiltro com biocarvão de casca de coco se apresenta como uma alternativa viável para o reúso agrícola, especialmente em sistemas com aplicações sucessivas.

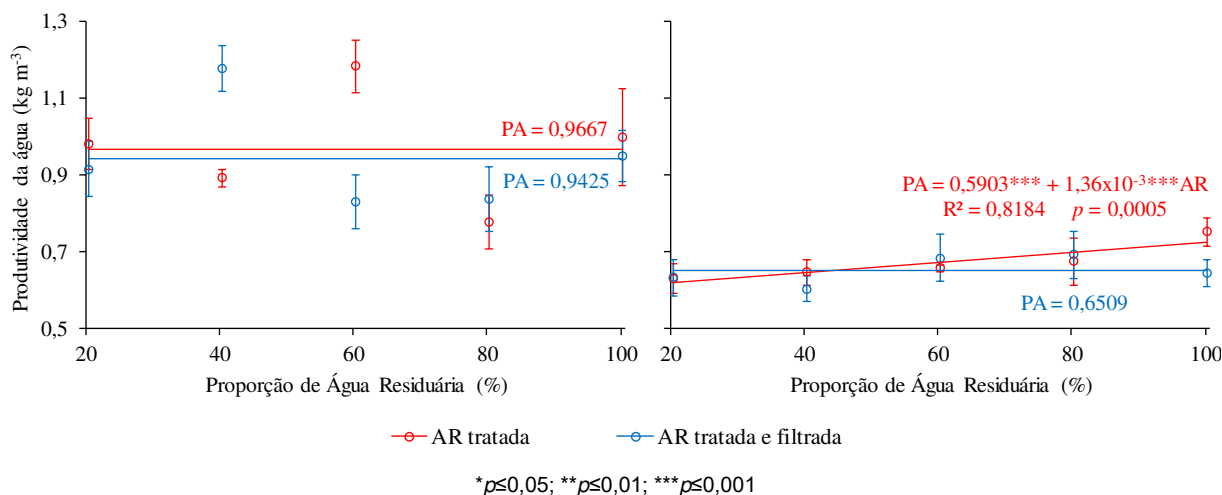
Na Figura 17 são apresentados os resultados das variáveis agrônômicas do feijão-caupi em dois ciclos de cultivo. A análise considera diferentes proporções de água residuária aplicadas na fertirrigação. São comparadas a água residuária

tratada convencionalmente e a água residuária pós-tratada com biofiltro de biocarvão da casca de coco. As curvas de regressão permitem avaliar a resposta das plantas às proporções de efluente e a estabilidade do sistema ao longo do uso contínuo da água residuária.

Figura 17 - Altura de planta (AP), número de folhas (NF), número de vagens (NV), grãos por vagem (GV), grãos por planta (GP), massa seca de vagens (MSV), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade da água (PA) do feijão em dois ciclos de cultivo, em função de proporções de água residuária misturada à água de abastecimento, sendo uma água tratada convencionalmente e a outra, além de tratada, filtrada com biofiltro de biocarvão de COCO.







No primeiro ciclo de cultivo, a altura de plantas e o número de folhas não apresentaram resposta às proporções de água residuária para nenhuma das fontes hídricas, caracterizando ajustes lineares constantes. Para a altura de plantas, os valores médios estimados foram de 183,1 cm para a água residuária tratada e de 171,2 cm para a água pós-tratada com biocarvão da casca de coco. O número de folhas apresentou médias de 32,5 ud planta⁻¹ para a água tratada e de 28,2 ud planta⁻¹ para a água filtrada. Esses resultados indicam que, na fase inicial do experimento, o crescimento vegetativo do feijão-caupi apresentou baixa sensibilidade às variações quantitativas do efluente, independentemente da fonte hídrica.

No segundo ciclo, observaram-se respostas diferenciadas entre as fontes. A altura de plantas apresentou ajuste linear crescente para ambas as águas. Isso evidencia maior influência da proporção de AR com o uso contínuo do efluente. A partir das equações de regressão, estimou-se que, na proporção de 100% de água residuária, as alturas máximas foram de 98,3 cm para a água tratada e de 111,0 cm para a água filtrada. Para o número de folhas, a AR filtrada manteve ajuste linear constante, com média de 26,4 ud planta⁻¹, enquanto a água tratada apresentou ajuste linear crescente, atingindo valor estimado de 29,3 ud planta⁻¹ na proporção de 100%. Esses resultados indicam que o uso da água residuária filtrada em biocarvão esteve associado tanto à maior regularidade na emissão foliar quanto ao incremento da altura de plantas ao longo do segundo ciclo de cultivo.

No primeiro ciclo de cultivo, o número de vagens por planta apresentou comportamento distinto entre as fontes hídricas. A AR pós-tratada com biocarvão da casca de coco ajustou-se a um modelo quadrático, evidenciando maior formação de

vagens nas proporções intermediárias de AR. A partir da equação de regressão, o ponto de máximo foi estimado em aproximadamente 50,3% de água residuária, com valor máximo de cerca de 8,5 ud planta⁻¹, indicando uma faixa ótima de proporção do efluente para esse componente produtivo. Em contraste, a água tratada apresentou ajuste linear decrescente, indicando redução gradual do número de vagens à medida que a proporção de água residuária foi elevada. Esses resultados sugerem que, no curto prazo, o pós-tratamento com biocarvão favoreceu um balanço mais adequado entre aporte nutricional e possíveis efeitos restritivos do efluente.

No segundo ciclo, o número de vagens não apresentou ajuste significativo para nenhuma das fontes, mantendo valores médios constantes de 2,05 ud planta⁻¹ para a água tratada e de 2,20 ud planta⁻¹ para a água filtrada. Essa estabilidade indica menor sensibilidade desse componente reprodutivo às proporções de água residuária após o uso continuado do efluente, reforçando a tendência de acomodação fisiológica das plantas ao longo do tempo.

Para o número de grãos por vagem, observaram-se respostas mais discretas. No primeiro ciclo, a água filtrada apresentou ajuste linear decrescente, com redução gradual do número de grãos por vagem à medida que a proporção de AR aumentou, atingindo valor de aproximadamente 8,45 ud vagem⁻¹ na proporção de 100%. A água tratada, por sua vez, manteve comportamento constante, com média de 9,82 ud vagem⁻¹. Apesar da redução observada para a água filtrada, os valores não se distanciaram de forma acentuada daqueles obtidos com a água tratada. Isso indica baixa sensibilidade desse componente às proporções de água residuária. No segundo ciclo, ambas as fontes apresentaram ajuste linear constante, com médias de 11,02 ud vagem⁻¹ para a água tratada e de 9,62 ud vagem⁻¹ para a água filtrada, reforçando a estabilidade dessa variável após o uso contínuo do efluente.

O número de grãos por planta e a massa seca de vagens apresentaram tendências semelhantes em resposta às proporções de AR. Isso evidencia a relação direta entre a formação de grãos e o acúmulo de biomassa reprodutiva. No primeiro ciclo, a água tratada apresentou redução linear dessas variáveis com o aumento da proporção de efluente. Em contraste, a água pós-tratada com biocarvão de coco apresentou ajustes quadráticos. Para GP, o ponto de máximo ocorreu em aproximadamente 47% de água residuária, com valor estimado de 80 ud planta⁻¹. Enquanto para a MSV o máximo foi observado em torno de 41% da proporção de

AR, atingindo 18,6 g por planta. Esses resultados indicam que, no curto prazo, o biofiltro favoreceu um balanço mais adequado entre o aporte nutricional da água residuária e efeitos associados ao acúmulo de sais e a desequilíbrios nutricionais observados nas análises de qualidade da água, refletindo positivamente na formação de grãos e no acúmulo de biomassa reprodutiva.

No segundo ciclo, a água filtrada manteve respostas positivas ou estáveis, com ajuste linear crescente para grãos por planta, atingindo 23,4 ud planta⁻¹ na proporção de 100% de AR, e ajuste quadrático para a massa seca de vagens, cujo ponto de máximo foi estimado em cerca de 51% da proporção de AR, com valor aproximado de 6,5 g por planta. Em contraste, a água tratada apresentou valores constantes para ambas as variáveis. Esse padrão reforça que o pós-tratamento com biocarvão contribuiu para preservar o potencial produtivo do feijão-caupi ao longo do uso contínuo da AR.

A biomassa aérea do feijão-caupi exibiu comportamento semelhante entre as fontes hídricas no primeiro ciclo. A massa fresca e a massa seca da parte aérea apresentaram ajustes lineares constantes e valores próximos entre as fontes hídricas. Isso indica ausência de efeito imediato das proporções de água residuária sobre o crescimento vegetativo inicial. No segundo ciclo, a AR tratada apresentou ajuste linear crescente para ambas as variáveis, evidenciando aumento progressivo da biomassa aérea com a elevação da proporção de efluente. Em contraste, a água filtrada manteve valores constantes, sugerindo maior estabilidade do crescimento vegetativo ao longo das proporções avaliadas. Esse padrão indica que o biofiltro reduziu a dependência direta da produção de biomassa em relação ao aumento da carga do efluente, possivelmente ao atenuar variações de salinidade, condutividade elétrica e a desequilíbrios nutricionais já evidenciados nas análises de qualidade da água.

A produtividade do uso da água apresentou comportamento semelhante. No primeiro ciclo, ambas as fontes apresentaram ajustes constantes, indicando eficiência semelhante do uso da água entre as proporções avaliadas. No segundo ciclo, a água tratada apresentou ajuste linear crescente, com aumento da produtividade da água à medida que a proporção de efluente foi elevada, enquanto a água filtrada manteve valores estáveis. Os resultados sugerem que, em sistemas sem pós-tratamento, a eficiência do uso da água aumenta à medida que cresce a proporção de AR. Já o uso do biofiltro resultou em respostas mais estáveis e menos

sensíveis às variações da carga do efluente ao longo dos ciclos. Essa estabilidade reforça o papel do biocarvão da casca de coco como estratégia de pós-tratamento de águas residuárias. Ele se mostra capaz de mitigar efeitos cumulativos do efluente sobre o crescimento vegetativo e a eficiência hídrica, favorecendo a manutenção do desempenho agrônômico em sistemas de reúso agrícola.

De modo geral, os resultados mostram que ambas as fontes hídricas podem ser utilizadas no reúso agrícola do feijão-caupi. No entanto, observou-se diferença no padrão de resposta entre elas. Enquanto a água tratada apresentou respostas mais diretamente associadas ao aumento da proporção de efluente, o uso do biofiltro promoveu maior estabilidade das variáveis agrônômicas ao longo dos ciclos de cultivo. As proporções intermediárias de água residuária, entre 40 e 60%, associadas ao pós-tratamento com biocarvão, promoveram um melhor equilíbrio entre crescimento, produção e eficiência no uso da água.

Embora o estudo tenha sido conduzido em condições controladas e por período limitado, os resultados indicam a viabilidade do biocarvão da casca de coco como tecnologia de apoio ao reúso agrícola. O sistema contribuiu para reduzir a sensibilidade das respostas agrônômicas às variações na qualidade da água. Pesquisas futuras devem contemplar avaliações em maior escala e por ciclos sucessivos de cultivo, a fim de consolidar a aplicação dessa tecnologia em sistemas produtivos de longo prazo.

4.2.4. Características microbiológicas do feijão-caupi

Na Tabela 8 estão apresentados os resultados da análise microbiológica realizada em amostras de feijão-caupi utilizada no experimento, com foco na detecção de *Salmonella* spp. e na quantificação de coliformes a 45 °C. Esses parâmetros são importantes para avaliar a qualidade sanitária do alimento, especialmente no contexto de consumo humano. Os resultados foram comparados aos limites estabelecidos pela Instrução Normativa nº 161/2022, que regulamenta padrões microbiológicos para grãos secos, e também à extinta Resolução-RDC nº 12/2001 da ANVISA, adotada aqui como referência técnica complementar.

Tabela 8 - Resultados da análise microbiológica do feijão-caupi comparados aos limites estabelecidos pela IN nº 161/2022 e RDC nº 12/2001.

Parâmetro	Resultado	Limite IN 161/2022 ¹	Limite RDC 12/2001 ²
<i>Salmonella</i> spp.	Ausência	Ausência	Ausência
Coliformes a 45°C	< 3,0 NMP g ⁻¹	Não estabelecido	≤ 50 NMP g ⁻¹

¹ Categoria 3C – grãos secos – Instrução Normativa nº 161/2022 (BRASIL, 2022a).

² Resolução-RDC nº 12/2001 – ANVISA (revogada, mas usada como referência técnica comparativa).

De acordo com o laudo emitido, a amostra atendeu aos requisitos microbiológicos estabelecidos pela Instrução Normativa nº 161, de 1º de julho de 2022 (Categoria 3C) do Ministério da Saúde, a qual exige apenas a ausência de *Salmonella* spp. em grãos secos e não estabelece limite máximo para coliformes termotolerantes nessa categoria. No entanto, para fins comparativos, foi utilizada a Resolução-RDC nº 12, de 2001, da ANVISA, a qual, embora revogada, estabelecia um limite de 50 NMP g⁻¹ para coliformes a 45 °C em grãos secos. Assim, com resultado inferior a 3,0 NMP g⁻¹, a amostra também estaria em conformidade com esse limite, reforçando sua adequação microbiológica.

Resultados semelhantes foram reportados em diversos estudos que utilizaram efluente tratado na fertirrigação de culturas alimentares, como os de Souza et al. (2022), no cultivo da alface; Ramos (2021), na produção de couve-manteiga; Faccioli et al. (2017), com duas variedades de feijão-caupi; Dantas (2015), em cenoura e beterraba; Dantas et al. (2014), com rabanete; e Carvalho et al. (2013), na fertirrigação de girassóis. Em todos esses trabalhos, os níveis de coliformes e a ausência de *Salmonella* spp. permaneceram dentro dos padrões estabelecidos pela antiga RDC nº 12/2001, reforçando que o uso de efluente tratado, quando adequadamente monitorado, pode ser seguro e compatível com a produção de alimentos em sistemas de reúso agrícola.

4.2.5. Características agrônomicas do coentro fertirrigado com água residuária filtrada pelo biocarvão de laranja

Na Tabela 9 estão apresentados os quadrados médios, os níveis de significância do teste F e as médias obtidas para todos os parâmetros agrônomicos analisados. Esses resultados permitem identificar os efeitos principais e as interações entre as fontes hídricas, as proporções de água residuária e os ciclos de cultivo.

Tabela 9 - Quadrados médios, significância do teste F (ANOVA) e valores médios da altura de planta (AP), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade da água (PA) do coentro em diferentes ciclos de cultivo, comparando três fontes hídricas: água de abastecimento (Testemunha), água residuária tratada convencionalmente (Tratada) e água tratada e filtrada com biofiltro de biocarvão de bagaço de laranja (Filtrada), ambas aplicadas em distintas proporções com água de abastecimento.

Ciclos de Cultivo			Ciclo 1		Ciclo 2	
Altura de planta (cm)	Quadrado Médio	FH	1,95 x 10 ^{1**}		4,00 x 10 ^{-1ns}	
		AR	1,43 x 10 ^{1**}		4,76 x 10 ^{0**}	
		FH*AR	8,95 x 10 ^{1**}		1,31 x 10 ^{1**}	
		FH*AR*T	2,26 x 10 ^{1**}		5,39 x 10 ^{-1ns}	
	CV (%)		8,67		8,56	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	18,430 a	8,485 b	13,100 †a	11,775 †a
		40	9,140 †b	16,678 a	11,100 †b	14,725 a
		60	14,455 a	16,135 a	11,800 †a	10,400 †a
		80	13,988 †b	17,413 a	10,150 †b	12,375 †a
100		10,780 †b	15,070 a	13,150 †a	11,025 †b	
Testemunha		11,563 †		11,575 †		
Massa fresca da parte aérea (g vaso ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	7,67 x 10 ^{0**}		2,28 x 10 ^{-1*}	
		AR	8,33 x 10 ^{-1**}		5,11 x 10 ^{-1**}	
		FH*AR	7,70 x 10 ^{0**}		9,55 x 10 ^{-1**}	
		FH*AR*T	2,69 x 10 ^{0**}		7,80 x 10 ^{-2ns}	
	CV (%)		7,61		11,75	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	3,513 a	1,253 b	2,103 †a	1,175 b
		40	1,148 b	4,033 a	1,495 †b	1,928 †a
		60	2,840 b	3,430 a	1,570 †a	1,053 b
		80	2,350 †b	3,463 a	1,045 b	1,755 †a
100		2,050 †b	4,103 a	2,170 a	1,718 †b	
Testemunha		1,958 †		1,748 †		
Massa seca da parte aérea (g vaso ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	2,50 x 10 ^{-2**}		1,25 x 10 ^{-2*}	
		AR	2,31 x 10 ^{-2**}		2,02 x 10 ^{-2**}	
		FH*AR	1,12 x 10 ^{-1**}		3,54 x 10 ^{-2**}	
		FH*AR*T	3,75 x 10 ^{-2**}		6,26 x 10 ^{-3ns}	
	CV (%)		7,48		17,88	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	0,675 a	0,323 b	0,370 †a	0,200 b
		40	0,560 †b	0,715 a	0,265 †a	0,305 †a
		60	0,533 †b	0,625 a	0,265 †a	0,188 b
		80	0,573 †b	0,663 a	0,190 b	0,348 †a
100		0,468 †b	0,733 a	0,428 †a	0,303 †b	
Testemunha		0,485 †		0,328 †		
Produtividade da água (kg m ⁻³)	Quadrado Médio	FH	3,70 x 10 ^{-4**}		2,11 x 10 ^{-4*}	
		AR	3,45 x 10 ^{-4**}		3,49 x 10 ^{-4**}	
		FH*AR	1,67 x 10 ^{-3**}		6,15 x 10 ^{-4**}	
		FH*AR*T	5,61 x 10 ^{-4**}		1,13 x 10 ^{-4ns}	
	CV (%)		7,48		17,88	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	0,0826 a	0,0395 b	0,0487 †a	0,0263 b
		40	0,0685 †b	0,0875 a	0,0349 †a	0,0402 †a
		60	0,0652 †b	0,0765 a	0,0349 †a	0,0247 b
		80	0,0700 †b	0,0811 a	0,0250 b	0,0458 †a
100		0,0572 †b	0,0896 a	0,0563 †a	0,0398 †b	
Testemunha		0,0593 †		0,0431 †		

FH*AR*T: interação entre fontes hídricas, proporções de água residuária e a testemunha; CV: coeficiente de variação; * e ** indicam significância a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente,

pelo teste F; ^{ns}: não significativo ($p > 0,05$); médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem entre si quanto às fontes hídricas, segundo o teste de Tukey ($p \leq 0,05$); médias seguidas de † não diferem da testemunha conforme o teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

A análise das variáveis agronômicas nos dois ciclos mostrou que o uso de água residuária filtrada pelo biocarvão de laranja proporcionou melhor desempenho das plantas de coentro em comparação à água apenas tratada. O efeito positivo da filtração foi mais evidente no primeiro ciclo e nas doses intermediárias (40 a 80%). Nessas condições, observou-se aumento na altura das plantas, massa fresca, massa seca e produtividade do uso da água.

O incremento na altura das plantas com a água filtrada pelo biocarvão, principalmente nas doses de 60% e 80% no primeiro ciclo, pode estar relacionado à melhoria da qualidade físico-química da água. A filtração reduziu sólidos suspensos e compostos potencialmente fitotóxicos, como excesso de sais e metais pesados. O biocarvão de laranja, com sua estrutura porosa, atua como meio adsorvente, retendo contaminantes e promovendo equilíbrio iônico na solução. Essa melhoria provavelmente favoreceu a absorção de macronutrientes essenciais, como N, P e K, importantes para a expansão celular e o crescimento vegetativo (CHRYSARGYRIS e TZORTZAKIS, 2025; ZHAO et al., 2024).

A massa fresca e a massa seca da parte aérea também aumentaram com a água filtrada. O ganho em massa seca indica produção real de biomassa estrutural, e não apenas acúmulo de água, sugerindo maior assimilação de carbono e atividade fotossintética (OUYANG et al., 2025). Esses resultados são consistentes com estudos que mostram que diferentes biocarvões promovem efeitos semelhantes, por meio da liberação gradual de nutrientes e da presença de compostos orgânicos solúveis que favorecem a comunidade microbiana do solo (ASIRIFI et al., 2023; PALIAGA et al., 2025; ZHAO et al., 2024).

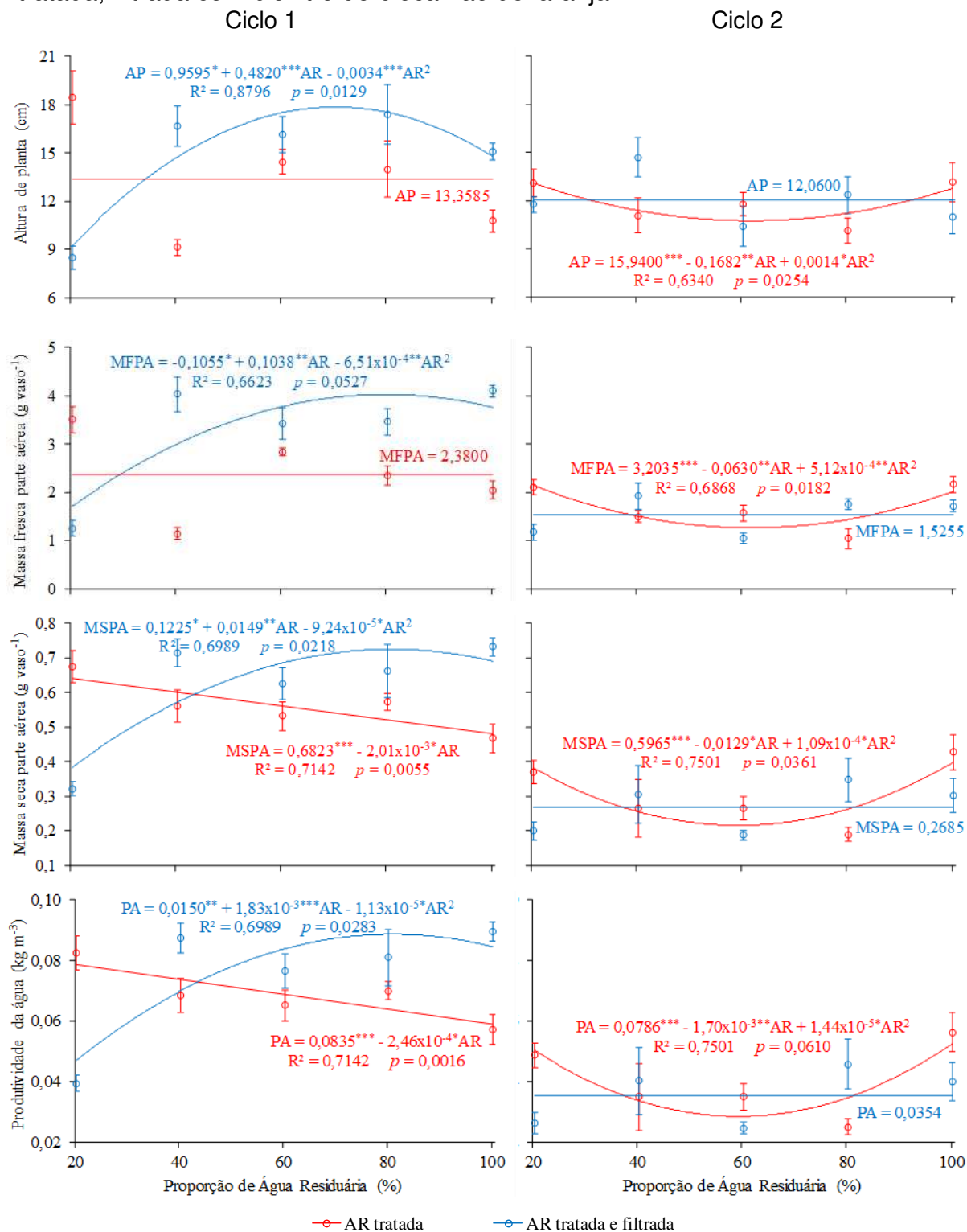
A produtividade da água foi beneficiada pela filtração, especialmente nas doses mais altas de água residuária (80 e 100%) no primeiro ciclo. Isso indica maior eficiência no uso hídrico. O resultado é relevante para a gestão de recursos hídricos e para a sustentabilidade ambiental. A combinação de reúso agrícola com filtração por biocarvão aumentou o retorno produtivo por unidade de água aplicada. Esses achados estão em consonância com a literatura, que mostra ganhos na produtividade das culturas e na eficiência do uso da água (ASIRIFI et al., 2023; XIAO et al., 2024). A menor diferença entre tratamentos no segundo ciclo pode ter

múltiplas causas. Uma delas é o possível acúmulo gradual de sais no solo, oriundos da própria água residuária, podendo reduzir o benefício da filtragem, já que o estresse salino afeta o potencial osmótico e compromete a absorção hídrica (ALOTAIBI, 2022; MUYEN; MOORE; WRIGLEY, 2011; WANG et al., 2024b). Além disso, processos biológicos no solo podem ter sido alterados após o primeiro ciclo, influenciando a mineralização de nutrientes e sua disponibilidade para as plantas (ASIRIFI et al., 2023; WANG et al., 2024b). Vale ressaltar que o segundo ciclo ocorreu sob condições de maior demanda atmosférica, com radiação solar média de $14,95 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e ETo média de $3,27 \text{ mm d}^{-1}$, em comparação ao primeiro ciclo ($13,90 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $2,95 \text{ mm d}^{-1}$) (Figura 3). Embora as diferenças tenham sido moderadas, esse cenário pode ter contribuído para tornar as respostas agronômicas mais sensíveis a variações na qualidade da água ao longo do uso contínuo.

Diante disso, o biocarvão de laranja é uma solução viável para tratar água residuária para fertirrigação. Ele aumenta a produtividade e contribui para a sustentabilidade, valorizando resíduos agroindustriais. A tecnologia pode ser aplicada em diferentes culturas e contextos produtivos. O efeito reduzido no segundo ciclo indica a necessidade de estudos sobre o manejo da salinidade e a manutenção da qualidade da água filtrada.

A Figura 18 apresenta as curvas de regressão das variáveis agronômicas do coentro nos dois ciclos de cultivo, em função das proporções de água residuária aplicadas. A análise compara a água residuária tratada convencionalmente e a água pós-tratada com biofiltro de biocarvão de laranja, permitindo avaliar tanto a resposta das plantas em relação as doses de efluente quanto a estabilidade do sistema ao longo do uso contínuo da água residuária.

Figura 18 - Altura de planta (AP), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade da água (PA) do coentro em dois ciclos de cultivo, em função de proporções de água residuária misturada à água de abastecimento, sendo uma água tratada convencionalmente e a outra, além de tratada, filtrada com biofiltro de biocarvão de laranja.



A altura de plantas do coentro respondeu de forma diferenciada às proporções de água residuária, sobretudo no primeiro ciclo de cultivo. A água pós-tratada com biocarvão de laranja apresentou ajuste quadrático, com valor máximo estimado em aproximadamente 70,9% de água residuária (18,1 cm). Esse resultado indica a existência de uma faixa ótima de uso do efluente quando associado ao pós-tratamento. Em proporções intermediárias, o biofiltro favoreceu o aproveitamento do aporte nutricional da água residuária, ao mesmo tempo em que atenuou o efeito de sais e compostos potencialmente fitotóxicos, criando condições mais favoráveis ao alongamento caulinar. A água apenas tratada manteve altura constante (13,36 cm), indicando ausência de resposta positiva ao aumento da proporção de efluente nessa fase inicial.

No segundo ciclo, o padrão foi distinto. A água tratada apresentou ajuste quadrático, com valor mínimo em torno de 60,1% de água residuária (10,9 cm), sugerindo que o uso contínuo do efluente intensificou limitações ao crescimento em altura. Em contraste, a água filtrada manteve altura estável (12,06 cm), indicando maior capacidade do sistema com biocarvão em amortecer efeitos acumulativos do manejo, como o possível incremento na concentração de sais na solução do solo. Considerando que o segundo ciclo foi conduzido sob ambiente ligeiramente mais demandante do ponto de vista evaporativo (Figura 3), a estabilidade observada sob irrigação com água filtrada reforça o papel do biocarvão como moderador das respostas agrônômicas. Esse efeito se mantém mesmo sob condições meteorológicas mais demandantes.

A resposta da massa fresca da parte aérea acompanhou o comportamento observado para a altura de plantas, evidenciando a forte associação entre crescimento em altura e acúmulo de biomassa. No primeiro ciclo, a água tratada apresentou ajuste quadrático, com valor máximo estimado em 79,8% de água residuária (4,04 g vaso⁻¹). Esse aumento indica o maior aporte de nutrientes fornecido pelo efluente. Entretanto, a água filtrada manteve produção constante (2,38 g vaso⁻¹), sugerindo crescimento mais regulado, menos dependente da elevação da proporção de água residuária.

No segundo ciclo, a massa fresca sob água tratada apresentou valor mínimo em 61,5% de água residuária (1,27 g vaso⁻¹) enquanto a água filtrada manteve valores estáveis (1,53 g vaso⁻¹). Esse comportamento indica que, embora o efluente possa estimular o crescimento no curto prazo, seu uso contínuo sem pós-tratamento

tende a comprometer o acúmulo de biomassa fresca, efeito mitigado pela filtração em biocarvão.

A massa seca da parte aérea reforçou essa interpretação. No primeiro ciclo, a água filtrada apresentou ajuste quadrático, com máximo em 80,6% de água residuária ($0,72 \text{ g vaso}^{-1}$), indicando maior conversão da biomassa fresca em tecido estrutural. Esse resultado indica maior acúmulo de biomassa estrutural, possivelmente associado à redução de estresses relacionados à salinidade e ao desequilíbrio iônico da AR filtrada. Em contraste, a água tratada apresentou redução linear, alcançando $0,48 \text{ g vaso}^{-1}$ na proporção de 100%, indicando possível limitação metabólica associada ao aumento da carga salina.

No segundo ciclo, a água tratada apresentou ajuste quadrático, com valor mínimo em 59,2% de água residuária ($0,21 \text{ g vaso}^{-1}$), enquanto a água filtrada manteve massa seca constante ($0,27 \text{ g vaso}^{-1}$). A estabilidade observada para a água filtrada sugere que o biocarvão contribuiu para reduzir estresses cumulativos ao longo do tempo, preservando a formação de biomassa estrutural mesmo sob uso repetido do efluente.

A produtividade da água refletiu diretamente o comportamento da biomassa aérea. No primeiro ciclo, a água filtrada apresentou ajuste quadrático, com valor máximo estimado em 81,0% de água residuária ($0,089 \text{ kg m}^{-3}$), indicando maior eficiência no uso da água em proporções intermediárias. A água tratada apresentou redução linear, atingindo $0,0589 \text{ kg m}^{-3}$ na proporção de 100%, o que evidencia menor retorno produtivo por unidade de água aplicada.

No segundo ciclo, a água tratada apresentou valor mínimo em 59,0% de água residuária ($0,028 \text{ kg m}^{-3}$), enquanto a água filtrada manteve produtividade constante ($0,035 \text{ kg m}^{-3}$). Esse padrão indica que, embora o aumento da proporção de água residuária possa elevar a eficiência hídrica em situações pontuais, o pós-tratamento com biocarvão promoveu uma resposta mais previsível e menos sensível às variações da carga do efluente.

De forma geral, os resultados mostram que o biocarvão de laranja atuou como elemento moderador do sistema. No primeiro ciclo, favoreceu a ocorrência máximos produtivos em proporções intermediárias de AR. No segundo, reduziu oscilações negativas associadas ao uso contínuo da água residuária. A análise conjunta da altura de plantas, da biomassa aérea e da produtividade da água mostra que o benefício do biofiltro não se limitou a ganhos pontuais de produção. O efeito

mais relevante foi a estabilização do desempenho agrônômico ao longo do tempo, aspecto fundamental para a viabilidade do reúso agrícola em cultivos sucessivos.

Apesar disso, o estudo foi conduzido em condições controladas e por número limitado de ciclos, o que restringe inferências sobre efeitos de longo prazo, especialmente quanto ao acúmulo de sais no solo e à durabilidade do sistema filtrante. Além disso, não foram avaliados parâmetros fisiológicos das plantas nem alterações químicas e biológicas do solo ao longo do tempo. Assim, estudos futuros devem incluir experimentos em escala de campo, maior número de ciclos sucessivos e monitoramento da dinâmica solo-água-planta, a fim de consolidar o uso do biocarvão como tecnologia de apoio ao reúso agrícola.

4.2.6. Características agrônômicas do coentro fertirrigado com água residuária filtrada pelo biocarvão de coco

Na Tabela 10 estão apresentados os quadrados médios, os níveis de significância do teste F e as médias obtidas para todos os parâmetros agrônômicos analisados. Esses resultados permitem identificar os efeitos principais e as interações entre as fontes hídricas, as proporções de água residuária e os ciclos de cultivo.

Tabela 10 - Quadrados médios, significância do teste F (ANOVA) e valores médios da altura de planta (AP), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade da água (PA) do coentro em diferentes ciclos de cultivo, comparando três fontes hídricas: água de abastecimento (Testemunha), água residuária tratada convencionalmente (Tratada) e água tratada e filtrada com biofiltro de biocarvão de coco (Filtrada), ambas aplicadas em distintas proporções com água de abastecimento.

Ciclos de Cultivo		Ciclo 1		Ciclo 2			
Altura de planta (cm)	Quadrado Médio	FH	6,86 x 10 ^{0**}		4,85 x 10 ^{1**}		
		AR	1,63 x 10 ^{1**}		1,31 x 10 ^{1**}		
		FH*AR	5,94 x 10 ^{0**}		7,11 x 10 ^{0**}		
		FH*AR*T	3,27 x 10 ^{1**}		9,65 x 10 ^{0**}		
		CV (%)	4,42		8,03		
	Fonte Hídrica	Tratada		Filtrada		Tratada	
		20	13,003 a	12,675 a	9,275 b	12,700 †a	
		40	14,923 a	13,500 b	9,750 b	13,375 †a	
		60	15,608 b	16,535 a	10,725 b	13,850 †a	
		80	12,003 †b	14,488 a	13,475 †b	15,210 †a	
Dose de AR (%)	100	11,305 †b	13,785 a	12,375 †a	11,475 a		
Testemunha		10,785 †		13,850 †			

Continuação da Tabela 10...

Ciclos de Cultivo			Ciclo 1		Ciclo 2	
Massa fresca da parte aérea (g vaso ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	2,70 x 10 ^{0**}		3,52 x 10 ^{0**}	
		AR	2,72 x 10 ^{0**}		1,06 x 10 ^{0**}	
		FH*AR	1,24 x 10 ^{0**}		6,90 x 10 ^{-1**}	
		FH*AR*T	4,77 x 10 ^{0**}		5,79 x 10 ^{-2ns}	
	CV (%)		8,54		8,38	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	2,883 a	2,945 a	0,800 b	1,365 a
		40	3,273 b	3,693 a	0,990 b	1,750 †a
		60	3,585 a	3,095 b	1,173 b	2,075 a
		80	1,988 †b	3,383 a	1,505 †b	2,635 a
100		1,410 †b	2,623 a	1,780 †a	1,390 b	
Testemunha		1,743 †		1,673 †		
Massa seca da parte aérea (g vaso ⁻¹)	Quadrado Médio	FH	7,09 x 10 ^{-3ns}		1,09 x 10 ^{-1**}	
		AR	1,74 x 10 ^{-1**}		2,16 x 10 ^{-2**}	
		FH*AR	7,59 x 10 ^{-2**}		3,20 x 10 ^{-2**}	
		FH*AR*T	2,24 x 10 ^{-1**}		1,88 x 10 ^{-3ns}	
	CV (%)		6,94		6,30	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	0,677 a	0,576 b	0,248 b	0,305 a
		40	0,793 a	0,724 b	0,263 b	0,418 †a
		60	0,932 a	0,763 b	0,270 b	0,443 a
		80	0,422 †b	0,649 a	0,305 b	0,535 a
100		0,377 †b	0,623 a	0,415 †a	0,323 b	
Testemunha		0,405 †		0,374 †		
Produtividade da água (kg m ⁻³)	Quadrado Médio	FH	1,02 x 10 ^{-4ns}		1,88 x 10 ^{-3**}	
		AR	2,57 x 10 ^{-3**}		3,73 x 10 ^{-4**}	
		FH*AR	1,12 x 10 ^{-3**}		5,51 x 10 ^{-4**}	
		FH*AR*T	3,31 x 10 ^{-3**}		3,10 x 10 ^{-5ns}	
	CV (%)		6,94		6,30	
	Fonte Hídrica		Tratada	Filtrada	Tratada	Filtrada
	Dose de AR (%)	20	0,0822 a	0,0699 b	0,0325 b	0,0400 a
		40	0,0963 a	0,0879 b	0,0344 b	0,0548 †a
		60	0,1132 a	0,0927 b	0,0354 b	0,0580 a
		80	0,0512 †b	0,0788 a	0,0400 b	0,0702 a
100		0,0458 †b	0,0756 a	0,0544 †a	0,0423 b	
Testemunha		0,0493 †		0,0490 †		

FH*AR*T: interação entre fontes hídricas, proporções de água residuária e a testemunha; CV: coeficiente de variação; * e ** indicam significância a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F; ns: não significativo ($p > 0,05$); médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem entre si quanto às fontes hídricas, segundo o teste de Tukey ($p \leq 0,05$); médias seguidas de † não diferem da testemunha conforme o teste de Dunnett ($p \leq 0,05$).

A análise das respostas do coentro precisa levar em conta a qualidade das águas usadas na irrigação, já apresentada anteriormente (tópico 4.2.1). No geral, a água de abastecimento mostrou salinidade extremamente baixa, enquanto o efluente tratado, tanto na forma original quanto após a filtragem em biocarvão, permaneceu dentro de níveis considerados seguros para uso agrícola. Assim, as diferenças encontradas entre os tratamentos não estão associadas a níveis críticos de salinidade, mas sim ao efeito do pós-tratamento com biocarvão e da forma como

cada proporção de efluente interagiu com o solo e com a fisiologia das plantas ao longo dos ciclos.

A altura de plantas evidenciou diferenças claras entre as fontes hídricas e entre ciclos. No primeiro ciclo, a água filtrada apresentou desempenho superior à água tratada principalmente nas proporções mais altas, com maiores valores em 60% (16,54 cm), 80% (14,49 cm) e 100% (13,79 cm). Em 40%, porém, a água tratada foi superior (14,92 cm), indicando que a resposta não seguiu uma mesma tendência em toda a faixa de proporções. No segundo ciclo de cultivo, as diferenças entre as fontes hídricas tornaram-se mais consistentes. As plantas irrigadas com AR filtrada apresentaram maiores valores de altura nas proporções de 20 a 80% de AR, variando de 12,70 a 15,21 cm. Enquanto a água tratada resultou em plantas significativamente mais baixas nesse intervalo, com valores entre 9,28 e 13,48 cm.

Esse comportamento indica que o pós-tratamento com biocarvão contribuiu para atenuar limitações associadas à qualidade da água. Isso permitiu a manutenção do crescimento vegetativo mesmo sob proporções elevadas de AR. Na proporção de 100%, entretanto, a altura das plantas irrigadas com água filtrada foi reduzida (11,48 cm), aproximando-se do desempenho da água tratada (12,38 cm) e ficando abaixo da testemunha. Isso sugere que, em concentrações máximas de efluente, os efeitos cumulativos do manejo tendem a reduzir os benefícios do sistema filtrante. Ainda assim, o desempenho superior da água filtrada na maior parte das proporções avaliadas evidencia maior estabilidade do crescimento em altura no segundo ciclo, quando comparada à água apenas tratada.

A massa fresca da parte aérea apresentou respostas distintas entre as fontes hídricas e os ciclos de cultivo. No primeiro ciclo, a água residuária filtrada com biocarvão de coco promoveu maiores valores de MFPA na maior parte das proporções avaliadas. Destacaram-se as doses de 40, 80 e 100% de AR, nas quais a água filtrada superou tanto a água tratada quanto a testemunha, indicando efeito positivo do pós-tratamento sobre o acúmulo de biomassa fresca. Em contraste, a água tratada apresentou redução mais acentuada da MFPA nas proporções mais elevadas de AR, sugerindo maior sensibilidade do crescimento vegetativo ao aumento da carga do efluente quando não há etapa adicional de filtragem.

No segundo ciclo, o padrão observado foi semelhante ao identificado para a altura de plantas. A água filtrada manteve valores superiores de MFPA nas proporções de 20 a 80% de AR, com produção variando entre 1,36 e 2,64 g vaso⁻¹,

enquanto a água tratada apresentou valores inferiores nesse intervalo. Esse comportamento indica que o maior crescimento em altura observado sob irrigação com água filtrada esteve acompanhado por maior acúmulo de biomassa fresca, refletindo condições mais favoráveis para a expansão dos tecidos vegetativos ao longo do uso continuado do efluente. Na proporção de 100% de AR, entretanto, a MFPA sob água filtrada foi reduzida, aproximando-se dos valores observados para a água tratada e para a testemunha, padrão que coincide com a redução da altura de plantas nessa condição. Esse resultado sugere que, embora o biofiltro atenuie os efeitos negativos do reúso na maior parte das proporções, concentrações máximas de água residuária podem limitar o crescimento vegetativo mesmo após o pós-tratamento.

A massa seca da parte aérea apresentou respostas consistentes com os padrões observados para a altura de plantas e para a massa fresca, embora com maior sensibilidade às proporções de água residuária. No primeiro ciclo, a água residuária tratada apresentou incremento da MSPA até a proporção de 60% de AR, indicando efeito positivo do aporte nutricional do efluente nesse intervalo. Entretanto, nas proporções de 80 e 100%, ocorreu redução acentuada da massa seca sob água tratada, com valores inferiores à testemunha. Em contraste, a água pós-tratada com biocarvão de coco apresentou maiores valores de MSPA nessas proporções mais elevadas, superando a água tratada e, em alguns casos, aproximando-se ou ultrapassando a testemunha. Esse comportamento indica que o biofiltro contribuiu para atenuar limitações associadas ao aumento da carga do efluente, favorecendo o acúmulo de biomassa estrutural mesmo em condições de maior proporção de água residuária.

No segundo ciclo, a diferença entre as fontes tornou-se menos pronunciada, embora o padrão geral tenha sido mantido. A água filtrada apresentou valores superiores de MSPA nas proporções de 20, 40, 60 e 80% de AR, enquanto a água tratada manteve valores mais baixos ao longo dessas doses. Na proporção de 100% de AR, a água tratada apresentou valor superior ao da água filtrada, indicando possível limitação do efeito do biofiltro sob uso contínuo e elevada carga do efluente. Esse resultado sugere que, ao longo de ciclos sucessivos, o acúmulo gradual de sais no solo pode reduzir o diferencial entre as fontes, ainda que o sistema filtrante mantenha vantagem nas proporções intermediárias.

Além disso, o segundo ciclo foi conduzido sob condições de maior demanda atmosférica, com radiação solar média de $14,95 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e ETo média de $3,27 \text{ mm d}^{-1}$, em comparação ao primeiro ciclo ($13,90 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e $2,95 \text{ mm d}^{-1}$) (Figura 3). Embora as diferenças tenham sido moderadas, esse cenário pode ter intensificado a sensibilidade do coentro às variações na qualidade da água, especialmente em proporções mais elevadas de AR, nas quais o balanço entre aporte nutricional e estresse osmótico tende a se tornar mais delicado.

De forma geral, a MSPA reforça os resultados observados para a massa fresca. Enquanto a água tratada apresentou respostas mais dependentes da proporção aplicada, com queda nas doses mais elevadas, a água filtrada proporcionou maior regularidade no acúmulo de matéria seca, sobretudo nas faixas intermediárias de AR. Esse padrão indica que o pós-tratamento com biocarvão favoreceu não apenas a expansão dos tecidos vegetais, mas também a conversão desse crescimento em biomassa efetivamente incorporada à planta.

A produtividade da água refletiu de forma clara os padrões observados para o crescimento vegetativo e o acúmulo de biomassa do coentro, integrando os efeitos da fonte hídrica e das proporções de água residuária nos dois ciclos de cultivo. No primeiro ciclo, a água residuária tratada apresentou aumento da PA até a proporção de 60% de AR, seguido de redução acentuada nas doses de 80 e 100%. Esse comportamento indica que o aporte nutricional do efluente contribuiu inicialmente para maior eficiência do uso da água. No entanto, o aumento da carga salina nas proporções mais elevadas passou a limitar o desempenho produtivo, reduzindo o retorno em biomassa por unidade de água aplicada. Em contraste, a água pós-tratada com biocarvão manteve valores mais elevados e estáveis de PA nas proporções de 80 e 100% de AR, superando a água tratada e, em alguns casos, igualando ou aproximando-se da testemunha. Esse resultado está diretamente associado ao maior acúmulo de massa fresca e seca observado sob irrigação com água filtrada nessas proporções, indicando que o biofiltro contribuiu para preservar a eficiência do uso da água mesmo sob maior participação do efluente.

No segundo ciclo, a produtividade da água apresentou diferenças menos expressivas entre as fontes, refletindo o cenário de maior uniformização observado também para a biomassa aérea. Ainda assim, a água filtrada manteve valores superiores de PA na maioria das proporções avaliadas, enquanto a água tratada apresentou desempenho inferior especialmente nas doses intermediárias. Na

proporção de 100% de AR, ambas as fontes apresentaram valores semelhantes à testemunha, sugerindo que o uso contínuo do efluente reduziu o contraste entre os tratamentos, possivelmente em função do acúmulo gradual de sais no solo.

Em conjunto, os resultados de PA confirmam que a eficiência do uso da água esteve fortemente associada ao crescimento vegetativo e ao acúmulo de biomassa. Enquanto a água tratada apresentou maior dependência da proporção aplicada, com perda de eficiência nas doses mais elevadas, o uso do biofiltro com biocarvão de coco promoveu maior estabilidade produtiva, especialmente no primeiro ciclo. Esse comportamento reforça o papel do pós-tratamento como estratégia para reduzir oscilações negativas no desempenho agrônomico. Além disso, contribui para aumentar a previsibilidade do reúso agrícola, sobretudo em condições de maior participação da água residuária.

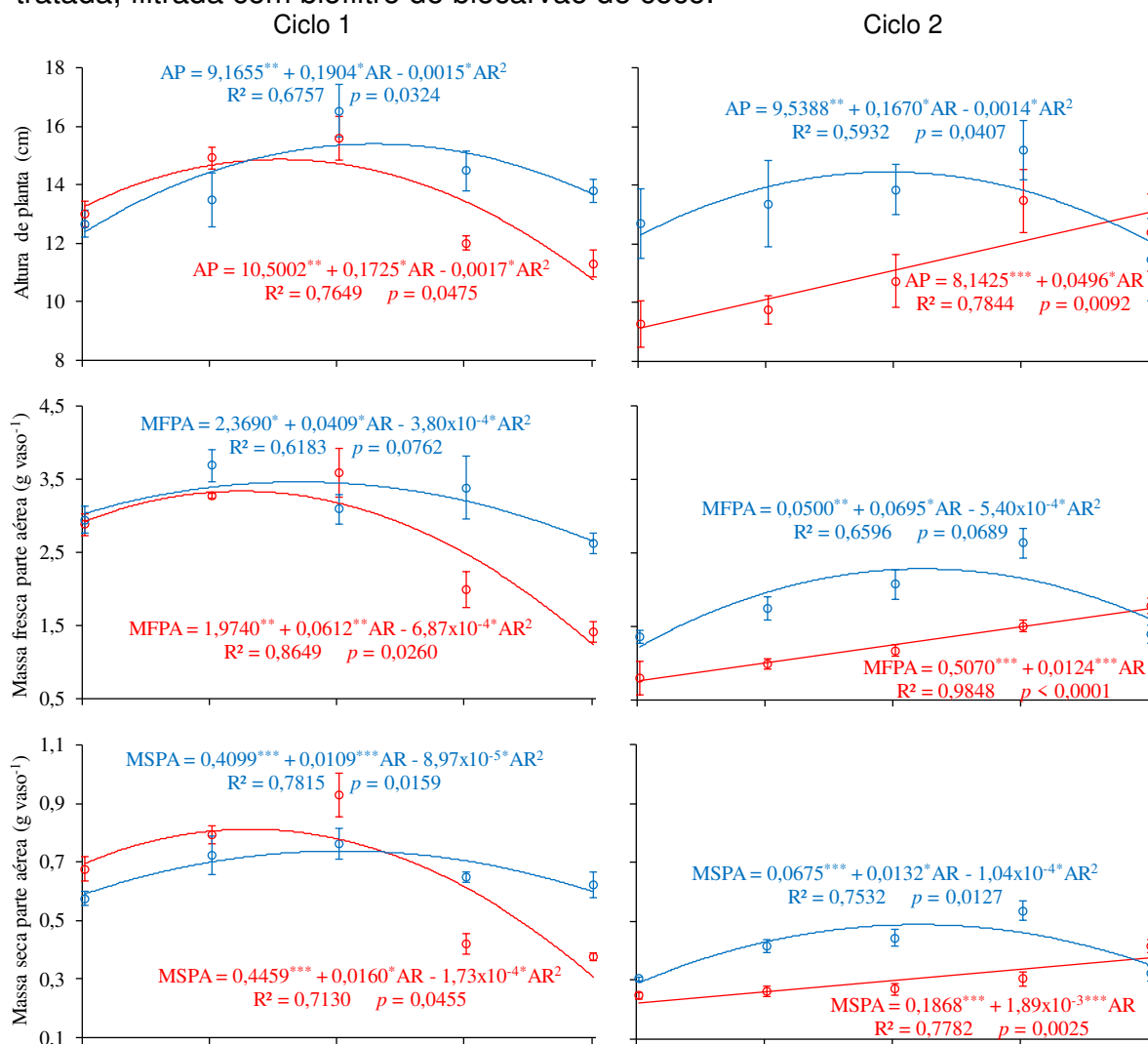
De forma geral, os resultados indicam que o pós-tratamento da água residuária com biocarvão de coco favoreceu o desempenho agrônomico do coentro. Esse efeito foi mais evidente no primeiro ciclo de cultivo e nas proporções intermediárias de água residuária. Nessas condições, observaram-se maiores valores de altura de plantas, acúmulo de biomassa aérea e produtividade da água. Esses resultados evidenciam melhor equilíbrio entre o aporte nutricional do efluente e a mitigação de efeitos limitantes associados ao reúso. No segundo ciclo, as diferenças entre as fontes hídricas tornaram-se menos pronunciadas, sugerindo influência do uso contínuo do efluente e do acúmulo gradual de sais no solo. Ainda assim, a água filtrada manteve respostas mais estáveis na maior parte das proporções avaliadas. Isso indica que o biocarvão de coco contribuiu para reduzir oscilações negativas no crescimento e na eficiência do uso da água, aspecto relevante para a viabilidade do reúso agrícola em cultivos sucessivos.

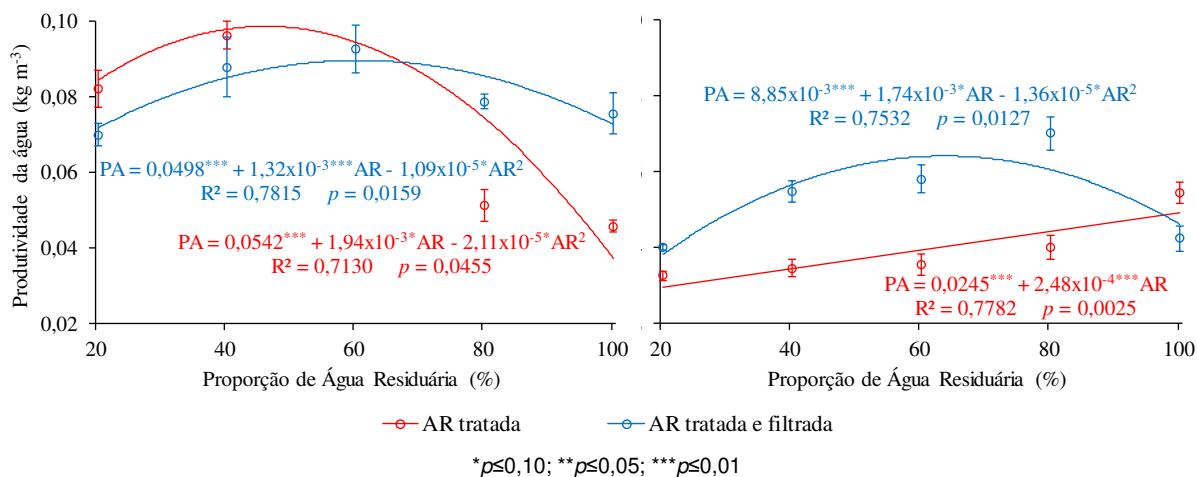
Apesar dos resultados positivos, o estudo foi conduzido em condições controladas e com número limitado de ciclos de cultivo. Isso acaba restringindo inferências sobre o comportamento do sistema em longo prazo. O acúmulo progressivo de sais no solo, a possível saturação do biocarvão e seus efeitos sobre atributos químicos e biológicos do solo não foram avaliados de forma contínua. Assim, pesquisas futuras devem incluir experimentos em maior escala, com mais ciclos sucessivos de cultivo. Além disso, é necessário um monitoramento detalhado da dinâmica solo-água-planta, a fim de melhor definir os limites operacionais e a

durabilidade do uso do biocarvão de coco como tecnologia de apoio ao reúso agrícola.

A Figura 19 são apresenta os resultados da análise de regressão das variáveis agrônômicas do coentro em dois ciclos de cultivo, em função das proporções de água residuária aplicadas na fertirrigação. São comparadas a água residuária tratada convencionalmente e a água residuária pós-tratada com biocarvão de casca de coco, permitindo avaliar a resposta quantitativa da cultura às diferentes proporções de efluente, bem como as alterações no padrão de comportamento entre os ciclos de cultivo.

Figura 19 - Altura de planta (AP), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e produtividade da água (PA) do coentro em dois ciclos de cultivo, em função de proporções de água residuária misturada à água de abastecimento, sendo uma água tratada convencionalmente e a outra, além de tratada, filtrada com biofiltro de biocarvão de coco.





A resposta quantitativa do coentro às proporções de água residuária revelou padrões distintos entre ciclos e entre as duas fontes hídricas, evidenciando a interação entre o aporte nutricional do efluente, o efeito da salinidade acumulada e a eficiência do pós-tratamento com biocarvão.

No primeiro ciclo, a altura de plantas apresentou comportamento quadrático para ambas as fontes. Para a água residuária tratada, o valor máximo foi estimado em aproximadamente 50,7% de AR, resultando em altura de cerca de 14,9 cm. Para a água filtrada em biocarvão, o ponto de máximo ocorreu em proporção mais elevada, próxima de 63,5% de AR, com altura estimada de 15,2 cm. Esse deslocamento do ponto ótimo e o maior valor observado com a água filtrada indicam que o biocarvão contribuiu para reduzir compostos potencialmente fitotóxicos e parte da carga iônica do efluente, favorecendo o aproveitamento dos nutrientes disponíveis. Comportamento semelhante tem sido relatado em sistemas de adsorção com biocarvões capazes de remover sais, compostos orgânicos e metais leves, resultando em melhoria da qualidade da água para fins agrícolas (ACHEAMPONG et al., 2024; ALSHEHRI e PUGAZHENDHI, 2024; FANG et al., 2025).

No segundo ciclo, o padrão mudou, possivelmente devido ao acúmulo de sais no solo após o primeiro cultivo. Esse fenômeno foi documentado em áreas irrigadas continuamente com efluentes, especialmente sob clima quente e alta evaporação (MARQUES et al., 2018; VASCONCELOS, 2014). As plantas fertirrigadas com água tratada apresentaram resposta linear crescente, alcançando valor estimado de 13,1 cm na proporção de 100% de AR, indicando que o efeito do aporte nutricional passou a predominar sobre o estresse salino em níveis elevados de efluente. Em

contraste, a água filtrada manteve ajuste quadrático, com valor máximo estimado em aproximadamente 59,6% de AR, resultando em altura de cerca de 14,5 cm. Embora a amplitude da resposta tenha sido menor em relação ao primeiro ciclo, a água filtrada manteve valores superiores em grande parte das proporções avaliadas, sugerindo persistência parcial do efeito benéfico do biocarvão, mesmo diante de uma possível saturação progressiva do material filtrante. Comportamento esse relatado em estudos que mostram queda gradual na capacidade adsortiva do biocarvão ao longo do uso (BUI et al., 2024; GARCÍA-ÁVILA et al., 2023).

A massa fresca da parte aérea seguiu tendência semelhante. No ciclo 1, ambas as fontes apresentaram ajustes quadráticos, com máximos estimados em 44,5% de AR para a água tratada, resultando em 3,34 g vaso⁻¹, e em 53,8% de AR para a água filtrada, com 3,47 g vaso⁻¹. O maior valor e a ampliação da faixa ótima com a água filtrada indicam que o biocarvão preservou o valor nutricional do efluente, ao mesmo tempo em que reduziu compostos inibidores associados à salinidade, favorecendo a expansão celular e o acúmulo de biomassa fresca. Mecanismo observado em sistemas de microfiltração e adsorção aplicados ao reúso agrícola (ASIRIFI et al., 2023; WANG et al., 2024a). No segundo ciclo, a água tratada apresentou ajuste linear crescente, atingindo 2,23 g vaso⁻¹ na proporção de 100% de AR, enquanto a água filtrada manteve resposta quadrática, com máximo estimado em aproximadamente 64,4% de AR, alcançando 2,29 g vaso⁻¹. Esses resultados indicam que, mesmo após uso contínuo do efluente, o biofiltro manteve resposta mais eficiente em proporções intermediárias.

A massa seca da parte aérea apresentou comportamento coerente com os resultados da massa fresca, porém com maior sensibilidade às proporções de água residuária. No primeiro ciclo, a água tratada apresentou ajuste quadrático, com máximo estimado em cerca de 46,2% de AR, resultando em 0,82 g vaso⁻¹. Para a água filtrada, o máximo ocorreu em proporção mais elevada, próxima de 60,8% de AR, com valor estimado de 0,74 g vaso⁻¹. Apesar do valor superior da água tratada no ciclo 1, a água filtrada apresentou desempenho mais estável em proporções mais altas de AR. No segundo ciclo, a água tratada apresentou ajuste linear crescente, alcançando 0,38 g vaso⁻¹ em 100% de AR, enquanto a água filtrada manteve ajuste quadrático, com máximo estimado em aproximadamente 63,5% de AR, atingindo 0,49 g vaso⁻¹. Esse resultado indica que o biocarvão contribuiu para maior acúmulo de biomassa estrutural, mesmo sob uso continuado do efluente.

A produtividade da água sintetizou os padrões observados anteriormente. No ciclo 1, ambas as fontes apresentaram ajuste quadrático, com máximos estimados em 46,0% de AR para a água tratada, resultando em $0,099 \text{ kg m}^{-3}$, e em 60,6% de AR para a água filtrada, com $0,090 \text{ kg m}^{-3}$. Embora o valor máximo da água tratada tenha sido superior, a água filtrada manteve produtividade mais elevada nas proporções mais altas de AR. Isso indica maior eficiência do uso da água sob condições de maior carga do efluente. No segundo ciclo, a água tratada apresentou ajuste linear crescente, alcançando $0,049 \text{ kg m}^{-3}$ em 100% de AR, enquanto a água filtrada apresentou ajuste quadrático, com máximo estimado em aproximadamente 64,0% de AR, atingindo $0,064 \text{ kg m}^{-3}$. Esses resultados confirmam que o pós-tratamento com biocarvão favoreceu maior eficiência hídrica, sobretudo em proporções intermediárias de água residuária.

De forma geral, os resultados indicam que o pós-tratamento da água residuária com biocarvão de coco regulou a resposta agrônômica do coentro ao longo dos ciclos de cultivo. No primeiro ciclo, o biofiltro ampliou a faixa de proporções de água residuária associadas aos máximos de crescimento, biomassa e produtividade da água. Isso evidenciou melhor equilíbrio entre o aporte nutricional do efluente e os efeitos osmóticos potencialmente associados ao seu uso. No segundo ciclo, embora o efeito positivo tenha sido parcialmente reduzido, a água filtrada manteve desempenho superior ou mais estável em grande parte das proporções avaliadas, especialmente nas faixas intermediárias de AR. Esse comportamento pode estar ligado a limitações que se acumulam com o uso contínuo do efluente. Outra possibilidade é redução do desempenho do biofiltro ao longo do tempo, o que tende a ocorrer quando o material passa por sucessivas aplicações. Ainda assim, os resultados reforçam que o principal benefício do biocarvão não se limita ao aumento pontual da produção, mas à maior estabilidade das respostas agrônômicas sob reúso agrícola.

Entretanto, o estudo foi conduzido em condições controladas e por número limitado de ciclos, o que restringe inferências sobre os efeitos de longo prazo do reúso agrícola com água residuária filtrada. A ausência de avaliações diretas do solo, bem como de parâmetros fisiológicos das plantas, limita a identificação precisa dos mecanismos responsáveis pela redução das respostas no segundo ciclo. Assim, pesquisas futuras devem incluir monitoramento químico e físico do solo, maior número de ciclos sucessivos, avaliação da durabilidade e da necessidade de

renovação do biocarvão e análises integradas da dinâmica solo-água-planta, de modo a consolidar o uso do biocarvão de coco como tecnologia de apoio ao reúso agrícola sustentável.

5. CONCLUSÕES

Os resultados deste estudo demonstram que o uso de águas residuárias tratadas é viável para a fertirrigação do feijão-caupi e do coentro. As respostas agronômicas dependeram do tipo de água utilizada, da proporção de AR aplicada e do número de ciclos de cultivo. Em ambos os cultivos, o reúso agrícola mostrou potencial para reduzir o consumo de água de qualidade superior e aproveitar o aporte de nutrientes do efluente doméstico.

A caracterização dos biocarvões indicou que os materiais apresentam estrutura porosa e propriedades adequadas para uso como meio filtrante. Essas características resultaram em alterações na qualidade da água residuária após a filtragem. Isso acarretou em respostas agronômicas mais estáveis quando o pós-tratamento foi empregado.

No feijão-caupi, a água residuária filtrada com biocarvão apresentou maior estabilidade na maioria das variáveis ao longo dos ciclos, em comparação à água tratada. As análises de regressão indicaram que proporções intermediárias de AR estiveram associadas aos melhores resultados. Em geral, esses valores situaram-se entre 40 e 60%, considerando crescimento, produção e produtividade no uso da água. Esse padrão foi mais evidente quando o efluente passou pelo biofiltro. Isso indica que o principal benefício do pós-tratamento esteve relacionado à redução da variabilidade das respostas agronômicas ao longo do tempo.

Os resultados microbiológicos do feijão-caupi indicam que o uso das águas residuárias tratadas, com ou sem pós-tratamento por biocarvão, não comprometeu a qualidade sanitária do produto colhido. Apesar da preocupação associada ao reúso agrícola quanto à presença de microrganismos patogênicos, os grãos analisados não apresentaram contaminação. Eles atenderam aos critérios de segurança para consumo humano. Esse achado reforça que, nas condições avaliadas, o reúso agrícola pode ser realizado de forma segura quando a água é devidamente tratada.

No cultivo do coentro, o uso da água filtrada também se mostrou vantajoso, especialmente no primeiro ciclo. O pós-tratamento ampliou a faixa de proporções de AR associadas aos maiores valores de altura de plantas, biomassa aérea e produtividade da água. No segundo ciclo, apesar da menor intensidade dos efeitos positivos, a água filtrada apresentou desempenho superior ou mais estável na maioria das proporções, sobretudo nas faixas intermediárias de AR.

De forma conjunta, os resultados mostram que a água residuária, tratada ou pós-tratada com biocarvão, pode ser utilizada na fertirrigação. No entanto, o uso do biofiltro proporcionou maior estabilidade das respostas agrônômicas ao longo dos ciclos. Isso aumenta a confiabilidade do sistema de reúso. As proporções intermediárias de água residuária mostraram-se mais adequadas para conciliar crescimento, produção e eficiência do uso da água.

Cabe destacar que o estudo foi conduzido em condições controladas e por número limitado de ciclos de cultivo. Não foram realizadas avaliações detalhadas do solo nem análises fisiológicas das plantas, o que limita a compreensão dos processos envolvidos nas respostas observadas ao longo do tempo. Assim, pesquisas futuras devem considerar experimentos em escala de campo, maior número de ciclos sucessivos e o monitoramento da dinâmica solo-água-planta. A avaliação da durabilidade do biocarvão e da necessidade de renovação do material filtrante também é recomendada, visando consolidar o uso dessa tecnologia como alternativa sustentável para o reúso agrícola.

REFERÊNCIAS

- ABOU JAOUDE, L.; KAMALEDDINE, F.; BOU SAID, R.; MOHTAR, R.H.; DBAIBO, R.; YANNI, S.F. Treated wastewater reuse and its impact on soil properties and potato and corn growth. **Science of The Total Environment**, v.958, p.178130, 2025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.178130.
- ACHEAMPONG, P.; ADDO, R.; HENYO, B.; SENANU, N.; AMOATEY, P. **Biochar Filtration Systems for Improvement in Wastewater Quality for Irrigation**, 2024.
- ADEEL, M.; GRASEL FROIS, C.F.; BERRUTI, I.; SIRTORI, C.; OLLER, I.; MALATO, S.; RIZZO, L. Effect of microplastics on tertiary/quaternary treatment of urban wastewater: Fe-biochar/peroxymonosulfate/sunlight vs solar photo-Fenton. **Journal of Environmental Management**, v.384, p.125555, 2025. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.125555.
- AL-HAZMI, H.E.; MOHAMMADI, A.; HEJNA, A.; MAJTACZ, J.; ESMAEILI, A.; HABIBZADEH, S.; SAEB, M.R.; BADAWI, M.; LIMA, E.C.; MAKINIA, J. Wastewater reuse in agriculture: Prospects and challenges. **Environmental Research**, v.236, p.116711, 2023. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116711.
- ALKHAMISI, S.A.; AHMED, M.; AL-WARDY, M.; PRATHAPAR, S.A.; CHOUDRI, B.S. Effect of reclaimed water irrigation on yield attributes and chemical composition of wheat (*Triticum aestivum*), cowpea (*Vigna sinensis*), and maize (*Zea mays*) in rotation. **Irrigation Science**, v.35, p.87–98, 2017. DOI: 10.1007/s00271-016-0522-8.
- ALOTAIBI, K.D. Use of biochar for alleviating negative impact of salinity stress in corn grown in arid soil. **Canadian Journal of Soil Science**, v.102, p.187–196, 2022. DOI: 10.1139/cjss-2021-0053.
- ALSHEHRI, M.A.; PUGAZHENDHI, A. Biochar for wastewater treatment: Addressing contaminants and enhancing sustainability: Challenges and solutions. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v.16, p.100504, 2024. DOI: 10.1016/j.hazadv.2024.100504.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; MORAES GONÇALVES, J.L. DE; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, p.711–728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2024: informe anual**. Brasília: [s.n.]. 154p.
- ASDIOU, N.; ALAOUI, S.B.; ELAMRAOUI, S.; BILLAH, R.E.; LAMY, E.; BENHIDA, R.; ACHAK, M. Evaluation of the efficiency of multilayer biofilters for organic pollutants and nutrient removal from raw, diluted, and pretreated olive mill wastewater. **Journal of Water Process Engineering**, v.77, p.108456, 2025. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.108456.
- ASIRIFI, I.; KAETZL, K.; WERNER, S.; HEINZE, S.; ABAGALE, F.K.; WICHERN, M.; LÜBKEN, M.; MARSCHNER, B. Biochar for Wastewater Treatment and Soil

Improvement in Irrigated Urban Agriculture: Single and Combined Effects on Crop Yields and Soil Fertility. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.23, p.1408–1420, 2023. DOI: 10.1007/s42729-023-01132-7.

ASLAM, M.B.; REHMAN, T.U.R.; ALAVI, A.F.; HALEEM, A.; HAQ, A.; AHMED, S.; SAJJAD, W.; BOURHIA, M.; MAHAMAT, O.B.; ALMAARY, K.S.; ALI, M. Design, construction and efficiency analysis of bagasse-based charcoal packed horizontal lab-scale wetland for the removal of antibiotic-resistant bacteria. **BMC Microbiology**, v.25, p.418, 2025. DOI: 10.1186/s12866-025-04061-w.

ATINAFU, D.G.; CHOI, J.Y.; NAM, J.; KANG, Y.; KIM, S. Insights into the effects of biomass feedstock and pyrolysis conditions on the energy storage capacity and durability of standard biochar-based phase-change composites. **Biochar**, v.7, p.18, 2025. DOI: 10.1007/s42773-024-00396-1.

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. **Water Quality for Agriculture (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29 Rev. 1)**. Rome: [s.n.].

BAMGBOYE, T.T.; AVELLÁN, T.; KLÖVE, B.; HAGHIGHI, A.T. Compounding impacts of climate change and urbanisation on water-energy-food Nexus in global south countries. A systematic review. **Environmental and Sustainability Indicators**, v.27, p.100791, 2025. DOI: 10.1016/j.indic.2025.100791.

BARKAOUI, S. EL; MANDI, L.; FICHERA, M.; RYAH, H.; BAÇAOU, A.; BUBBA, M. DEL; OUAZZANI, N. Optimizing biochar-based column filtration systems for enhanced pollutant removal in wastewater treatment: A preliminary study. **Chemosphere**, v.372, p.144067, 2025. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2025.144067.

BAUER, S.; WAGNER, M. Possibilities and Challenges of Wastewater Reuse—Planning Aspects and Realized Examples. **Water**, v.14, p.1619, 2022. DOI: 10.3390/w14101619.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, D.D. DA; SOARES, S. E A.A. **Manual de irrigação**. 9.ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2019. 1–545p.

BISWAL, B.K.; BALASUBRAMANIAN, R. Use of biochar as a low-cost adsorbent for removal of heavy metals from water and wastewater: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.11, p.110986, 2023. DOI: 10.1016/J.JECE.2023.110986.

BRASIL. **RESOLUÇÃO DE DIRETORIA COLEGIADA - RDC Nº 12, DE 02 DE JANEIRO DE 2001**. Agência Nacional de Vigilância Sanitária Brasil Ministério da Saúde, , 2001.

BRASIL. **RESOLUÇÃO Nº 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005**. Conselho Nacional do Meio Ambiente Brasil Ministério do Meio Ambiente, , 2005. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2747>>. Acesso em: 28 abr. 2025

BRASIL. **RESOLUÇÃO Nº 430, DE 13 DE MAIO DE 2011. Conselho Nacional do Meio Ambiente** Brasil Ministério do Meio Ambiente, , 2011.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 161, de 1º de julho de 2022.** [s.l: s.n.].

BRASIL. **Resolução nº 232, de 22 de março de 2022: Aprova o Plano Nacional de Recursos Hídricos 2022–2040 e dá outras providências** Ministério do Desenvolvimento Regional/Conselho Nacional de Recursos Hídricos Brasília, Brasília Diário Oficial da União: seção 1, , 2022b. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-232-de-22-de-marco-de-2022-409696438>>. Acesso em: 10 nov. 2025

BRENGI, S.H.; MOUBARAK, M.; EL-NAGGAR, H.M.; OSMAN, A.R. Promoting salt tolerance, growth, and phytochemical responses in coriander (*Coriandrum sativum* L. cv. Balady) via eco-friendly *Bacillus subtilis* and cobalt. **BMC Plant Biology**, v.24, p.848, 2024. DOI: 10.1186/s12870-024-05517-3.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P.H.; TELLER, E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. **Journal of the American Chemical Society**, v.60, p.309–319, 1938. DOI: 10.1021/ja01269a023.

BUI, V.K.H.; NGUYEN, T.P.; TRAN, T.C.P.; NGUYEN, T.T.N.; DUONG, T.N.; NGUYEN, V.-T.; LIU, C.; NGUYEN, D.D.; NGUYEN, X.C. Biochar-based fixed filter columns for water treatment: A comprehensive review. **Science of The Total Environment**, v.954, p.176199, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.176199.

CABREIRA, L.P.; OLIVEIRA, J.T. DE; BAIO, F.H.R.; OLIVEIRA, R.A. DE; CUNHA, F.F. DA. ECONOMIC FEASIBILITY OF CENTER PIVOT IRRIGATION WITH CORN, COWPEA, AND SOYBEAN CROPS IN SANDY SOILS. **Engenharia Agrícola**, v.44, 2024. DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v44e20230137/2024.

CALISI, A.; SEMERARO, T.; GIORDANO, M.E.; DONDERO, F.; LIONETTO, M.G. Earthworms multi-biomarker approach for ecotoxicological assessment of soils irrigated with reused treated wastewater. **Applied Soil Ecology**, v.206, p.105866, 2025. DOI: 10.1016/j.apsoil.2025.105866.

CARTER, L.J.; ADAMS, B.; BERMAN, T.; COHEN, N.; CYTRYN, E.; ELDER, F.C.T.; GARDUÑO-JIMÉNEZ, A.-L.; GREENWALD, D.; KASPRZYK-HORDERN, B.; KORACH-RECHTMAN, H.; LAHIVE, E.; MARTIN, I.; MORDECHAY, E. BEN; MURRAY, A.K.; MURRAY, L.M.; NIGHTINGALE, J.; RADIAN, A.; RUBIN, A.E.; SALLACH, B.; SELA-DONENFELD, D.; SKILBECK, O.; SLEIGHT, H.; STANTON, T.; ZUCKER, I.; CHEFETZ, B. Co-contaminant risks in water reuse and biosolids application for agriculture. **Environmental Pollution**, v.375, p.126219, 2025. DOI: 10.1016/j.envpol.2025.126219.

CARVALHO, R.S. DE; ARGUELHO, M. DE L.P. DE M.; FACCIOLI, G.G.; OLIVEIRA, R.A. DE; PASSOS, E.S.; SILVA, A.V.; SANTOS, B.F.S. DOS. Utilização do biocarvão de bagaço de laranja na remoção de tetraciclina em água residuária. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v.26, 2021. DOI: 10.1590/s1517-707620210002.1280.

CARVALHO, R.S. DE; FILHO, J.S. DOS S.; SANTANA, L.O.G. DE; GOMES, D.A.; MENDONÇA, L.C.; FACCIOLI, G.G. Influence of wastewater reuse on the microbiological quality of sunflowers for animal feed. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v.8, 2013. DOI: 10.4136/ambiente.1116.

CHAND, N.; SUTHAR, S.; KUMAR, K.; TYAGI, V.K. Enhanced removal of nutrients and coliforms from domestic wastewater in cattle dung biochar-packed *Colocasia esculenta*-based vertical subsurface flow constructed wetland. **Journal of Water Process Engineering**, v.41, p.101994, 2021. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.101994.

CHEN, C.-Y.; CHANG, Y.-H.; LEONG, Y.K.; CHANG, J.-S. Application of algae-bacteria symbiosis system for ammonia nitrogen wastewater treatment. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v.140, p.181–192, 2025a. DOI: 10.1016/j.jbiosc.2025.06.011.

CHEN, H.; YAO, H.; YUAN, J.; KE, H.; ZHANG, X.; HU, A. Performance Evaluation of Diverse Filter Media Combinations Under Different Pollution and Hydraulic Loads in Constructed Wetlands. **Water**, v.17, p.2969, 2025b. DOI: 10.3390/w17202969.

CHEN, L.; FENG, Q.; LI, C.; WEI, Y.; ZHAO, Y.; FENG, Y.; ZHENG, H.; LI, F.; LI, H. Impacts of aquaculture wastewater irrigation on soil microbial functional diversity and community structure in arid regions. **Scientific Reports**, v.7, p.11193, 2017. DOI: 10.1038/s41598-017-11678-z.

CHENG, M.; WANG, H.; FAN, J.; WANG, X.; SUN, X.; YANG, L.; ZHANG, S.; XIANG, Y.; ZHANG, F. Crop yield and water productivity under salty water irrigation: A global meta-analysis. **Agricultural Water Management**, v.256, p.107105, 2021. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.107105.

CHRYSARGYRIS, A.; TZORTZAKIS, N. Optimizing nitrogen, phosphorus, and potassium requirements to improve *Origanum dubium* Boiss. growth, nutrient and water use efficiency, essential oil yield and composition. **Industrial Crops and Products**, v.224, p.120291, 2025. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.120291.

COLANTONI, A.; EVIC, N.; LORD, R.; RETSCHITZEGGER, S.; PROTO, A.R.; GALLUCCI, F.; MONARCA, D. Characterization of biochars produced from pyrolysis of pelletized agricultural residues. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.64, p.187–194, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2016.06.003.

COPPENS, K.; GEYER, T.; MONOD, A.; STRANDE, L.; STOLL, S. Evaluation of vermifilter-treated domestic wastewater for irrigation and fertigation: opportunities and challenges for implementation. **Journal of Water Process Engineering**, v.77, p.108295, 2025. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.108295.

CRISTÓVÃO, M.B.; SÉRIO, J.; MARQUES, A.P.; BENTO-SILVA, A.; GOSSARD, M.; VERGARA-DIAZ, O.; SILVA, A.F.; NUNES, M.; BRONZE, M.R.; OLIVEIRA, P.B. DE; CRESPO, M.T.B.; CRESPO, J.G.; PEREIRA, V.J. Treatment of wastewater effluents using nanofiltration and low pressure UV photolysis to produce high quality water for

food production. **Water Research**, v.289, p.124782, 2026. DOI: 10.1016/j.watres.2025.124782.

CUMBANA, N.C.A.; BARROS JUNIOR, G.; SOUZA, E.S. DE; CARVALHO, A.A. DE; SILVA, J.R.I.; SILVA FAUSTO, C. DA; SANTOS, E.G.F. DOS. Productive and physiological response of *Pereskia grandifolia* Haw. irrigation deficit with grey and brackish water in the Brazilian Semiarid Region. **Journal of South American Earth Sciences**, v.166, p.105738, 2025. DOI: 10.1016/j.jsames.2025.105738.

DANTAS, I.L. DE A. **Análise microbiológica de cenoura e beterraba irrigadas com águas residuárias domésticas tratadas**. 2015. 1–79p. Mestrado em Recursos Hídricos - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

DANTAS, I.L. DE A.; FACCIOLI, G.G.; MENDONÇA, L.C.; NUNES, T.P.; VIEGAS, P.R.A.; SANTANA, L.O.G. DE. Viabilidade do uso de água residuária tratada na irrigação da cultura do rabanete (*Raphanus sativus* L.). **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v.9, 2014. DOI: 10.4136/ambiente-agua.1220.

DRECHSEL, P.; QADIR, M.; GALIBOURG, D. The WHO Guidelines for Safe Wastewater Use in Agriculture: A Review of Implementation Challenges and Possible Solutions in the Global South. **Water**, v.14, p.864, 2022. DOI: 10.3390/w14060864.

DREI, P.; MANCUSO, G.; LAVRNIĆ, S.; MAFFETTONE, R.; SPIZZIRRI, M.; MERLUZZI, L.; MASTRANTONIO, A.; BURLA, P.; TOSCANO, A. A novel methodology to develop EU water reuse risk management plan in agricultural water distribution networks and crop irrigation systems. **Water Research X**, v.28, p.100395, 2025. DOI: 10.1016/j.wroa.2025.100395.

ĐUKANOVIĆ, N.; APOSTOLOVIĆ, T.; ANOJČIĆ, J.; MUTIĆ, S.; MARJANOVIĆ SREBRO, T.; KOZMA, G.; DEÁK, C.; MALETIĆ, S.; BELJIN, J. Comparative Study of Biochar from Different Biomass Feedstocks: Toward Sustainable Resource Utilization and Environmental Applications. **Molecules**, v.31, p.37, 2025. DOI: 10.3390/molecules31010037.

EL-GAMAL, E.H.; SALEH, M.; ELSOKKARY, I.; RASHAD, M.; EL-LATIF, M.M.A. Comparison between Properties of Biochar Produced by Traditional and Controlled Pyrolysis. **Alexandria Science Exchange Journal**, v.38, p.412–425, 2017.

ELSAMAN, N.K.; AMIN, A.E.-E.A.Z.; EL-RAZEK, M.A.; ROSHDY, N.M.K. Comparative effects of different types and doses of biochar on soil quality indicators and arugula growth under saline conditions. **Scientific Reports**, v.15, p.10046, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-92816-w.

EL-SAYED, M.E.A.; HAZMAN, M.; ABD EL-RADY, A.G.; ALMAS, L.; MCFARLAND, M.; SHAMS EL DIN, A.; BURIAN, S. Biochar Reduces the Adverse Effect of Saline Water on Soil Properties and Wheat Production Profitability. **Agriculture**, v.11, p.1112, 2021. DOI: 10.3390/agriculture11111112.

ENAIME, G.; BAÇAOUI, A.; YAACOUBI, A.; LÜBKEN, M. Biochar for Wastewater Treatment—Conversion Technologies and Applications. **Applied Sciences**, v.10, p.3492, 2020. DOI: 10.3390/app10103492.

ETEDALI, M.R.; ESLAMIAN, S. COD reduction of potato processing wastewater using natural and commercial adsorbents. **Desalination and Water Treatment**, v.192, p.146–154, 2020. DOI: 10.5004/dwt.2020.25720.

EUROPEAN UNION. **Regulation (EU) 2020/741 on minimum requirements for water reuse**. Brussels: European Commission: [s.n.].

FACCIOLI, G.G.; RAMOS, F.S. DE M.; SANTANA, F.S.; DANTAS, C.K. DOS S. ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS E MICROBIOLÓGICAS DO FEIJÃO-CAUPI (*Vigna unguiculada* (L.) Walp.) BRS NOVAERA E BRS GUARIBA COM APLICAÇÃO DE ÁGUA RESIDUÁRIA TRATADA. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.11, p.1707–1713, 2017. DOI: 10.7127/rbai.v11n500761.

FANG, J.; WANG, D.; WILKIN, R.; SU, C. Realistic and field scale applications of biochar for water remediation: A literature review. **Journal of Environmental Management**, v.385, p.125524, 2025. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.125524.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2025 – Addressing land degradation across landholding scales**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2025. DOI: 10.4060/cd7067en.

FAOSTAT. **FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>>. Acesso em: 30 jan. 2023.

GAO, Y.; SHAO, G.; WU, S.; XIAOJUN, W.; LU, J.; CUI, J. Changes in soil salinity under treated wastewater irrigation: A meta-analysis. **Agricultural Water Management**, v.255, p.106986, 2021. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106986.

GARCÍA-ÁVILA, F.; GALARZA-GUAMÁN, A.; BARROS-BERMEJO, M.; ALFARO-PAREDES, E.A.; AVILÉS-AÑAZCO, A.; IGLESIAS-ABAD, S. Integration of high-rate filtration using waste-derived biochar as a potential sustainable technology for drinking water supply. **Biochar**, v.5, p.62, 2023. DOI: 10.1007/s42773-023-00256-4.

GEÇA, M.; WIŚNIEWSKA, M.; NOWICKI, P. Biochars and activated carbons as adsorbents of inorganic and organic compounds from multicomponent systems – A review. **Advances in Colloid and Interface Science**, v.305, p.102687, 2022. DOI: 10.1016/j.cis.2022.102687.

HAJJAR, T.; MOHTAR, R.H.; ABOU JAOUDE, L.; YANNI, S.F. Treated wastewater reuse for irrigation in a semi-arid region. **Science of The Total Environment**, v.966, p.178579, 2025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178579.

HANIF, M.A.; IBRAHIM, N.; DAHALAN, F.A.; MD. ALI, U.F.; HASAN, M.; AZHARI, A.W.; JALIL, A.A. Microplastics in facial cleanser: extraction, identification, potential toxicity, and continuous-flow removal using agricultural waste-based biochar.

Environmental Science and Pollution Research, v.30, p.60106–60120, 2023. DOI: 10.1007/s11356-023-26741-8.

HASANOGLU, S.; AKYILDIZ, D.; GUNEY, I.Y.; GÖNDER, Z.B.; YILMAZ, G.; VERGILI, I.; AYDINER, C.; KAYA, Y. Resource recovery as irrigation water and struvite from forward osmosis-based anaerobic microfiltration-membrane bioreactors treating slaughterhouse wastewater. **Journal of Water Process Engineering**, v.75, p.108088, 2025. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.108088.

HASHEM, M.S.; QI, X. Treated Wastewater Irrigation—A Review. **Water**, v.13, p.1527, 2021. DOI: 10.3390/w13111527.

HE, L.; YANG, G.; XUE, J.; HUANG, W.; WANG, Y.; HAN, X.; FANG, F.; LI, Y.; XIAO, K.; XIA, X.; SONG, G.; LI, Z. Efficient removal of fecal coliforms from blackwater using polyethyleneimine-modified corn stover biochar: Adsorption performance and mechanisms. **Environmental Technology & Innovation**, v.40, p.104652, 2025. DOI: 10.1016/j.eti.2025.104652.

HUA, Z.; PAN, Y.; HONG, Q. Adsorption of Congo red dye in water by orange peel biochar modified with CTAB. **RSC Advances**, v.13, p.12502–12508, 2023. DOI: 10.1039/D3RA01444D.

IAMSAARD, K.; WENG, C.-H.; TZENG, J.-H.; ANOTAI, J.; JACOBSON, A.R.; LIN, Y.-T. Systematic optimization of biochars derived from corn wastes, pineapple leaf, and sugarcane bagasse for Cu(II) adsorption through response surface methodology. **Bioresource Technology**, v.382, p.129131, 2023. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.129131.

IBRAHIM, M.M.; SHABAN, M.; EL-KARIM, E.A.; SAMY, A. Multi-criteria data-driven framework for drainage water reuse sustainability. **Ain Shams Engineering Journal**, v.16, p.103782, 2025. DOI: 10.1016/j.asej.2025.103782.

INGRAO, C.; STRIPPOLI, R.; LAGIOIA, G.; HUISINGH, D. Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. **Heliyon**, v.9, p.e18507, 2023. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18507.

JABBOROVA, D.; ABDRAKHMANOV, T.; JABBAROV, Z.; ABDULLAEV, S.; AZIMOV, A.; MOHAMED, I.; ALHARBI, M.; ABU-ELSAOUD, A.; ELKELISH, A. Biochar improves the growth and physiological traits of alfalfa, amaranth and maize grown under salt stress. **PeerJ**, v.11, p.e15684, 2023. DOI: 10.7717/peerj.15684.

JAGADEESH, N.; SUNDARAM, B. Adsorption of Pollutants from Wastewater by Biochar: A Review. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v.9, p.100226, 2023. DOI: 10.1016/j.hazadv.2022.100226.

JARAMILLO, M.; RESTREPO, I. Wastewater Reuse in Agriculture: A Review about Its Limitations and Benefits. **Sustainability**, v.9, p.1734, 2017. DOI: 10.3390/su9101734.

KALENGYO, R.B.; IBRAHIM, M.G.; FUJII, M.; NASR, M. Utilizing orange peel waste biomass in textile wastewater treatment and its recyclability for dual biogas and biochar production: a techno-economic sustainable approach. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v.14, p.19875–19888, 2024. DOI: 10.1007/s13399-023-04111-1.

KARA, T.; BHARTI, V.S.; AMAL, C.T.; BISWAS, S.; KONDURI, A.; ADAKNEY, S.; KRISHNAN, S.; BHUVANESWARI, G.R. Sugarcane bagasse and paddy straw biochar amendment in degraded inland saline soil improves water and sediment quality and growth of genetically improved farmed tilapia (GIFT). **Aquaculture Reports**, v.43, p.102975, 2025. DOI: 10.1016/j.aqrep.2025.102975.

KASSIS, J.; CARPANEZ, T.G.; MELO JUNIOR, A.M. DE; MENDONÇA, H.V. DE; OTENIO, M.H.; SILVA, J.B.G.; BOTTREL, S.E.C. Recycling in livestock: Reuse of corral washing water and reduction of the release of pathogenic microorganisms into the environment. **Journal of Water Process Engineering**, v.76, p.108217, 2025. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.108217.

KHAN, B.A.; AHMAD, M.; BOLAN, N.; FAROOQI, A.; IQBAL, S.; MICKAN, B.; SOLAIMAN, Z.M.; SIDDIQUE, K.H.M. A mechanistic approach to arsenic adsorption and immobilization in aqueous solution, groundwater, and contaminated paddy soil using pine-cone magnetic biochar. **Environmental Research**, v.245, p.117922, 2024. DOI: 10.1016/J.ENVRES.2023.117922.

KÖPPEN BRASIL. **Classificação climática de Köppen para os municípios brasileiros**. Disponível em: <<https://koppenbrasil.github.io/>>. Acesso em: 12 set. 2024.

LEWIS, S.W. Spectroscopic Techniques. Em: **Encyclopedia of Forensic Sciences, Third Edition**. [s.l.] Elsevier, 2023. p.573–582. DOI: 10.1016/B978-0-12-823677-2.00078-7.

LIU, P.; BOFFA, L.; CRAVOTTO, G. Biochar Derived from Agricultural Residues for Wastewater Contaminant Removal. **Sustainability**, v.18, p.435, 2026. DOI: 10.3390/su18010435.

MA, G.; XI, Z.; CHEN, Y.; XU, W.; SUN, C.; ZHUANG, W.; ZHANG, T.; LI, D.; PAN, Y.; LI, Y.-Y.; KONG, Z. Biofiltration for low-carbon rural wastewater treatment: A review of advancements and opportunities towards carbon neutrality. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.12, p.114373, 2024. DOI: 10.1016/j.jece.2024.114373.

MAINARDIS, M.; CECCONET, D.; MORETTI, A.; CALLEGARI, A.; GOI, D.; FREGUIA, S.; CAPODAGLIO, A.G. Wastewater fertigation in agriculture: Issues and opportunities for improved water management and circular economy. **Environmental Pollution**, v.296, p.118755, 2022. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118755.

MANCUSO, G.; FOGLIA, A.; CHIOGGIA, F.; DREI, P.; EUSEBI, A.L.; LAVRNIĆ, S.; SIROLI, L.; CARROZZINI, L.M.; FATONE, F.; TOSCANO, A. Demo-scale up-flow anaerobic sludge blanket reactor coupled with hybrid constructed wetlands for energy-carbon efficient agricultural wastewater reuse in decentralized scenarios.

Journal of Environmental Management, v.359, p.121109, 2024. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121109.

MANCUSO, G.; LAVRNIĆ, S.; CANET-MARTÍ, A.; ZAHEER, A.; AVOLIO, F.; LANGERGRABER, G.; TOSCANO, A. Performance of lagoon and constructed wetland systems for tertiary wastewater treatment and potential of reclaimed water in agricultural irrigation. **Journal of Environmental Management**, v.348, p.119278, 2023. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119278.

MARQUES, M.V.A.; TEIXEIRA DE MATOS, A.; PINHEIRO DA SILVA, D.A.; RIBEIRO SILVÉRIO, T.H. SODICIDADE E SALINIDADE DE SOLO SUBMETIDO À FERTIRRIGAÇÃO COM ESGOTO BRUTO APLICADO EM SULCOS FECHADOS. **REVISTA ENGENHARIA NA AGRICULTURA - REVENG**, v.26, p.464–472, 2018. DOI: 10.13083/reveng.v26i5.890.

MATESUN, J.; PETRIK, L.; MUSVOTO, E.; AYINDE, W.; IKUMI, D. Limitations of wastewater treatment plants in removing trace anthropogenic biomarkers and future directions: A review. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.281, p.116610, 2024. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2024.116610.

MATOS, A.T. DE; MATOS, M.P. DE. **Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos**. Viçosa: UFV, 2017. 371p.

MELLOUL, A.A.; FLATA, K.; FADELI, S. EL; ABBASSI, A. EL; PINEAU, A.; BARKOUCH, Y. Modeling slow sand filtration for sustainable safe wastewater reuse in agriculture in Draa Sfar mine region (Marrakech, Morocco). **Desalination and Water Treatment**, v.315, p.280–286, 2023. DOI: 10.5004/dwt.2023.30135.

MELONES-PEÑA, N.; MAROTO-MELLE, E.C.; REY, S.T.-D.; PÉREZ-VALENCIANO, A.; MARTÍN-GUTIÉRREZ, M.J.; GRACIA-LOR, E. Ecotoxicological risk and seasonal removal of licit and illicit drugs in wastewater treatment plants: A comparison of secondary and tertiary processes. **Journal of Hazardous Materials**, v.499, p.140290, 2025. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.140290.

MIAN, M.M.; AO, W.; XIAO, L.; XIAO, J.; DENG, S. Preparation of low-cost sludge-based highly porous biochar for efficient removal of refractory pollutants from agrochemical and pharmaceutical wastewater. **Journal of Hazardous Materials**, v.478, p.135572, 2024. DOI: 10.1016/J.JHAZMAT.2024.135572.

MISHRA, B.; SACHAN, R.; RAO, L.S.; MAHOBIA, G.S. Green coconut husk biochar-a sustainable reductant in ironmaking processes. **Waste Management**, v.207, p.115130, 2025. DOI: 10.1016/j.wasman.2025.115130.

MNYANGO, J.I.; NYONI, B.; PHIRI, C.; FOUA-MBANGA, B.G.; AMUSAT, S.O.; MARINGA, A.; YALALA-NDLOVU, B.; HLABANO-MOYO, B.; TYWABI-NGEVA, Z.; HLANGOTHI, S.P. Sustainable wastewater treatment: Mechanistic, environmental, and economic insights into biochar for synthetic dye removal. **Next Materials**, v.9, p.100974, 2025. DOI: 10.1016/j.nxmate.2025.100974.

MOHAMED, H.A.; RENGEL, Z.; BOLAN, N.; KHAN, B.A.; SIDDIQUE, K.H.M.; SOLAIMAN, Z.M. Adsorption of Ammonium from Anaerobic Food Waste Digestate by Pristine and Modified Eucalyptus Biochar for Nitrogen Fertiliser Use. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, 2025. DOI: 10.1007/s42729-025-02414-y.

MUOGHALU, C.C.; OWUSU, P.A.; LEBU, S.; NAKAGIRI, A.; SEMIYAGA, S.; IORHEMEN, O.T.; MANGA, M. Biochar as a novel technology for treatment of onsite domestic wastewater: A critical review. **Frontiers in Environmental Science**, v.11, 2023. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1095920.

MURILLO-AMADOR, B.; TROYO-DIÉGUEZ, E.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, J.L.; LÓPEZ-AGUILAR, R.; ÁVILA-SERRANO, N.Y.; ZAMORA-SALGADO, S.; RUEDA-PUENTE, E.O.; KAYA, C. Effect of NaCl salinity in the genotypic variation of cowpea (*Vigna unguiculata*) during early vegetative growth. **Scientia Horticulturae**, v.108, p.423–431, 2006. DOI: 10.1016/j.scienta.2006.02.010.

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

NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 3 mar. 2026.

OBIJANYA, C.C.; YAKAMERCAN, E.; KARIMI, M.; VELURU, S.; SIMKO, I.; ESHKABILOV, S.; SIMSEK, H. Agricultural Irrigation Using Treated Wastewater: Challenges and Opportunities. **Water**, v.17, p.2083, 2025. DOI: 10.3390/w17142083.

OFORI, S.; ABEBRESE, D.K.; RŮŽIČKOVÁ, I.; WANNER, J. Reuse of Treated Wastewater for Crop Irrigation: Water Suitability, Fertilization Potential, and Impact on Selected Soil Physicochemical Properties. **Water**, v.16, p.484, 2024. DOI: 10.3390/w16030484.

OLIVEIRA, A.R. DE; BARBOSA, T.A.; MENDONÇA, L.C. Adsorção de poluentes em águas residuárias utilizando biocarvão: revisão sistemática. **Research, Society and Development**, v.12, p.e23712441228, 2023. DOI: 10.33448/rsd-v12i4.41228.

OLIVEIRA, J.T. DE; MARADINI, P. DA S.; BORGES, A.C.; GAVA, R. VIABILIDADE DA FERTIRRIGAÇÃO POR PIVÔ CENTRAL COM USO DE EFLUENTES TRATADOS EM DIFERENTES NÍVEIS. **Nativa**, v.9, p.23–29, 2021. DOI: 10.31413/nativa.v9i1.10884.

ORTEGA, J.F.S.; SARMIENTO, D.S.; LARA, Á.P.; DÍAZ-PÉREZ, M. Evaluating the long-term effects of reclaimed wastewater irrigation on mango (*Mangifera indica* L.) cultivation: Soil quality, fruit yield, and fruit quality. **Agricultural Water Management**, v.316, p.109604, 2025. DOI: 10.1016/j.agwat.2025.109604.

OSORIO, A.; PANICO, A.; BUSICO, G.; MASTROCICCO, M. Systematic review on the effects of wastewater chemical composition on crop yield under fertigation practices. **Science of The Total Environment**, v.975, p.179257, 2025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.179257.

OUYANG, Z.; ZHANG, J.; LIANG, X.; WANG, H.; YANG, Z.; TANG, R.; YU, Q.; ZHANG, Y. Micro-nano aerated subsurface drip irrigation and biochar promote photosynthesis, dry matter accumulation and yield of cucumbers in greenhouse. **Agricultural Water Management**, v.308, p.109295, 2025. DOI: 10.1016/j.agwat.2025.109295.

PALANSOORIYA, K.N.; YANG, Y.; TSANG, Y.F.; SARKAR, B.; HOU, D.; CAO, X.; MEERS, E.; RINKLEBE, J.; KIM, K.-H.; OK, Y.S. Occurrence of contaminants in drinking water sources and the potential of biochar for water quality improvement: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v.50, p.549–611, 2020. DOI: 10.1080/10643389.2019.1629803.

PALIAGA, S.; MUSCARELLA, S.M.; ALDUINA, R.; BADALUCCO, L.; BULACIO FISCHER, P.T.; LETO, Y. DI; GALLO, G.; MANNINA, G.; LAUDICINA, V.A. The effects of enriched biochar and zeolite and treated wastewater irrigation on soil fertility and tomato growth. **Journal of Environmental Management**, v.380, p.124990, 2025. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.124990.

PANDEY, D.; SINGH, S.V.; SAVIO, N.; BHUTTO, J.K.; SRIVASTAVA, R.K.; YADAV, K.K.; SHARMA, R.; NANDIPAMU, T.M.K.; SARKAR, B. Biochar application in constructed wetlands for wastewater treatment: A critical review. **Journal of Water Process Engineering**, v.69, p.106713, 2025. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.106713.

PANG, Y.L.; LAW, Z.X.; LIM, S.; CHAN, Y.Y.; SHUIT, S.H.; CHONG, W.C.; LAI, C.W. Enhanced photocatalytic degradation of methyl orange by coconut shell-derived biochar composites under visible LED light irradiation. **Environmental Science and Pollution Research**, v.28, p.27457–27473, 2021. DOI: 10.1007/s11356-020-12251-4.

PENG, L.; YIN, X.; ZI, R.; FANG, Q.; HAN, Z.; ZHAO, L. Biochar delays the downward water infiltration and improves soil moisture retention on cultivated sloping land in the karst region. **Soil and Tillage Research**, v.256, p.106839, 2026. DOI: 10.1016/j.still.2025.106839.

PEREIRA, L.S.; ALLEN, R.G.; PAREDES, P.; LÓPEZ-URREA, R.; RAES, D.; SMITH, M.; KILIC, A.; SALMAN, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Em: **FAO**. 2.ed. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, 56 Rev.1., 2025. p.401. DOI: 10.4060/cd6621en.

PEREZ-MERCADO, L.F.; LALANDER, C.; BERGER, C.; DALAHMEH, S.S. Potential of Biochar Filters for Onsite Wastewater Treatment: Effects of Biochar Type, Physical Properties and Operating Conditions. **Water**, v.10, p.1835, 2018. DOI: 10.3390/w10121835.

POOPISUT, P.; BOONYANAN, P.; BOONTAWAN, P.; SUKJIT, E.; PROMSAMPAO, N.; CHOLLACOOP, N.; KETUDAT-CAIRNS, M.; PATTIYA, A.; BOONTAWAN, A. Oleaginous yeast, *Rhodotorula paludigena* CM33, platform for bio-oil and biochar productions via fast pyrolysis. **Biotechnology for Biofuels and Bioproducts**, v.16, p.17, 2023. DOI: 10.1186/s13068-023-02270-x.

PRADHAN, S.; PARTHASARATHY, P.; MACKEY, H.R.; AL-ANSARI, T.; MCKAY, G. Food waste biochar: a sustainable solution for agriculture application and soil–water remediation. **Carbon Research**, v.3, p.41, 2024. DOI: 10.1007/s44246-024-00123-2.

QADIR, M.; DRECHSEL, P.; JIMÉNEZ CISNEROS, B.; KIM, Y.; PRAMANIK, A.; MEHTA, P.; OLANIYAN, O. Global and regional potential of wastewater as a water, nutrient and energy source. **Natural Resources Forum**, v.44, p.40–51, 2020. DOI: 10.1111/1477-8947.12187.

QIU, X.; ZHAO, Y.; ZHAO, C.; JIN, R.; LI, C.; MUTABAZI, E. Physicochemical and adsorptive properties of biochar derived from municipal sludge: sulfamethoxazole adsorption and underlying mechanism. **Frontiers in Environmental Science**, v.11, 2023. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1275087.

RAMOS, F.S. DE M. **Características agronômicas e microbiológicas da couve manteiga (brassica oleracea l.) Irrigada com água residuária tratada em ambiente protegido**. 2021. 1–67p. Mestrado em Recursos Hídricos - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

RAVELOMBOLA, W.; SHI, A.; WENG, Y.; MOU, B.; MOTES, D.; CLARK, J.; CHEN, P.; SRIVASTAVA, V.; QIN, J.; DONG, L.; YANG, W.; BHATTARAI, G.; SUGIHARA, Y. Association analysis of salt tolerance in cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) at germination and seedling stages. **Theoretical and Applied Genetics**, v.131, p.79–91, 2018. DOI: 10.1007/s00122-017-2987-0.

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. USDA Handbook No. 60 ed. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, 1954.

RIZZIOLI, F.; BENEDETTI, V.; PATUZZI, F.; BARATIERI, M.; BOLZONELLA, D.; BATTISTA, F. Valorization of orange peels in a biorefinery loop: recovery of limonene and production of volatile fatty acids and activated carbon. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v.14, p.9793–9803, 2024. DOI: 10.1007/s13399-023-03738-4.

ROCHA, F.; RATOLA, N.; HOMEM, V. Heavy metal(loid)s and nutrients in sewage sludge in Portugal – Suitability for use in agricultural soils and assessment of potential risks. **Science of The Total Environment**, v.964, p.178595, 2025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178595.

SAARELA, T.; LAFDANI, E.K.; LAURÉN, A.; PUMPANEN, J.; PALVIAINEN, M. Biochar as adsorbent in purification of clear-cut forest runoff water: adsorption rate and adsorption capacity. **Biochar**, v.2, p.227–237, 2020. DOI: 10.1007/s42773-020-00049-z.

SADHIYAN, B.; MEZLINI, W.; MADAN, S.; KUMARI, M. Biochar in constructed wetlands and biofilters: Unveiling its potential for wastewater treatment enhancement and ecological benefits. **Groundwater for Sustainable Development**, v.31, p.101533, 2025. DOI: 10.1016/j.gsd.2025.101533.

SAHOO, S.S.; KALE, R.K.; CHOWDHURY, P. Treatment of toxic Imidacloprid pesticide-laden agricultural wastewater using low-grade coal-derived adsorbent. **Chemical Papers**, v.77, p.5961–5977, 2023. DOI: 10.1007/s11696-023-02913-1.

SALAM, A.; BASHIR, S.; KHAN, I.; HU, H. Biochar production and characterization as a measure for effective rapeseed residue and rice straw management: an integrated spectroscopic examination. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v.12, p.2687–2696, 2022. DOI: 10.1007/s13399-020-00820-z.

SCHAER-BARBOSA, M.; SANTOS, M.E.P. DOS; MEDEIROS, Y.D.P. Viabilidade do reúso de água como elemento mitigador dos efeitos da seca no semiárido da Bahia. **Ambiente & Sociedade**, v.17, p.17–32, 2014. DOI: 10.1590/S1414-753X2014000200003.

SCHREITER, I.J.; SCHMIDT, W.; KUMAR, A.; GRABER, E.R.; SCHÜTH, C. Effect of water leaching on biochar properties and its impact on organic contaminant sorption. **Environmental Science and Pollution Research**, v.27, p.691–703, 2020. DOI: 10.1007/s11356-019-06904-2.

SHAKER, A.M.; KHEDAWY, M.; MONEER, A.A.; EL-MALLAH, N.M.; RAMADAN, M.S. Loading of anionic surfactant on eco-friendly biochar and its applications in Cr(VI) removal: adsorption, kinetics, and reusability studies. **BMC Chemistry**, v.19, p.12, 2025. DOI: 10.1186/s13065-024-01363-4.

SHEHZAD, K.; XU, Y.; ALI, S.; ZHANG, S.; LI, C.; XI, M.; ANOJAIDI, K.I.; ALSUWAYLIH, W.A.; ALSUWAYLIH, M.A.; ALMUBARAK, A.H.; WANG, Y.; LI, N.; WANG, Z. Iron-modified orange peel biochar for highly efficient arsenic(III) removal: Adsorption performance and process optimization via box-Behnken design. **Results in Chemistry**, v.18, p.102848, 2025. DOI: 10.1016/j.rechem.2025.102848.

SILVA, M.A.D.; COELHO JÚNIOR, L.F.; SANTOS, A.P. Vigor de sementes de coentro (*Coriandrum sativum* L.) provenientes de sistemas orgânico e convencional. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.14, p.192–196, 2012. DOI: 10.1590/S1516-05722012000500012.

SIMPSON, J.; SIMPSON, B.S.; GERBER, C. Effect of secondary and tertiary wastewater treatment methods on opioids and the subsequent environmental impact of effluent and biosolids. **Chemosphere**, v.364, p.143307, 2024. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.143307.

SING, K.S.W.; EVERETT, D.H.; HAUL, R.A.W.; MOSCOU, L.; PIEROTTI, R.A.; ROUQUEROL, J.; SIEMIENIEWSKA, T. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). **Pure and Applied Chemistry**, v.57, p.603–619, 1985. DOI: 10.1351/pac198557040603.

SINGH, A. A review of wastewater irrigation: Environmental implications. **Resources, Conservation and Recycling**, v.168, p.105454, 2021. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105454.

SOUNDARI, L.; PRASANNA, K. Optimum usage of biochar derived from agricultural biomass in removing organic pollutant present in pharmaceutical wastewater.

Sustainable Chemistry for the Environment, v.10, p.100259, 2025. DOI: 10.1016/j.scenv.2025.100259.

SOUSA, L. DE B. DE; MONTENEGRO, A.A. DE A.; ISIDORO, J.M.G.P.; SILVA, T.G.F. DA; ALMEIDA, T.A.B.; LIMA, J.L.M.P. DE; GIONGO, P.R.; JARDIM, A.M. DA R.F.; SILVA, M.V. DA; FRANÇA E SILVA, Ê.F. DE; LIMA, B.L. DE C. Monitoring soil conservation techniques via UAV for sustainable production of intercropped forage cactus with reuse water in the Brazilian semiarid region. **Field Crops Research**, v.334, p.110120, 2025. DOI: 10.1016/j.fcr.2025.110120.

SOUZA, A.C.D.M.; LIRA, T.P.; COSTA, A.F. DA; FRACETTO, F.J.C.; FRACETTO, G.G.M.; LIRA JUNIOR, M.A. BIOLOGICAL NITROGEN FIXATION STABILITY OF COWPEA CULTIVARS WITH TROPICAL SEMI-ARID RHIZOBIAL STRAINS. **Revista Caatinga**, v.34, p.359–369, 2021. DOI: 10.1590/1983-21252021v34n212rc.

SOUZA, A.M.D.S.; CUNHA, F.F. DA; FACCIOLI, G.G.; SANTANA, F.S.; SANTOS, K.V. Lettuce Fertigation with Domestic Effluent Treated with Orange Pomace Biochar. **Water (Switzerland)**, v.14, 2022. DOI: 10.3390/w14203272.

SOUZA, C. DE O.; PASSOS, R.R.; GONÇALVES, E. DE O. Biocarvão como condicionar de substratos para a produção de mudas de espécies florestais nativas. **Research, Society and Development**, v.12, p.e2712943156, 2023. DOI: 10.33448/rsd-v12i9.43156.

STAFF, N.R.COUNCIL. **Issues in Potable Reuse: The Viability of Augmenting Drinking Water Supplies With Reclaimed Water**. Washington, D.C.: National Academies Press, 1998. DOI: 10.17226/6022.

SUDRATT, N.; FAIYUE, B. Biochar Mitigates Combined Effects of Soil Salinity and Saltwater Intrusion on Rice (*Oryza sativa* L.) by Regulating Ion Uptake. **Agronomy**, v.13, p.815, 2023. DOI: 10.3390/agronomy13030815.

SUHARTINI, S.; VINURILA, A.; ROHMA, N.A.; PRATAMA, A.P.A.; DEWI, I.A.; HIDAYAT, N.; SUNYOTO, N.M.S.; NAFI'AH, R.W.; FATRIASARI, W.; MELVILLE, L. Efficient tofu wastewater treatment with biofiltration using OPEFB-activated carbon. **South African Journal of Chemical Engineering**, v.54, p.506–518, 2025. DOI: 10.1016/j.sajce.2025.09.012.

TADESSE, A.W.; HUANG, M.; ZHOU, T. Biochar for Wastewater Treatment: Preparation, Modification, Characterization, and Its Applications. **Molecules**, v.30, p.4288, 2025. DOI: 10.3390/molecules30214288.

TANVEER, A.; PRADHAN, S.; TONG, Y.; PASHA, M.; SHETTY, A.R.; EMADI, A. AL; AL-ANSARI, T.; MCKAY, G. Valorization of orange peel via slow pyrolysis: Effect of particle size on biochar characteristics for wastewater remediation. **Results in Engineering**, v.27, p.106612, 2025. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.106612.

TROTTA, V.; BAALOUJ, O.; BRIENZA, M. Risks associated with wastewater reuse in agriculture: investigating the effects of contaminants in soil, plants, and insects. **Frontiers in Environmental Science**, v.12, 2024. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1358842.

USEPA. **Guidelines for Water Reuse**. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency: [s.n.].

VANMARCKE, H.; TUYTSCHAEVER, T.; EVERAERT, B.; CUYPERE, T. DE; SAMPERS, I. Impact of using stored treated municipal wastewater for irrigation on the microbial quality and safety of vegetable crops. **Agricultural Water Management**, v.297, p.108842, 2024. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.108842.

VASCONCELOS, M. DA C. DA C. DE A. Salinização do solo em áreas irrigadas: Aspectos físicos e químicos. **AGROPECUÁRIA CIENTÍFICA NO SEMIÁRIDO**, v.10, p.20–25, 2014.

VOBRUBA, T.; HARTL, M.; LANGERGRABER, G.; PUCHER, B.; GATTRINGER, H.; BERTINO, G.; PANZENBÖCK, F.; KISSER, J. vertECO® vertical green wall system demonstration for domestic wastewater treatment and on-site reuse in an Austrian eco-village. **Ecological Engineering**, v.211, p.107460, 2025. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2024.107460.

WANG, L.; BLANCHY, G.; CORNELIS, W.; GARRÉ, S. Changes in soil hydraulic and physio-chemical properties under treated wastewater irrigation: A meta-analysis. **Agricultural Water Management**, v.295, p.108752, 2024a. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.108752.

WANG, T.; LIU, L.; ZUO, Q.; WU, X.; XU, Y.; SHI, J.; SHENG, J.; JIANG, P.; BENGAL, A. Characterizing the hysteretic effects of water and salinity stresses on root-water-uptake. **Agricultural Water Management**, v.305, p.109121, 2024b. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.109121.

WEST, D.W.; FRANCOIS, L.E. Effects of Salinity on Germination, Growth and Yield of Cowpea. **Irrigation Science**, v.3, p.169–175, 1982.

WHO. **Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater in agriculture and aquaculture**. Geneva: [s.n.].

XIANG, W.; ZHANG, X.; CHEN, J.; ZOU, W.; HE, F.; HU, X.; TSANG, D.C.W.; OK, Y.S.; GAO, B. Biochar technology in wastewater treatment: A critical review. **Chemosphere**, v.252, p.126539, 2020. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126539.

XIAO, L.; LIN, Y.; CHEN, D.; ZHAO, K.; WANG, Y.; YOU, Z.; ZHAO, R.; XIE, Z.; LIU, J. Maximizing crop yield and water productivity through biochar application: A global synthesis of field experiments. **Agricultural Water Management**, v.305, p.109134, 2024. DOI: 10.1016/j.agwat.2024.109134.

XIONG, X.; YU, I.K.M.; TSANG, D.C.W.; BOLAN, N.S.; SIK OK, Y.; IGALAVITHANA, A.D.; KIRKHAM, M.B.; KIM, K.-H.; VIKRANT, K. Value-added chemicals from food

supply chain wastes: State-of-the-art review and future prospects. **Chemical Engineering Journal**, v.375, p.121983, 2019. DOI: 10.1016/j.cej.2019.121983.

YALIN, D.; CRADDOCK, H.A.; ASSOULINE, S.; MORDECHAY, E. BEN; BEN-GAL, A.; BERNSTEIN, N.; CHAUDHRY, R.M.; CHEFETZ, B.; FATTA-KASSINOS, D.; GAWLIK, B.M.; HAMILTON, K.A.; KHALIFA, L.; KISEKKA, I.; KLAPP, I.; KORACH-RECHTMAN, H.; KURTZMAN, D.; LEVY, G.J.; MAFFETTONE, R.; MALATO, S.; MANAIA, C.M.; MANOLI, K.; MOSHE, O.F.; RIMELMAN, A.; RIZZO, L.; SEDLAK, D.L.; SHNIT-ORLAND, M.; SHTULL-TRAURING, E.; TARCHITZKY, J.; WELCH-WHITE, V.; WILLIAMS, C.; MCLAIN, J.; CYTRYN, E. Mitigating risks and maximizing sustainability of treated wastewater reuse for irrigation. **Water Research X**, v.21, p.100203, 2023. DOI: 10.1016/j.wroa.2023.100203.

YANG, W.; SCHMIDT, C.; WU, S.; ZHAO, Z.; LI, R.; WANG, Z.; WANG, H.; HUA, P.; KREBS, P.; ZHANG, J. Exacerbated anthropogenic water pollution under climate change and urbanization. **Water Research**, v.280, p.123449, 2025. DOI: 10.1016/j.watres.2025.123449.

YOO, J.-C.; BEIYUAN, J.; WANG, L.; TSANG, D.C.W.; BAEK, K.; BOLAN, N.S.; OK, Y.S.; LI, X.-D. A combination of ferric nitrate/EDDS-enhanced washing and sludge-derived biochar stabilization of metal-contaminated soils. **Science of The Total Environment**, v.616–617, p.572–582, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.310.

YU, H.; ZOU, W.; CHEN, J.; CHEN, H.; YU, Z.; HUANG, J.; TANG, H.; WEI, X.; GAO, B. Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. **Journal of Environmental Management**, v.232, p.8–21, 2019. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.10.117.

ZHANG, W.; WANG, Y.; FAN, L.; LIU, X.; CAO, W.; AI, H.; WANG, Z.; LIU, X.; JIA, H. Sorbent Properties of Orange Peel-Based Biochar for Different Pollutants in Water. **Processes**, v.10, p.856, 2022. DOI: 10.3390/pr10050856.

ZHANG, W.; WEI, J.; GUO, L.; FANG, H.; LIU, X.; LIANG, K.; NIU, W.; LIU, F.; SIDDIQUE, K.H.M. Effects of Two Biochar Types on Mitigating Drought and Salt Stress in Tomato Seedlings. **Agronomy**, v.13, p.1039, 2023. DOI: 10.3390/agronomy13041039.

ZHAO, W.; WU, K.; WU, Y.; YU, H.; CAO, W.; MA, H. Effects of biochar amendment on greenhouse tomato quality, nutrient uptake and use efficiency under various irrigation and fertilization regimes. **Scientia Horticulturae**, v.337, p.113441, 2024. DOI: 10.1016/j.scienta.2024.113441.

ZHOU, W.J.; HAO, L. Impact of rapid urbanization on groundwater storage variation amid climate change in the Yangtze River Basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v.59, p.102360, 2025. DOI: 10.1016/j.ejrh.2025.102360.

ZHOU, X.; DIAO, Y.; ZHU, Y.; QUAN, G.; YAN, J.; ZHANG, W. Release of biochar-derived dissolved organic matter and the formation of chlorination disinfection by-products: Effects of pH and chlorine dosage. **Environmental Pollution**, v.342, p.123025, 2024. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.123025.

ZHU, L.; CHATTOPADHYAY, S.; ELIJAH AKANBI, O.; LOBO, S.; PANTHI, S.; MALAYIL, L.; CRADDOCK, H.A.; ALLARD, S.M.; SHARMA, M.; KNIEL, K.E.; MONGODIN, E.F.; CHIU, P.C.; SAPKOTA, A.; SAPKOTA, A.R. Biochar and zero-valent iron sand filtration simultaneously removes contaminants of emerging concern and *Escherichia coli* from wastewater effluent. **Biochar**, v.5, p.41, 2023. DOI: 10.1007/s42773-023-00240-y.