



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**USO DE BIOCHAR, HIDROGEL E LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO NA
PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong**

OSLI BARRETO CAMILO JÚNIOR

BRASÍLIA/DF
MARÇO/2024



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**USO DE BIOCHAR, HIDROGEL E LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO NA
PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong**

Osli Barreto Camilo Júnior

ORIENTADOR: PROF. DR. DELVIO SANDRI

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA/DF
MARÇO/2024



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**USO DE BIOCHAR, HIDROGEL E LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO NA PRODUÇÃO
DE MUDAS DE *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong**

Oslí Barreto Camilo Júnior

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM AGRONOMIA.

APROVADA POR:

DELVIO SANDRI, Doutor/FAV/UnB/ - Orientador

CÍCERO CÉLIO DE FIGUEIREDO, Doutor/FAV/UnB - Examinador interno

MICHAEL SILVEIRA THEBALDI, Doutor, UFLA - Examinador externo

JOSÉ ALVES JÚNIOR, Doutor, UFG - Examinador externo

JOÃO JOSÉ DA SILVA JUNIOR, Doutor/FAV/UnB – Suplente

BRASÍLIA/DF

MARÇO/2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Barreto Camilo, Osli Júnior

Uso de Biochar, Hidrogel e Lâminas de Irrigação na Produção de Mudanças de *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong. Osli Barreto Camilo Júnior, orientação de Delvio Sandri - Brasília, 2024.

83 p.

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília/ Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2024.

CDD ou CDU
Agris / FAO

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARRETO CAMILO, O. JR. **Uso de Biochar, Hidrogel e Lâminas de Irrigação na Produção de Mudanças de *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong.** Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2024, 83 p. Tese de Doutorado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Osli Barreto Camilo Júnior

TÍTULO DO PROJETO DE TESE: **Uso de Biochar, Hidrogel e Lâminas de Irrigação na Produção de Mudanças de *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong.**

GRAU: Doutor ANO: 2024

É concedida à Universidade de Brasília de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

Nome: Osli Barreto Camilo Júnior

CPF: 027.159.581-70

Endereço: SQSW 101, Bloco “H” Apartamento 120, Setor Sudoeste, Brasília-DF.

CEP: 70670-108

Tel. (061) 99939 9099

E-mail: oslijr@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por proporcionar discernimento, força de vontade e coragem para finalizar o processo da Tese de Doutorado.

Ao Professor Dr. Delvio Sandri por sua orientação e apoio ao longo deste trabalho, ao Professor Dr. Cícero Célio de Figueiredo pela coorientação e auxílio e auxílio técnico e fornecimento de insumo fundamental para a Tese (biochar de lodo de esgoto).

Aos alunos de graduação Luan Vinicius, Iago Pereira e o doutorando Jesus Manoel Peres Clara que auxiliaram enormemente em todas as fases da condução dos experimentos.

Também sou grato à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária (FAV) da Universidade de Brasília (UnB) pelo suporte financeiro e oportunidade de aprendizado ao longo da minha graduação, mestrado e, finalmente, doutorado.

À minha família (Osli Pai, Mila e Andressa), namorada (Amanda Fortaleza) e amigos, obrigado pelo constante incentivo e compreensão durante este processo, vocês foram essenciais para que este sonho se realizasse.

RESUMO

A preocupação nacional e internacional com a qualidade ambiental e com o desenvolvimento sustentável, além da crescente necessidade de reflorestamento de áreas sensíveis, têm levado ao aumento da demanda por serviços e produtos florestais, notadamente de espécies arbóreas nativas brasileiras, pela sua importância econômica, social e ambiental. O Tamboril (*Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong), é uma dessas espécies que pode ser utilizada para a recuperação de áreas degradadas e para reflorestamento pela boa adaptabilidade, rusticidade, crescimento rápido, fixação biológica de nitrogênio e bom sombreamento. No entanto, a qualidade final das mudas de Tamboril depende de fatores como a manutenção adequada da umidade do solo, composição física e química do solo, que podem ser favorecidos com a adição de biochar de lodo de esgoto (BLE) e hidrogel (H). A utilização agrônômica e florestal do BLE e H, separadamente, vem sendo estudada de maneira ampla e em vários países, no entanto, a combinação e a sinergia dos dois ainda necessita ser mais bem compreendida, especialmente em condições tropicais, na formação de mudas de espécies florestais e com diferentes lâminas de irrigação. Diante desta realidade, o objetivo do trabalho foi avaliar o uso de BLE, H e diferentes lâminas de irrigação (Li) na formação de mudas de Tamboril cultivadas em vasos. Foram conduzidos dois experimentos, em viveiro coberto com sombrite, na Fazenda Água Limpa da UnB, em Brasília/Distrito Federal: no experimento 1 (E1), o objetivo foi avaliar os efeitos das doses de BLE de 0, 2, 4, 6 e 8% base volume (v/v) na parcela em combinação com as doses de H de 0, 1, 2, 3 e 4 g L⁻¹ na subparcela, incorporados ao solo, no período de 27/06 a 08/12/2021, com aplicação da mesma lâmina de irrigação em todos os tratamentos, enquanto que no experimento 2 (E2) foram avaliadas as Li de 1,0, 0,8, 0,6, 0,4 e 0,2 da Capacidade de Campo (CC) na parcela e as doses de H de 0, 1, 2, 3 e 4 g L⁻¹ na subparcela, com 6 repetições, no período 25/07/2022 a 30/01/2023. Foram utilizadas embalagens com volume útil total de 2,5 L preenchidos com amostras de 2,25 L de Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) mais 0,25 L de esterco bovino. Foram avaliados, em quatro repetições, a altura da parte aérea das mudas (AP), diâmetro do coleto (DC), massa úmida (MuA) e seca (MsA) da parte aérea, massa úmida (MuR) e seca (MsR) das raízes, índice de qualidade de Dickson (IQD), área foliar (AF), número de folhas (NF), Razão entre altura e Diâmetro do Coleto (RAD), relação entre a massa seca da parte aérea e das raízes (MsA/MsR) e teores de sais no solo. No E1, concluiu-se, quanto aos aspectos morfológicos: as maiores doses de BLE (6 e 8% v/v) e doses de H de 3 e 4 g L⁻¹ promoveram elevação significativa nos parâmetros morfológicos do Tamboril, sendo que os maiores valores de DC (10,4 mm), NF (19), MsA (25,79 g), MuA (55,45 g) e MsA/MsR (3,00) foram obtidos na dose de 6% de BLE e 3 g L⁻¹ de H; a MuR, MsR e MsT foram maiores na dose de BLE de 8% e 3 g L⁻¹ de H com 67,14 g, 14,67 g e 35,61 g, respectivamente; o IQD foi influenciado pelas doses de H para 6 e 8% de BLE, sendo os maiores valores obtidos nas doses de 1, 3 e 4 g L⁻¹ de H sendo de 2,86 em 6% de BLE e 1 g L⁻¹ de H, 2,82 para 8% de BLE e 4 L⁻¹ de H; os maiores valores de AF foram obtidos com as maiores doses de BLE e H, na combinação de 6% de BLE, com 3 e 4 g L⁻¹ de H, com valores de 2302,56 cm² e 2057,03 cm², respectivamente; a RAD respondeu significativamente a incorporação de BLE com maior valor quando do uso de 6% (12,3) e 8% (12,6) sem a presença de H. No E1, quanto a qualidade química do solo concluiu-se que: a acidez potencial (H + Al) aumentou significativamente com a combinação entre o BLE e o H incorporados ao substrato (4,07 cmolc dm⁻³ com 8% de BLE e 1 L⁻¹ de H) e houve diminuição do pH com aumento das doses de BLE (5,16) quando do uso de 8% de BLE e 0 L⁻¹ de H; o P foi influenciado significativamente pelo BLE e triplicou na maior dose em relação à testemunha, sendo de 70 mg dm⁻³ em 8% de BLE e 16,7 mg dm⁻³ em 0% de BLE; a MO respondeu positivamente às baixas doses de H e negativamente às doses de BLE; a Saturação de Bases (V%) foi maior quando não foram incorporados o BLE e o H no substrato, com o valor de 74,33% no tratamento com 0% de BLE e 0 L⁻¹ de H; o Ca foi influenciado positivamente pelas doses de BLE com o maior valor obtido

no tratamento de 2% de BLE e 4 L⁻¹ de H, sendo de 5,53 cmol_c dm⁻³, para o K houve efeito positivo com maiores doses de H e negativo com maiores de BLE, com maior valor de 215,33 mg dm⁻³, no tratamento com 0% de BLE e 4 L⁻¹ de H; maiores doses de BLE e H promoveram maiores valores de CTC, sendo que o maior valor foi obtido no tratamento com 6% de BLE e 4 L⁻¹ de H, sendo de 10,94 cmol_c dm⁻³. No E2, concluiu-se quanto aos atributos morfológicos: as maiores lâminas de água, 0,8 CC e 1,00 CC, promoveram mudanças significativas nos parâmetros morfológicos do Tamboril, o que foi observado com menor grau com o aumento das doses de H; a AP e o DC responderam significativamente às maiores Li, com maior valor de AP na combinação de 1,0 da CC e dose de H de 2 g L⁻¹ (85,7 cm) e o DC com 0,8 da CC na dose de 3 g L⁻¹ (7,88 mm); o maior valor de AF foi obtido com a maior Li (1,00 CC) e com a dose intermediária de H (2 g L⁻¹), com 2382,3 cm², sendo este valor cerca de três vezes maior do que na lâmina de água de 0,2 CC, com 660,6 cm²; os maiores valores absolutos IQD foram obtidos com as maiores lâminas de água (0,8 CC e 1,00 CC), com 3,65 quando da aplicação de 0,80 CC associado a 2 g L⁻¹ de H e 3,56 com 1,00 da CC e dose de H de 3 g L⁻¹; a MuA, MuR, MsA, MsR e MsT aumentaram significativamente com aumento das Li, especialmente em 0,8 e 1,00 da CC, com os maiores valores de 54,95 g, 72,86 g, 14,33 g, 16,74 g e 31,07g, respectivamente. No E2, concluiu-se quanto a qualidade química que: os componentes da acidez no solo (pH e H + Al) foram influenciados pelas Li e doses de H, sendo que o pH apresentou maior valor com a lâmina de 0,8 da CC e 3 L⁻¹ de H, com valor de 5,67, já a acidez potencial (H + Al) com a lâmina de 0,4 da CC e 2 L⁻¹ de H, com valor de 3,43; os teores MO, P e V foram significativamente maiores nas Li de 1,0 da CC em relação a 0,2 da CC nas doses de H de 0, 1 e 2 g L⁻¹, com os valores de 39,00 g kg⁻¹, 61,67 mg dm⁻³ e 73,67%, respectivamente; os valores de K aumentaram significativamente com maiores doses de H tendo o seu maior valor de 215,33 mg dm⁻³ com 0,6 da CC e 3 L⁻¹ de H; o maior valor de Ca, 5,23 cmol_c dm⁻³, foi obtido na Li de 0,4 da CC em 3 L⁻¹ de H e 0,8 da CC em 2 L⁻¹ de H, e o menor valor, 4,10 cmol_c dm⁻³, com 1,00 da CC com 1 L⁻¹ de H; a CTC teve seu maior valor, 10,26 cmol_c dm⁻³, com o tratamento 0,8 da CC e 0 L⁻¹ de H e 0,8 da CC com 2 L⁻¹ de H; os teores de Ca e CTC reduziram da menor lâmina de irrigação (0,2 CC) para a maior a 1,0 da CC, em todas as doses de hidrogel. A combinação entre biochar e hidrogel mostra-se promissora para otimizar a produção de mudas florestais, sendo que os resultados obtidos indicam não apenas melhorias na qualidade morfológica das mudas, mas também benefícios ambientais, como a redução do consumo de água e insumos e a promoção da sustentabilidade. No entanto, diante da complexidade do ecossistema envolvido, ressalta-se a necessidade premente de estudos futuros para aprofundar o entendimento sobre as interações entre esses componentes e sua influência a longo prazo no desenvolvimento das plantas.

Palavras-chave: Polímero hidroretentor, biocarvão, déficit hídrico, umidade do solo, qualidade das mudas.

ABSTRACT

National and international concern for environmental quality and sustainable development, in addition to the growing need for reforestation of sensitive areas, have led to increased demand for forest services and products, notably of native Brazilian tree species, for their economic, social and environmental importance. Tamboril (*Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong), is one of those species that can be used for the recovery of degraded areas and for reforestation by good adaptability, rusticity, rapid growth, biological fixation of nitrogen and good shading. However, the final quality of Tamboril seedlings depends on factors such as proper maintenance of moisture and its physical and chemical composition, which can be favoured with the addition of biochar and hydrogel. The agricultural and forestry use of biochar and hydrogel, separately, has been studied extensively and in several countries, however, the combination of the two still needs to be better understood, especially in tropical conditions, in the formation of seedlings of forest species and with different irrigation levels. Therefore, the aim of the work was to evaluate the use of biochar, hydrogel and different irrigation blades in the formation of Tamboril seedlings grown in pots. Two experiments were conducted, in the farmhouse, at the “Fazenda Água Limpa” in Brasília/Federal District: in experiment 1 (E1), the objective was to evaluate the effects of the doses of sewage sludge biochar (SSB) of 0, 2, 4, 6 and 8% base volume and hydrogel doses (H) of 0, 1, 2, 3 and 4 g L⁻¹ in the period from 27/06/2021 to 08/12/2021, while in experiment 2 (E2) were evaluated the dosages of hydrogel (H), of 0, 1, 2, 3, and 4 g L⁻¹ and the irrigation levels (II) of 1.0, 0.8, 0.6, 0.4 and 0.2 of the Field Capacity (FC), during the period 25/07/2022 to 30/01/2023. Packages with a useful volume of 2.5 L filled with samples of Yellow Red Latossol mixed with 0.25 volume-based bovine debris were used. In both cycles, the height of the aerial part, stem diameter, wet mass and dry mass of the aerial part, wet mass and dry mass of the roots, index of Dickson quality, leaf área, number of leaves, ratio between height and root diameter, ratio between dry mass of shoots and roots and salt content in the soil were evaluated. In E1, it was concluded regarding morphological attributes: the highest doses of sewage sludge biochar (SSB) (6 and 8% volume basis) and hydrogel doses of 3 and 4 g L⁻¹ promoted a significant increase in the morphological parameters of Tamboril; the highest values for stem diameter (10.4 mm), number of leaves (19), aerial part dry mass (25.79 g), aerial part wet mass (55.45 g) and ratio of dry mass of shoots and dry mass of roots (3.00) were obtained at a dose of 6% SSB and 3 g L⁻¹ of hydrogel; root wet mass, root dry mass and total dry mass were higher at a dose of 8% SSB and 3 g L⁻¹ of hydrogel with 67.14 g, 14.67 g and 35.61 g, with no difference when using the highest dose of hydrogel (4 g L⁻¹); the Dickson Quality Index (DQI) was influenced by hydrogel doses for 6 and 8% of SSB, with the highest values obtained at doses of 1, 3 and 4 g L⁻¹ of hydrogel with 2.86, 2.80 and 2.82; the highest leaf area values were obtained with the highest doses of biochar and hydrogel, in the combination of 6% SSB, with 3 and 4 g L⁻¹ of hydrogel, with values of 2302.56 cm² and 2057.03 cm², respectively; the ratio between plant height and stem diameter responded significantly to SSB incorporation with a higher value when using 6% (12.3) and 8% (12.6) without the presence of hydrogel. In E1, regarding the chemical quality of the soil, it was concluded that: the potential acidity (H + Al) increased significantly with the combination of SSB and hydrogel incorporated into the substrate (4.07 cmolc dm⁻³ in B8H1) and there was a decrease in the pH with increased biochar doses (5.16 no B8H0); P was significantly influenced by SSB and tripled at the highest dose in relation to the control, being 70 mg dm⁻³ in 8% SSB and 16.7 mg dm⁻³ in 0% SSB, both without the presence of hydrogel; organic matter responded positively to low doses of hydrogel and negatively to doses of SSB, with the highest

value, 41.67 g kg^{-1} , at a dose of 1 g L^{-1} of hydrogel and without the presence of BLE; base saturation (V%) was higher when SSB and hydrogel were not incorporated into the substrate, with a value of 74.33%, and there was a significant decrease in values with the incorporation of higher doses of SSB; Ca was positively influenced by SSB doses with the highest value obtained in the 8% of SSB with $5.53 \text{ cmolc dm}^{-3}$; Mg values were not changed by the use of SSB or hydrogel; K was significantly influenced by both SSB and hydrogel doses, however, the effect was positive with higher hydrogel doses and negative with higher SSB incorporations with the highest value, $215.33 \text{ mg dm}^{-3}$, obtained in the 0% SSB and 4 g L^{-1} of hydrogel; higher doses of SSB and hydrogel promoted higher cation exchange capacity values, with the highest value being obtained in the 6% SSB and 4 g L^{-1} of hydrogel treatment with $10.94 \text{ cmolc dm}^{-3}$. In E2, it was concluded regarding the morphological attributes: the highest water depths, 0.8 CC and 1.00 CC, promoted the most significant changes in the morphological parameters of Tamboril, which was observed to a lesser extent with the increase in hydrogel doses; height and stem diameter of the plants responded significantly to the highest water depths, with a higher height value in the combination of 1.0 of field capacity and a Hy dose of 2 g L^{-1} (85, 7 cm) and stem diameter with 0.8 of field capacity at a dose of 3 g L^{-1} (7.88 mm); the highest leaf value was obtained with the largest irrigation depth (1.00) and with the intermediate dose of Hy (2 g L^{-1}), with 2382.3 cm^2 , this value being approximately three times greater than in a water depth of 0.2, with 660.6 cm^2 ; the better Dickson quality index values were obtained with the highest water depths (0.8 and 1.00), with 3.65 when applying 0.80 associated with 2 g L^{-1} of Hy and 3.56 with 1.00 and a Hy dose of 3 g L^{-1} ; wet and dry mass of the aerial part, wet and dry mass of the roots and total dry mass increased significantly with increasing irrigation depths, especially at 0.8 and 1.00, with the highest values of 54.95 g, 14.33 g, 72.86 g, 16.74 g and 31.07 g, respectively. In E2, it was concluded regarding chemical quality that: the acidity components in the soil (pH and H + Al) were influenced by the irrigation depths and doses of Hy, with the pH showing a higher value with the irrigation depth of 0.8 and 3 g L^{-1} of Hy, with 5.67, and the potential acidity (H + Al) with a level of 0.4 irrigation depth and 2 g L^{-1} of Hy, with 3.43; the organic matter, P and base saturation (%) contents were significantly higher in irrigation depths of 100% (1.00) in relation to 20% (0.2) in Hy doses of 0, 1 and 2 g L^{-1} , with values of 39.00 g kg^{-1} , 61.67 mg dm^{-3} and 73.67%; K values increased significantly with higher doses of Hy, with a highest value of $215.33 \text{ mg dm}^{-3}$ with 0.6 irrigation depth and 3 g L^{-1} of Hy; the highest Ca value, $5.23 \text{ cmolc dm}^{-3}$, was obtained with 0.4 irrigation depth and 3 g L^{-1} of Hy and 0.8 in 2 g L^{-1} of Hy, and the lowest value, $4.10 \text{ cmolc dm}^{-3}$, with 1.00 irrigation depth and 1 g L^{-1} of Hy; the Cation Exchange Capacity had its highest value, $10.26 \text{ cmolc dm}^{-3}$, with 0.8 irrigation depth and zero Hy and 0.8 irrigation depth with 2 g L^{-1} of Hy; Ca and Cation Exchange Capacity levels reduced from the lowest irrigation depth (0.2) to the highest at 100%, in all Hy doses, while Mg was not influenced by irrigation depths and hydrogel doses. The combination of biochar and hydrogel is promising to optimize the production of forest seedlings, and the results obtained in the present study indicate not only improvements in the morphological quality of the seeds of Tamboril, but also environmental benefits, such as the reduction of water consumption and fertilizers and the promotion of sustainability. However, in the face of the complexity of the ecosystem involved, the urgent need for future studies to deepen the understanding of the interactions between these components and their long-term influence on plant development is highlighted.

Key Word: Water-retaining polymer, biochar, water deficit, soil moisture, seedling quality.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE FIGURAS	xii
1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVO GERAL.....	17
2.1 Objetivos específicos.....	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 Aspectos gerais, utilização e germinação da espécie vegetal Tamboril.....	18
3.2 Produção e utilização de biochar.....	20
3.3 Polímero hidroretentor (hidrogel)	23
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
4.1 Caracterização do local de experimento e período de desenvolvimento	26
4.2 Coleta, preparo e análise do solo e do esterco bovino	28
4.3 Origem do biochar.....	29
4.4 Tipo e mistura do hidrogel	31
4.5 Origem das sementes de Tamboril e quebra de dormência.....	31
4.6 Sistema de irrigação e manejo da irrigação.....	32
4.7 Delineamento experimental nos experimentos E1 e E2.....	38
4.8 Variáveis de desempenho do Tamboril.....	41
4.9 Procedimentos estatísticos.....	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1 Atributos morfológicos do Tamboril no experimento 1 (E1): doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) versus doses de hidrogel (H).....	44
5.2 Caracterização química do solo ao final do experimento 1 (E1)	52

5.3 Atributos morfológicos do Tamboril no experimento 2 (E2): doses de hidrogel (H) versus lâminas de irrigação (Li)	58
5.4 Caracterização química do solo no experimento 2 (E2)	67
6. CONCLUSÕES	72
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores dos atributos químicos e textura do solo na camada 0,05 a 0,15 m no início do experimento E1 após a correção da acidez.....	28
Tabela 2 - Valores dos atributos químicos do esterco bovino utilizado na mistura com solo, biochar e hidrogel nos experimentos E1 e E2.	29
Tabela 3 - Propriedades físico-químicas do lodo de esgoto e do biochar (BLE) produzido a 300 °C.....	30
Tabela 4 - Valores de Altura da Planta (AP), Diâmetro do Coleto (DC), Número de Folhas (NF) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) para as doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 e 8% (B8) base volume e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L ⁻¹ da mistura Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), esterco bovino (EB) e biochar de lodo de esgoto (BLE) aos 165 dias após a semeadura (DAS) das sementes de tamboril no experimento (E1).	45
Tabela 5 - Valores de Massa úmida aérea (MuA), Massa úmida radicular (MuR), Massa seca da parte Aérea (MsA) e Massa seca Radicular (MsR) para as doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L ⁻¹ da mistura latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) e biochar de lodo de esgoto (BLE) aos 165 dias após a semeadura (DAS) das sementes de Tamboril no E1.	46
Tabela 6 - Valores de Massa Seca Total (MsT) e Razão entre Massa Seca da Parte Aérea e Massa Seca da Raíz (MsA/MsR), Área Foliar (AF) e Razão entre altura e diâmetro do coleto (RAD) para as doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L ⁻¹ da mistura latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) e biochar de lodo de esgoto (BLE) aos 165 dias após a semeadura (DAS) das sementes de Tamboril no E1.....	47
Tabela 7 - Valores de acidez do solo (H + Al), Matéria Orgânica, Saturação de Bases e P do solo para as doses biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L ⁻¹ da mistura latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) e BLE aos 165 dias após a semeadura (DAS) das sementes de Tamboril no E1.	54
Tabela 8 - Valores de pH, Ca, CTC, K e Mg do solo para as doses biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume e doses de hidrogel de 0 (H0),	

1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L ⁻¹ da mistura latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) e BLE aos 165 dias após a semeadura (DAS) das sementes de tamboril no E1.	55
Tabela 9 - Correlação de Pearson's dos valores de Valores de pH, H + Al, Ca, Mg e CTC, MO, V, P e K solo para as doses biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 e 8% (B8) base volume e hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L ⁻¹ da mistura latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) e BLE aos 165 dias após a semeadura (DAS) das sementes de Tamboril no E1	58
Tabela 10 - Valores de Altura de Planta (cm), Diâmetro do Coleto (DC), Razão entre altura e diâmetro do coletor (RAD) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) para as lâminas de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC) e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L ⁻¹ da mistura de latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) na dose de ¼ base volume e biochar de lodo de esgoto (BLE) com 6% base volume no experimento E2.	60
Tabela 11 - Valores de Massa úmida da raiz (MuR), Massa seca da parte aérea (MsA), Massa seca da raiz (MsR), Massa seca total (MsT) e Massa úmida da parte aérea (MuA) para as lâminas de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC) e de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g de hidrogel por L ⁻¹ da mistura de latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) na dose de ¼ base volume e biochar de lodo de esgoto (BLE) com 6% base volume no experimento E2.	64
Tabela 12 - Valores de pH, H + Al, Ca, Mg e CTC do solo para as lâminas de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC) e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L ⁻¹ da mistura de latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) na dose de ¼ base volume e biochar de lodo de esgoto (BLE) com 6% base volume no experimento E2... ..	68
Tabela 13 - Valores de Matéria Orgânica, Saturação de Bases, P e K do solo para as para as lâminas (L) de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC) e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L ⁻¹ da mistura de latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) na dose de ¼ base volume e biochar de lodo de esgoto (BLE) com 6% base volume no experimento E2.	70
Tabela 14 - Correlação de Pearson's dos valores de Valores de pH, H + Al, Ca, Mg e CTC, MO, V, P e K do solo para as para as lâminas de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC) e de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g de hidrogel por L ⁻¹ da mistura de latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) na dose de ¼ base volume e biochar de lodo de esgoto (BLE) com 6% base volume no E2	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Árvore (a), flores e folhas (b) e frutos (c) do tamboril. Fonte: Carvalho (2003). ...	18
Figura 2 - Viveiro da Fazenda Água Limpa (FAL) onde se desenvolveram o E1 e o E2.	26
Figura 3 - Valores de temperatura e umidade relativa do ar média, máxima e mínima nos experimentos E1 (a) e E2 (b) em função dos dias após a semeadura do tamboril.	27
Figura 4 - Embalagens de cultivo e disposição das fitas gotejadoras no experimento E1 (a) onde a lâmina de irrigação foi a mesma em todos os tratamentos e embalagens de cultivo e disposição das fitas gotejadoras no experimento E2 (b) onde a lâmina de irrigação foi diferente.	29
Figura 5 - Hidrogel da marca Forth utilizado no E1 e E2.	31
Figura 6 - Sementes de tamboril selecionadas (a), sementes embebidas em hipoclorito de sódio (b) sementes após a escarificação mecânica (c).	32
Figura 7 - Vasos de cultivo com duas plântulas de tamboril antes do desbaste no E2.	32
Figura 8 - Temporizador eletrônico digital utilizado no acionamento do sistema de irrigação no E1 (a), válvulas solenoides (Vs1 a Vs5) acionadas por um painel semiautomatizado, válvula de gaveta (Vg) no E2 (c), interface para identificação das válvulas solenoides (d) e status, data e hora de acionamento das válvulas solenoides e seus respectivos tempos de irrigação, em segundos para cada evento de irrigação (e).	35
Figura 9 - Tensiômetros instalados na profundidade de 0,10 cm, com leituras realizadas com tensímetro digital de punção (a) e valores de tensão médio obtidos durante o período do experimento 1 (E1) do tamboril (b e c).	37
Figura 10 - Curva de retenção com valores de unidade volumétrica em função do potencial matricial do Latossolo Vermelho Amarelo, segundo o modelo de van Genuchten para o ψ : potencial matricial da água no solo (kPa).	38
Figura 11 - Distribuição dos tratamentos com diferentes doses de biochar (B0 a B8) e de hidrogel de (H0 a H4) e 6 repetições no E1.	39
Figura 12 - Distribuição dos tratamentos nas diferentes lâminas de irrigação (1,0 a 0,2 da CC e doses de hidrogel (H0 a H4) e 6 repetições.	40
Figura 13 - Mudanças de Tamboril no início da germinação, aos 60 e aos 165 dias após a semeadura no E1.	41

Figura 14 - Vista aos 5 dias após a semeadura do Tamboril (ainda não germinou), aos 40 e aos 190 dias após a semeadura (DAS) no E2 para as lâminas de irrigação de 1,0, 0,8, 0,6, 0,4 e 0,2 da capacidade de campo (CC).....	41
Figura 15 - Valores médios de Área Foliar (AF) e Razão entre altura e Diâmetro do Coleto (RAD) obtidos aos 165 DAS para as doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume no E1. Médias seguidas de letras iguais não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.	48
Figura 16 - Valores médios de Altura de Planta (AP), Diâmetro do Coleto (DC), Índice de Qualidade de Dickson (IQD), Massa Seca da Parte Aérea (MsA), Massa Seca da Raíz (MsR) e Massa Seca Total (MsT) obtidos aos 165 DAS para as doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume no E1.....	49
Figura 17 - Valores médios de Área Foliar (AF) e Razão entre altura e diâmetro do coleto (RAD) obtidos aos 165 DAS para as doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume e hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L ⁻¹ aos 165 dias após a semeadura (DAS) das sementes de Tamboril no E1. Médias seguidas de letras iguais dentro de cada dose de hidrogel não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.....	48
Figura 18 - Valores médios de pH e Ca obtidos aos 165 DAS para as doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume no E1.	57
Figura 19 - Valores médios de pH, Ca e Mg obtidos aos 165 DAS para as doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume e hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L ⁻¹ aos 165 dias após a semeadura (DAS) das sementes de Tamboril no E1. Médias seguidas de letras iguais não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.....	56
Figura 20 - Valores médios de Altura de Planta (AP), Diâmetro de Coleto (DC), Razão entre altura e diâmetro (RAD), Massa úmida da parte aérea (MuA) para as lâminas de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC) e de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g de hidrogel por L ⁻¹ da mistura de latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) na dose de ¼ base volume e biochar de lodo de esgoto (BLE) com 6% base volume, no experimento E2. Médias seguidas de letras iguais não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey entre as lâminas de irrigação dentro de cada dose de hidrogel.	62
Figura 21 - Valores médios de de Altura de Planta (AP), Diâmetro do Coleto (DC), Índice de Qualidade de Dickson (IQD), Massa Seca da Parte Aérea (MsA), Massa Seca da Raíz (MsR) e	

Massa Seca Total (MsT) para as lâminas de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC)..... 63

Figura 22 - Valores médios de Massa úmida da raiz (MsR) e Massa seca total (MsT) para as lâminas de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC) e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L⁻¹ da mistura de latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) na dose de ¼ base volume e biochar de lodo de esgoto (BLE) com 6% base volume. Médias seguidas de letras iguais não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey entre as lâminas de irrigação dentro de cada dose de hidrogel no experimento E2..... 65

Figura 23 - Valores da razão entre a massa seca da parte aérea e massa seca da raiz (MsA/MsR) para as lâminas de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC) e de doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L⁻¹ da mistura de latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) na dose de ¼ base volume e biochar de lodo de esgoto (BLE) com 6% base volume no experimento E2. 66

1. INTRODUÇÃO

A preocupação nacional e internacional com a qualidade ambiental e com o desenvolvimento sustentável, além da necessidade de reflorestamento das Reservas Legais, Matas Ciliares, entre outras, têm levado ao aumento da demanda por serviços e produtos florestais, notadamente espécies de crescimento rápido e de grande acúmulo de biomassa, para favorecer o sequestro de carbono, redução do impacto das gotas de chuva, contenção de erosão e sedimentos, aumento da infiltração da água no solo, e de inúmeros outros benefícios de uma floresta (Carvalho et al., 2021; Marques et al., 2022; Peters et al., 2023).

Dentre os produtos florestais mais estudados recentemente, as espécies arbóreas nativas brasileiras, pela sua importância econômica, social e ambiental (De Souza et al., 2020; De Lima et al., 2021), vêm sendo valorizadas cada vez mais, aumentando, conseqüentemente, a demanda por mudas para o seu plantio.

O *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong, da família Fabaceae, popularmente conhecida por Ximbuva ou Tamboril, é uma das espécies florestais nativas de grande importância e que pode ser utilizada para a recuperação de áreas degradadas e para reflorestamento pela boa adaptabilidade às diversas regiões do Brasil, rusticidade, crescimento rápido, fixação biológica de nitrogênio e bom sombreamento. É uma planta pioneira que ocorre em diversas formações florestais desde o Ceará, Piauí, Maranhão e Pará até o Rio Grande do Sul (Abreu et al., 2018; Melo et al., 2021). Mudas com altura e diâmetro adequados apresentam maior capacidade de competição por recursos, resistência a estresses ambientais como a seca, e maior probabilidade de sobrevivência e crescimento após o transplante em local definitivo em campo.

Apesar de sua rusticidade, para o sucesso da produção de mudas de Tamboril é necessário escolher adequadamente os substratos que serão utilizados, tendo em vista que representam o local de absorção de água, nutrientes e desenvolvimento radicular. Portanto, substratos que favoreçam absorção de água, nutrientes, a oxigenação, atrelado ao baixo custo, são fundamentais na produção de mudas (Stuepp et al., 2020).

Inicialmente, no Brasil, o principal constituinte utilizado na formulação dos substratos era o próprio solo, combinado com esterco bovino e vermiculita, no entanto, com o avanço da tecnologia na produção de mudas surgiram outros tipos de materiais que passaram a ser amplamente utilizados (Das Chagas Silva et al., 2021), como o biochar e o hidrogel que, quando incorporados ao substrato, podem disponibilizar matéria orgânica e nutrientes, especialmente

fósforo, nitrogênio e cálcio, e favorecer a retenção da umidade, sendo alternativas promissoras para o melhor desenvolvimento das mudas (Selvarajoo et al., 2022; Carvalho et al., 2022).

O biochar ou biocarvão pode ser definido como um material sólido, rico em carbono, obtido a partir da decomposição termoquímica de biomassas orgânicas em um ambiente com restrição de oxigênio (Kumar et al., 2021). Devido à alta concentração de vários nutrientes, produção em grande quantidade nos centros urbanos e ser uma forma segura de destinação de águas residuais, o biochar derivado da pirólise do lodo de esgoto tem sido cada vez mais estudado (Paz-Ferreiro et al., 2018), com ou sem adição de nutrientes que complementem deficiências no biochar original (Ndoung et al., 2023).

Assim, as pesquisas sobre o uso de biochar na agricultura vêm progredindo consideravelmente nas últimas décadas devido às suas ações benéficas como: favorecer o crescimento das plantas e reduzir o impacto de fatores abióticos, como a seca, aumentando a capacidade de retenção de água ou preservação de nutrientes e a capacidade de troca de cátions (Kumar et al., 2021; Ndoung; De Figueiredo e Ramos, 2021). Apesar dos biocarvões possuírem grande potencial para condicionamento de solo (Rezende et al., 2019; Silva et al., 2019a; Matoso et al., 2020), ainda é necessário definir as doses adequadas para a utilização na formação de mudas de espécies florestais, especialmente quando associados ao uso de hidrogel.

Os hidrogéis ou polímeros retentores de água são caracterizados como produtos naturais (derivados do amido) ou sintéticos (derivados do petróleo), sendo valorizados por sua capacidade de adsorver e armazenar água. Com uma matriz hidrofílica com alta fração de água, o hidrogel tem propriedades sólidas únicas, que podem fornecer água, ar e nutrientes diretamente às raízes das plantas. Por essa característica, conseguem promover a dissolução de nutrientes no solo, aumentando a taxa de crescimento das plantas e, ao mesmo tempo, permitindo maior intervalo entre irrigações, com redução do custo de manutenção e de produção (Carvalho et al., 2022; Liu, Yan et al.2022).

Como a adubação e a irrigação estão entre os fatores que mais afetam a produção de mudas, dúvidas quanto a melhor fonte e dose de nutrientes, lâmina e frequência de água são alguns dos problemas que afetam o custo de produção e a qualidade final das mudas e que precisam ser avaliados mais profundamente. Além disso, a utilização agrônômica e florestal do hidrogel e biochar, separadamente, vem sendo estudada de maneira ampla e em vários países, no entanto, a combinação dos dois ainda precisa ser mais bem compreendida, especialmente em condições tropicais, na formação de mudas de espécies florestais e com diferentes lâminas de irrigação.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito da combinação de doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) e hidrogel (H) (Primeiro Experimento – E1) e diferentes lâminas de irrigação (Li) e doses de hidrogel (H) (Segundo Experimento – E2) na qualidade das mudas de Tamboril e nos atributos químicos do solo.

2.1 Objetivos específicos

Primeiro Experimento (E1) – Estudar a combinação de diferentes doses de BLE e H.

Objetivos específicos:

- a) Mensurar os parâmetros morfológicos do Tamboril em função das doses de BLE e H;
- b) Avaliar a composição química do solo na presença das mudas de Tamboril em função das doses de BLE e H.

Segundo Experimento (E2) – Avaliar a utilização da dose de BLE do E1 que resultou em melhor desempenho morfológico com a combinação de diferentes doses de H e Li.

Objetivos específicos:

- a) Mensurar parâmetros morfológicos do Tamboril em função das doses de H e Li;
- b) Verificar se a utilização do H mantém influência nos atributos morfológicos de mudas de Tamboril submetidas a diferentes Li;
- c) Avaliar a composição química do solo na presença das mudas de Tamboril em função das doses de H e Li (E2).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aspectos gerais, utilização e germinação da espécie vegetal Tamboril

Dentre as diversas espécies florestais potencialmente utilizáveis para a recuperação de áreas degradadas, destaca-se o *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong, da família Fabaceae, popularmente conhecida por Ximbuva ou Tamboril, uma planta pioneira que ocorre em diversas formações florestais desde o Ceará, Piauí, Maranhão e Pará até o Rio Grande do Sul. É comumente encontrada em vegetação secundária, em clareiras, capoeiras e matas degradadas, onde se constata regeneração acentuada (Abreu et al., 2018).

O Tamboril (Figuras 1a, 1b e 1c) é ideal para revegetação de áreas degradadas, pela boa adaptabilidade, crescimento rápido e bom sombreamento. É uma espécie pioneira e muito rústica, sendo também apropriada para áreas de reflorestamento (Araújo e Sobrinho, 2011; Abreu et al., 2018). Às vezes, forma povoamentos quase puros. É pouco frequente na floresta primária, onde se encontram unicamente poucos exemplares adultos, ocupando o dossel superior, sendo rara ou inexistente a presença de árvores jovens em regeneração. É planta de longevidade média (Carvalho, 2003).

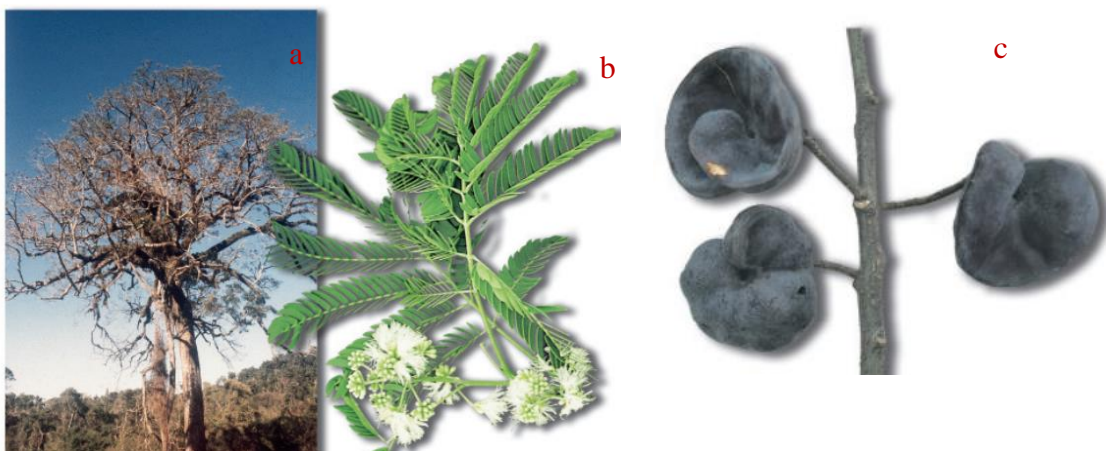


Figura 1- Árvore (a), flores e folhas (b) e frutos (c) do tamboril. Fonte: Carvalho (2003).

A espécie possui propriedades biotecnológicas como inibidor de protease, o que é muito importante. Em tempos de vírus e pandemias, a infectividade de uma população de vírus envelopados é composta por uma proteína que é ancorada pelo glicosilfosfatidilinositol da membrana e isso pode ser reduzido pelo uso de toxinas, como enterolobina, que é obtida a partir do Tamboril. Essas toxinas podem ser usadas para produzir vacinas virais atenuadas, a fim de purificar produtos sanguíneos, células ou tecidos de vírus e detectar vírus em amostras (Torres et al., 2020). Ressalta-se que os inibidores de protease também têm sido associados a atividades

anti-inflamatórias e antioxidantes e podem representar um potencial tratamento terapêutico para a asma (Rodrigues et al., 2018).

Sua madeira pode ser usada para a fabricação de brinquedos, colmeias, em construção naval e civil (muito procurada para esquadrias, tabuado e ripado), portões corrediços, portas, venezianas, carpintaria em geral, modelos de fundição, pranchetas, embalagens e caixotarias leves, palitos de fósforos, lápis, urna funerária; canoas de tronco inteiro e embarcações, entalhes e esculturas, gamelas, cochos, chapas compensadas, miolo de portas e painel (Carvalho, 2003).

Possui boa tolerância a metais pesados (Zn, Cd, Pb, Cu) presentes na água e no solo, mostrando-se promissora para pesquisas voltadas para a revegetação de solos que contêm níveis excessivos desses elementos químicos (Trannin, I. C. B., Moreira, F. D. S., e Siqueira, J. O., 2001; Freitas et al., 2018). No entanto, a espécie se mostrou sensível ao aumento da condutividade elétrica da água de irrigação, estresse salino, e dias sem irrigação, que foi intensificado a partir de 2 dS m⁻¹ e quatro dias sem rega (Ferreira et al., 2023). O mecanismo de sobrevivência do Tamboril aos estresses abióticos envolve redução no crescimento e na qualidade das mudas, com ativação de mecanismos bioquímicos de defesa da espécie.

Ainda, sobre a rusticidade da espécie, Araújo et al. (2020), em estudo sobre a eficiência no uso de água e radiação por *Erythrina velutina* e *Enterolobium contortisiliquum* sob diferentes condições de água, observaram que as espécies apresentaram diferenças significativas na eficiência do uso da água; entretanto, não foram afetados pelos regimes hídricos, mostrando que essas espécies apresentam alta resiliência nos estágios iniciais de desenvolvimento, com alta capacidade de uso da água.

Para uma adequada germinação e formação das mudas de Tamboril é preciso sementes de boa qualidade. Para isso, recomenda-se que a colheita das sementes seja feita quando o fruto muda da coloração verde para a coloração preta. A extração das sementes pode ser feita pela trilha manual dos frutos ou de forma mecânica (Carvalho, 2003).

Quando maduras, as sementes de Tamboril apresentam dormência tegumentar, sendo recomendados, em conformidade com a literatura (Carvalho, 2003; Malavasi e Malavasi, 2004; Alexandre et al., 2009; Matos et al., 2010; Mello et al., 2021), os possíveis tratamentos pré-germinativos para a quebra de dormência: desponte ou escarificação manual; escarificação mecânica com papel de lixa n. 80; escarificação com ácido sulfúrico concentrado por 5 a 20 minutos ou ácido sulfúrico a 75% por 15 a 90 minutos; imersão em água quente fora do aquecimento a 80 °C e repouso por 12 h, para embebição, e imersão em água a temperatura ambiente por 24 a 72 h.

Após o tratamento para a quebra da dormência tegumentar, recomenda-se semear as sementes em sacos de polietileno ou em tubetes de polipropileno ou em sementeira, para posterior repicagem. Quando necessária, a repicagem deve ser feita de 1 a 2 semanas após a germinação (Carvalho, 2003). Com relação à germinação, esta é epígea, com início entre 4 e 60 dias após a sementeira, sendo que o poder germinativo depende da eficácia do tratamento pré-germinativo, podendo se aproximar de 100% (Matos et al., 2010). Sem o uso do tratamento para quebra de dormência, a germinação é baixa, próxima à zero (Malavasi e Malavasi, 2004; Matos et al., 2010). As mudas atingem porte adequado para plantio, cerca de 4 meses após a sementeira, embora mudas mais velhas aceitem bem o transplante. A espécie apresenta sistema radicular bem desenvolvido, requerendo cova grande no plantio (Carvalho, 2003).

Com relação às características morfológicas, o Tamboril se apresenta como uma árvore caducifólia, com 10 a 20 m de altura e 40 a 80 cm de diâmetro à altura do peito (DAP). As folhas são compostas, bipinadas, alternas, com até 30 cm de comprimento e 3 a 7 pares de folíolos, as flores são hermafroditas, de coloração branca, com 6 a 8 mm de comprimento, com 1 a 4 cm de comprimento, contendo 10 a 20 flores, e o fruto é caracterizado como um legume bacóide (Carvalho, 2003).

3.2 Produção e utilização de biochar

O biochar pode ser definido como o produto do tratamento térmico da biomassa, na ausência de oxigênio – em processos tais como a pirólise e a gaseificação – que é destinado à aplicação no solo ou outros meios de cultivo, para sua melhoria físico-química e para elevar o estoque de carbono (Rezende et al., 2019; Matos et al., 2020; Silva et al., 2019).

Vários estudos mostram que a adição de biochar pode melhorar a qualidade do solo, aumentando o pH, mantendo a disponibilidade de nutrientes para a planta, aumentando a capacidade de retenção de água do solo e a população e atividades microbianas (Behera e Samal, 2022). Além disso, a aplicação de biochar é benéfica, pois possui alta estabilidade contra a deterioração química, podendo permanecer no solo por um longo tempo e proporcionando benefícios em longo prazo (Selvarajoo et al., 2022).

Os efeitos benéficos da adição de biochar às plantas estão relacionados à área de superfície específica, densidade aparente, capacidade de troca catiônica (CTC) e pH dentro da mistura do solo. Geralmente, o pH do biochar varia de 5,9 a 12,3 e a sua natureza alcalina é explicada devido à existência de sais alcalinos inorgânicos. Dessa forma, a aplicação de biochar ao solo aumenta os cátions de caráter básico disponíveis (Mg, Ca e K) para a planta e, dada a

sua longa persistência, é capaz de manter de forma duradoura o pH em um nível ideal para uma melhor disponibilidade de nutrientes (Selvarajoo et al., 2022; Hai-Long Lu et al., 2022).

Além disso, o biochar pode ser produzido a partir dos mais diversos materiais - resíduos agrícolas e agroindustriais diversos, tais como cascas, serragem, palhas, tortas industriais, bagaço; resíduos industriais como lodo biológico (Velázquez Machuca et al., 2019); resíduos animais, tais como carcaças e camas de estábulos, pocilgas e aviários – e através de diferentes tipos de pirólise – a tradicional pirólise lenta ou carbonização, pirólise rápida, gaseificação etc. Assim, devido a esta diversidade no processo de sua geração e material de origem, o biochar pode apresentar características químicas e físicas muito diferentes (Rezende et al., 2019; Li, e Skelly, 2023).

Ainda, com relação aos benefícios do biochar, Behera e Samal (2022), em estudo sobre a adição de biochar no processo de compostagem de diversos substratos, concluíram que a inclusão de biochar durante a compostagem pode ser uma forma viável de melhorar as propriedades do composto e possui inúmeras vantagens como a aceleração da maturidade do composto, aumento do pH, redução das perdas de nutrientes, aumento da eficiência da nitrificação, produção de compostos húmicos estáveis, imobilização de metais pesados e redução das emissões de gases de efeito estufa.

Devido à alta concentração de vários nutrientes, o biochar derivado da pirólise do lodo de esgoto tem sido cada vez mais estudado e seus benefícios incluem o suprimento de nutrientes (principalmente P, N e Ca) para culturas de ciclo curto e culturas de grãos, como o milho, em solos altamente intemperizados. Além disso, segundo Fachini e Figueiredo (2022), a pirólise do lodo de esgoto aumenta o carbono orgânico e total, a concentração de micro e macronutrientes (com exceção de K), além de ser uma excelente alternativa para transformar lodo de esgoto em adubo orgânico.

No entanto, é preciso observar a concentração de metais pesados presentes no biochar tendo em vista a legislação vigente, para que isto não se torne um problema após a aplicação nas culturas agrícolas (Brasil, 2006; Paz-Ferreiro et al., 2018).

Ressalta-se que a legislação sobre a utilização de lodo de esgoto é muito restritiva, através da Resolução nº 498, de 2020, que “Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biofóssido em solos, e dá outras providências” (Brasil, 2020). Dessa forma, para um adequado aproveitamento do lodo de esgoto em áreas agrícolas é que tem sido proposto o tratamento térmico desse resíduo por processo de pirólise, cujo produto é o biochar.

Li e Skelly (2023), em revisão sobre estudos recentes das propriedades físico-químicas e aplicações do biochar derivado de resíduos sólidos urbanos, enfatizam que o biochar pode beneficiar a purificação de água e águas residuais em termos de adsorção e catálise, sendo eficientes na remoção de benzeno, tolueno, etilbenzeno, metais pesados e na remediação de antibióticos como a tetraciclina, um dos antibióticos mais comumente usados na saúde humana e nos aditivos para rações de animais. Além disso, os autores destacam a importância do biochar para o tratamento de águas residuais de curtumes (produção do couro) com alta concentração de cromo, na remediação e correção do solo, no sequestro de carbono e concluem que o biochar derivado de resíduos sólidos urbanos possui um potencial significativo do ponto de vista ambiental, oferecendo uma série de benefícios que contribuem para a gestão sustentável de resíduos e a conservação ambiental e perspectivas econômicas promissoras, com oportunidades de redução de custos, geração de receitas e criação de modelos de negócios sustentáveis. No entanto, apontam como uma ressalva e limitação desse tipo de biochar, a sua qualidade e composição variáveis.

Figueiredo et al. (2019) em estudo sobre a mineralização de carbono em um solo com adição de biochar derivado de lodo de esgoto, encontraram a seguinte concentração de nutrientes do biochar: 33 g kg⁻¹ de N; 41,1 g kg⁻¹ de P; 1,6 g kg⁻¹ de K; 6,7 g kg⁻¹ de Ca e 1,8 g kg⁻¹ de Mg, evidenciando o seu potencial para uso agrícola. Importante ressaltar que o biochar possui baixa concentração de K devido à sua matéria-prima, o lodo de esgoto: no processo de tratamento de esgoto o K é eliminado na forma de sais solúveis junto com o efluente líquido. O enriquecimento do biochar com K é uma forma adequada de evitar perdas deste nutriente, é o que aponta o estudo de Ngo Ndoung et al. (2023), sobre a dinâmica da liberação do K em biochar de lodo de esgoto. Segundo os autores, esse biochar enriquecido com K pode ser considerado um fertilizante de liberação lenta porque retarda a liberação deste nutriente ao longo do experimento quando comparados ao KCl mineral e, portanto, têm maior potencial para reduzir as perdas por lixiviação e prolongar a disponibilidade de K para as plantas.

Singh et al. (2020), em uma revisão sobre a valorização, oportunidades, desafios e perspectivas futuras para o biochar de lodo de esgoto, ressalta que é preciso estar atento a análise de custos na produção e que mais pesquisas sobre os seguintes aspectos são muito importantes para o progresso contínuo da utilização desse insumo: realizar análise de custos de produção em escala comercial de biochar de lodo de esgoto; estudar possíveis caminhos para estabelecer cadeias de abastecimento para a sua produção ininterrupta; comparar o desempenho de adsorção e o custo com outros adsorventes no mercado; e estudar a aceitabilidade do biochar entre os agricultores e as pessoas que são os utilizadores finais da sua produtividade agrícola.

Finalmente, sobre a utilização conjunta do biochar e hidrogel, Das e Ghosh (2022), avaliaram um fertilizante à base de biochar-hidrogel para aplicações práticas no campo através da análise de sua influência em algumas características físicas do solo, como retenção de água, porosidade, densidade aparente e capacidade de absorção. Após 45 dias de experimento, os resultados revelaram que a capacidade de retenção de água do composto aumentou significativamente em comparação com a amostra de controle, chegando a mais de 60% no melhor tratamento e 20% no controle. Os autores afirmam que o composto multifuncional hidrogel-biochar pode ser uma substância valiosa como condicionador de solo, transportador de fertilizante de liberação controlada e mediador de preservação de água (áreas propensas à seca).

3.3 Polímero hidroretentor (hidrogel)

Os hidrogéis ou polímeros retentores de água são caracterizados como produtos naturais (derivados do amido) ou sintéticos (derivados do petróleo), sendo valorizados por sua capacidade de absorver e armazenar água. Ao ser incorporado ao substrato, permite maior retenção de água e de nutrientes, que podem ser lentamente liberados para as plantas em função dos ciclos de absorção–liberação. Além disso, por melhorarem o equilíbrio hídrico, permitem a sobrevivência e o crescimento de plantas em regiões áridas e semiáridas (Carvalho et al., 2022).

Esses polímeros podem ser encontrados em uma variedade de formatos e tamanhos, incluindo aerogéis, criogéis, nanogéis, microgéis, esferas, membranas e placas, entre outros. Devido às suas qualidades multifuncionais, os hidrogéis são materiais muito atrativos, uma vez que podem ser utilizados numa ampla variedade de aplicações em diversas esferas da vida, como na agricultura e nas ciências biomédicas (Oladosu et al., 2022). Com relação a sua utilização na medicina, Khan et al. (2022) afirmam que devido à sua degradabilidade controlável, capacidade de proteger fármacos instáveis da degradação e propriedades físicas flexíveis, os polímeros podem ser utilizados como uma plataforma na qual podem ser estudadas diversas interações químicas e físicas com fármacos encapsulados para liberação controlada no sistema. Com relação ao uso na agricultura, a capacidade desses materiais de absorver água e dissolver produtos químicos permite que sejam utilizados como superabsorventes em aplicações de conservação de água. Os hidrogéis foram apelidados de “materiais inteligentes” devido à sua capacidade de adaptação a diversas condições ambientais, como pressão osmótica, temperatura e pH e, devido à sua capacidade de adsorver muitas vezes o seu peso em água, os hidrogéis podem ser espalhados em áreas secas para aumentar a capacidade do solo de absorver

a água disponível, por isso, eles são frequentemente chamados de polímeros superabsorventes (Oladosu et al., 2022)

Azevedo et al. (2019) afirmam que a incorporação de diferentes níveis de fertilizantes e doses de hidrogel ao substrato promovem mudanças em seus atributos químicos e físicos, sendo que os fertilizantes promovem maiores mudanças nos atributos químicos e os hidrogéis nos atributos físicos. Ressaltam, ainda, que o uso de hidrogéis em substratos para a produção de mudas mostra-se como uma alternativa promissora para a melhoria de sua qualidade e indicam o seu uso para esse fim tendo em vista que há ganhos no processo produtivo. Com relação aos atributos químicos, Nascimento et al. (2021a) afirmam que as características da solução externa do solo, como valência de carga e concentração de sais minerais (ex. Na^+ , Mg^{2+}), influenciam a expansão dos hidrogéis e a eficiência de absorção de água desses polímeros hidrofílicos diminui com o aumento da condutividade elétrica da solução.

Liu et al. (2022), em trabalho sobre a aplicação agrícola dos hidrogéis, destacaram diversos benefícios da sua utilização, por exemplo, quando incubados em terras cultivadas, os hidrogéis servem como pequenos reservatórios para reter água e fertilizantes influenciando positivamente no crescimento das plantas. Além disso, os autores estudaram a utilização do hidrogel em conjunto com os fertilizantes de liberação lenta, concluindo que essa forma de uso dos hidrogéis apresenta grande potencial na redução da perda de fertilizantes, especialmente os nitrogenados, redução do consumo de água, diminuição da frequência de irrigação, prolongamento dos períodos de retenção de nutrientes e aumento da capacidade de retenção de água.

Faller et al. (2020), em experimento com mudas de Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), observaram a influência positiva do uso de hidrogel nas doses entre 3,0 e 4,0 g L⁻¹, nos parâmetros morfológicos de altura (H), diâmetro do coleto (DC) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD). Segundo os autores, o maior crescimento de DC estimado para dose 4,11 g L⁻¹ (5,75 mm) apresentou-se bem superior àquele verificado nas mudas cultivadas sem hidrogel (5,0 mm) e isso demonstra a eficiência da presença do hidrogel em relação ao DC das mudas de Jatobá.

Silva et al. (2019), em trabalho visando avaliar o efeito do hidrogel, associado a diferentes frequências de irrigação, no crescimento inicial, alocação de biomassa seca e a qualidade das mudas de Tamboril, constataram que a aplicação do hidrogel deve ser realizada no momento do plantio das mudas, para promover maior crescimento e biomassa seca. Ademais, concluíram que o uso do hidrogel pode mitigar os efeitos decorrentes do estresse

hídrico durante a fase de crescimento inicial das plantas, além de melhorar a qualidade morfológica das mudas.

Já Silva Cadête et al. (2021), em estudo sobre o efeito de doses de hidrogel no desenvolvimento de Tamboril sob diferentes regimes hídricos constataram que a incorporação do hidrogel não influencia no crescimento, desenvolvimento e qualidade das mudas desta espécie.

Com relação à dose mais adequada de hidrogel para o estabelecimento de mudas de Tamboril, Pontes Filho et al. (2018) encontraram as doses de 2 g L^{-1} com plantio a pleno sol e $3,5 \text{ g L}^{-1}$ em ambiente sombreado, sendo essas as doses que proporcionaram melhor desenvolvimento inicial das mudas. Vale ressaltar, no entanto, que mesmo tendo sido constatada resposta da espécie às doses de hidrogel, os benefícios do polímero não ficaram evidentes nas condições em que foi realizado o estudo.

Apesar de ser uma opção promissora para aumentar significativamente a retenção de água nos solos e aumentar a água disponível para as plantas em regiões áridas e semiáridas, Nascimento et al. (2021a) ponderam que a salinidade e as altas temperaturas comprometem a absorção de água pelos hidrogéis. Em condições salinas, os grupos hidrofílicos do hidrogel se ligam aos sais, bloqueando a entrada de água, além de suprimirem as interações eletrostáticas entre o polímero e as moléculas de água. Com relação às altas temperaturas, estas aumentam a adsorção de polímeros aniônicos às argilas devido à redução das ligações de hidrogênio entre o polímero e as moléculas de água, o que aumenta a penetração do polímero na estrutura interna da argila. Dessa forma, os autores afirmam que é necessário desenvolver polímeros tolerantes a estas condições e ampliar os dados e estudos sobre o efeito da salinidade e das temperaturas comumente associadas a regiões áridas e semiáridas em hidrogéis.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização do local de experimento e período de desenvolvimento

Os experimentos E1 e E2 foram desenvolvidos na Fazenda Água Limpa (FAL), da Universidade de Brasília (UnB), localizada nas coordenadas 15°56' S e 47°55' W que, pela classificação de Köppen's, o clima é do tipo AW, caracterizado por duas estações bem definidas, uma estação quente e chuvosa, que ocorre de outubro a abril, e outra fria e seca, de maio a setembro (Álvares, 2014). O E1 foi realizado no período de 27/06/2021 a 08/12/2021 (165 dias) e o E2 de 25/07/2022 a 30/01/2023 (190 dias).

Os experimentos E1 e E2 foram desenvolvidos em um viveiro com dimensões de 13 x 13 m, com altura do pé direito de 2,5 m, sem fechamento lateral, de cobertura com tela tipo sombrite com retenção de 50% da luminosidade solar e, sob este, foi instalado um filme plástico de 100 micras (Figura 2).



Figura 2 - Viveiro da Fazenda Água Limpa (FAL) onde se desenvolveram o E1 e o E2.

Os valores de temperatura do ar e umidade relativa do ar máximas, médias e mínimas no E1 (Figura 3a) e E2 (Figura 3b) foram obtidas em estação meteorológica semiautomática localizada a 250 m do local do experimento. Observa-se que os valores de temperatura do ar e a umidade relativa são características do cerrado brasileiro nos dois experimentos, com grande amplitude térmica (mais evidente no E1, realizado em 2021) e estações climáticas bem definidas. A temperatura média no E1 variou de 15,4 °C (13 DAS) a 24,4 °C (73 DAS), com maiores valores próximo a metade do tempo do experimento, já no E2 a temperatura média

decreceu do início para o final do experimento, variando de 22 °C (1 DAS) a 19,9 °C (137 DAS), ou seja, uma amplitude térmica da temperatura média baixa sendo de apenas 2,1 °C, menor ao E1 que foi de 9,0 °C, isso se deve ao fato de que o E1 contemplou maior número de dias no período de inverno, assim, foi de 6,8 °C no E1 e 10,4 °C no E2, sendo crescente do início ao fim no experimento no E1 e praticamente estável no E2.

Ressalta-se que as temperaturas médias mínimas e máximas no E1 e E2 foram favoráveis à germinação das mudas considerando que a espécie Tamboril possui uma amplitude térmica favorável à germinação grande de 10,9° C à 41,9° C (Carvalho, 2003).

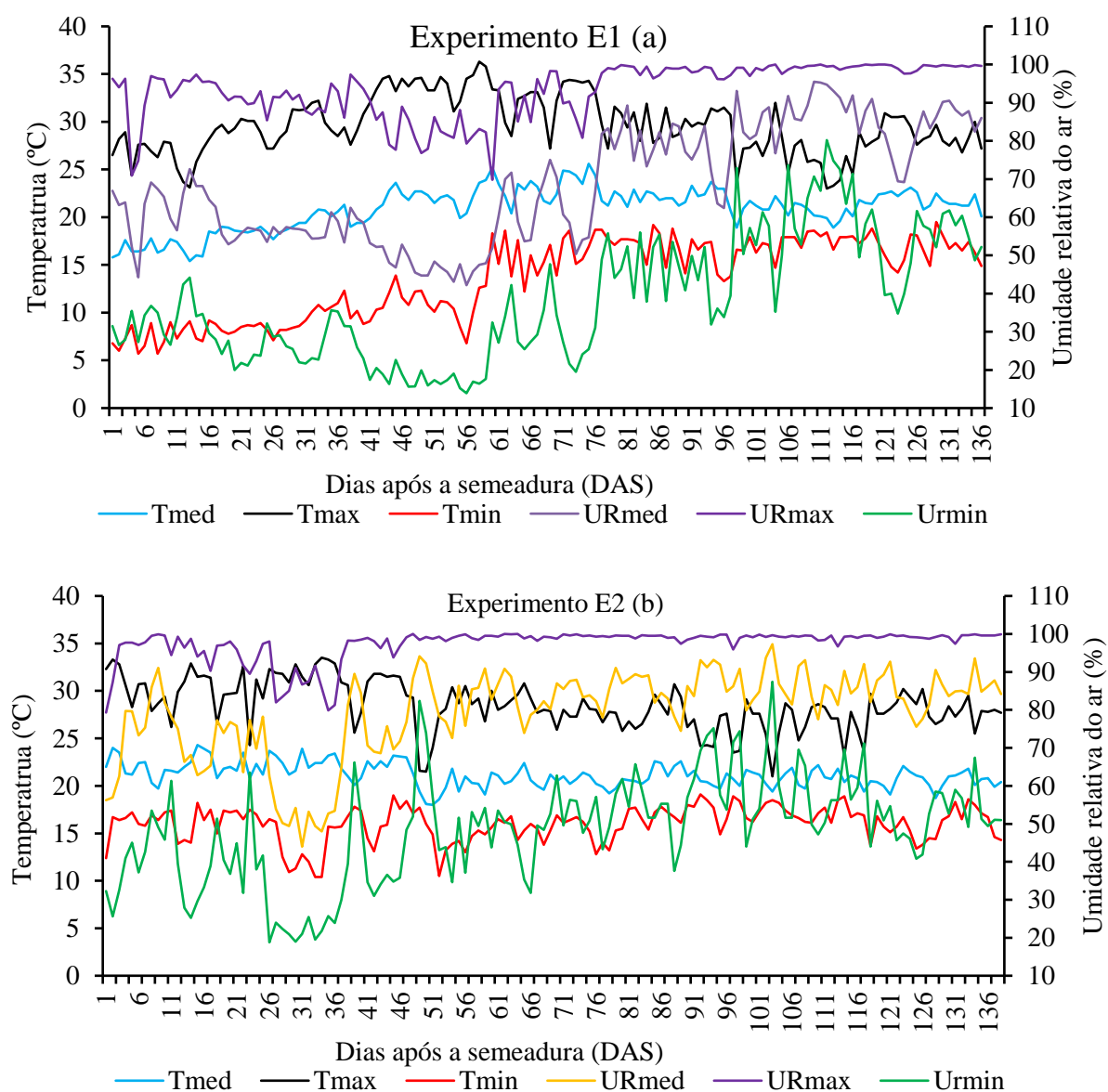


Figura 3 – Valores de temperatura e umidade relativa do ar média, máxima e mínima nos experimentos E1 (a) e E2 (b) em função dos dias após a semeadura do tamboril.

4.2 Coleta, preparo e análise do solo e do esterco bovino

Amostras do solo para os experimentos E1 e E2 foram coletadas em área da FAL/UnB, em solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) distrófico típico segundo o sistema brasileiro de classificação de solos (Embrapa, 2013), no perfil de solo de 5 a 20 cm.

O solo foi peneirado em peneira de malha 2,0 mm e coletadas subamostras em 10 diferentes pontos para formar uma amostra composta para análise de fertilidade do solo, representativa no início do experimento e utilizada para correção da acidez (Tabela 1). Ao término do E1 e E2, o solo foi removido das embalagens para separação das raízes e após foi homogeneizado e coletado três amostras de solo para cada tratamento, totalizando 75 amostras por experimento.

As amostras de solo foram analisadas quanto à fertilidade e textura no início (Tabela 1) e corrigidas utilizando calcário calcítico Filler PRNT de 100%, na dose equivalente a 1,29 t ha⁻¹ aos 60 dias antes da semeadura, para elevar a saturação de bases a 70%.

Tabela 1 - Valores dos atributos químicos e granulometria do solo na camada 0,05 a 0,15 m no início do experimento E1 após a correção da acidez.

pH	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	AcP	CTCe	CTCt	Na ²⁺	m	V
									cmol _c dm ⁻³	
6,50	<0,1	4,30	2,10	0,1	5,40	6,50	11,80	<0,10	1,50	54
									%	
Pdisp.	MO	COT	S	Cu	Fe	Mn	Zn	Areia	Argila	Silte
									g kg ⁻¹	
4,80	94	54	<0,10	0,263	355,30	21,7	9,20	42	10	47
									ppm	
									%	

pH: pH em água; SB: soma de bases; K: Potássio Extraível; Ca²⁺: Cálcio Extraível; Mg²⁺: Magnésio Extraível; Al³⁺: Alumínio Trocável; AcP: Acidez potencial; CTCe: CTC efetiva; CTCt: CTC total em pH 7,0; Na⁺: Sódio; m: Saturação por Al trocável; V: Saturação por bases; Pdisp: Fósforo disponível; MO: Matéria Orgânica; COT: Carbono Orgânico Total; S: Enxofre; Cu: Cobre; Fe: Ferro; Mn: Manganês; Zn: Zinco.

Em todos os tratamentos foram adicionados ao solo composto de esterco bovino na proporção de 0,25:1,0, base volume (v/v). O esterco bovino curtido foi adquirido em loja agropecuária e analisado quanto a presença de macro e micronutrientes (Tabela 2). O esterco bovino utilizado foi o da marca Terral que, de acordo com o fornecedor do produto, é feito a partir de compostagem, esterilização, moagem e peneiramento, tornando-se isento de pragas e plantas daninha e sem cheiro.

Tabela 2 – Valores dos atributos químicos do esterco bovino utilizado na mistura com solo, biochar e hidrogel nos experimentos E1 e E2.

pH	K ⁺ Total	Ca ²⁺ Total	Mg ²⁺	N Total	P Total	P ₂ O ₅	Cu Total	Fe Total	Zn Total	Mn Total
%										
7,2	8,58	1,0	0,9	2,91	2,91	6,7	0,04	1,2	0,12	0,4

pH: pH em água; Ktotal: Potássio total; Ca²⁺: Cálcio total; Ntotal: nitrogênio total; Ptotal: Fósforo total; P₂O₅: fosfato; Cu: Cobre total; Zn: Zinco total; Mn: Manganês total;

Embalagem de cultivo: Utilizaram-se embalagens de plástico com 12,0 cm de diâmetro e 26,0 cm de altura, sendo adicionado em cada uma o equivalente a 2,5 L de LVA, esterco bovino (EB) e BLE. Em cada embalagem de cultivo foi adicionado 0,4 L de água por 1 L da mistura de LVA, EB, BLE para elevar a umidade à capacidade de campo e hidratação do hidrogel, conforme ensaios preliminares. As embalagens preenchidas com a mistura de LVA, EB, BLE foram dispostas de forma a posicionar as fitas gotejadoras sobre as embalagens (Figura 4a) no E1, onde a lâmina de irrigação foi a mesma em todos os tratamentos e na Figura 4b, representativa do E2, apresenta-se a distribuição das embalagens e fitas gotejadoras onde foram utilizadas lâminas de irrigação diferentes.



Figura 4 - Embalagens de cultivo e disposição das fitas gotejadoras no experimento E1 (a) onde a lâmina de irrigação foi a mesma em todos os tratamentos e embalagens de cultivo e disposição das fitas gotejadoras no experimento E2 (b) onde a lâmina de irrigação foi diferente.

4.3 Origem do biochar

A matéria prima para a produção do biochar foi o lodo de esgoto gerado na estação de tratamento de esgoto de Samambaia, pertencente à Companhia de Saneamento Ambiental do

Distrito Federal (CAESB), submetido à temperatura de pirólise de 300 °C. O tempo de residência na pirólise foi de 5 h, com rendimento de cerca de 80%, na taxa de aumento de temperatura de 2,5 °C por minuto. O produto do biochar foi selecionado e classificado, utilizando o tamanho médio dos grânulos menores que 4 mm e realizada a análise de sua composição (Tabela 3).

Tabela 3 - Propriedades físico-químicas do lodo de esgoto e do biochar (BLE) produzido a 300 °C.

Propriedades	Lodo de esgoto	BLE 300
Umidade (%)	10,62 ± 1,56	4,26 ± 0,23
Sólidos Voláteis (%)	48,25 ± 1,36	41,75 ± 2,47
Cinzas (%)	39,33 ± 2,38	48,27 ± 1,08
Carbono Fixo (%)	1,79 ± 0,52	5,72 ± 1,55
Carbono Inerte (%)	3,23 ± 0,39	2,86 ± 0,34
Carbono Total (%)	18,58 ± 0,26	19,92 ± 0,28
COT (%)	17,45 ± 0,85	18,61 ± 0,09
MOT (%)	30,09 ± 1,47	32,09 ± 0,15
Ácido Fúlvico (g kg⁻¹)	24,10 ± 0,58	23,89 ± 0,33
Ácido Húmico (g kg⁻¹)	8,45 ± 0,39	7,51 ± 0,11
Huminas (g kg⁻¹)	146,28 ± 3,00	139,90 ± 1,21
Nitrogênio (%)	3,99 ± 0,05	5,05 ± 1,16
C/N	4,66 ± 0,02	3,95 ± 0,96
pH (CaCl₂)	5,48 ± 0,02	6,04 ± 0,04
CTC (mmol L⁻¹)	286,67 ± 1,53	265,00 ± 2,00
Fósforo (g kg⁻¹)	23,52 ± 0,75	28,70 ± 0,33
Potássio (g kg⁻¹)	0	0
Cálcio (g kg⁻¹)	13,17 ± 0,21	11,33 ± 0,15
Magnésio (g kg⁻¹)	2,53 ± 0,06	2,77 ± 0,06
Enxofre (g kg⁻¹)	13,70 ± 0	15,10 ± 0
Boro (mg kg⁻¹)	0	0
Cobre (mg kg⁻¹)	100,00 ± 0	113,33 ± 5,77
Ferro (g kg⁻¹)	15,40 ± 0,17	16,40 ± 0,10
Manganês (mg kg⁻¹)	100 ± 0	100 ± 0
Zinco (mg kg⁻¹)	400,00 ± 0	503,33 ± 5,77
Rendimento (%)	-	81,21 ± 3,30

COT: carbono orgânico total; MOT: matéria orgânica total; CTC: capacidade de troca de cátions.

4.4 Tipo e mistura do hidrogel

Utilizou-se hidrogel, Copolímero Acrílico de Potássio e Acrilamida, da marca FORTH® (Figura 5), com CTC (Capacidade de Troca de Cátions) de 1100 mmol_c kg⁻¹ e CRA (Capacidade de Retenção de Água) de 90%, sendo de natureza física sólida e, visando garantir homogeneidade das misturas, separou-se 15 L de LVA mais EB suficiente para preencher 6 embalagens de cultivo. Para pesagem do hidrogel utilizou-se balança analítica com precisão de 0,0001 g, sendo pulverizado sobre a mistura de LVA, EB e BLE secos ao ar e posteriormente homogeneizado manualmente por 4 minutos.



Figura 5 – Hidrogel da marca Forth utilizado no E1 e E2.

4.5 Origem das sementes de Tamboril e quebra de dormência

As sementes de Tamboril foram adquiridas em empresa especializada. Antes da quebra de dormência, as sementes foram mergulhadas em uma solução de hipoclorito de sódio (NaOCl) a 2% (v/v) por um período de 10 min para ação antimicrobiana superficial (agente oxidante que elimina vírus e bactérias, por serem sensíveis à oxidação) e, em seguida, foi realizado enxágue com água corrente (BRASIL, 2009) (Figura 6). Foi realizada a escarificação mecânica na região oposta a micrópila com o uso de um alicate para unha em substituição ao uso de lixa n. 80, com a vantagem de ser realizado a escarificação de maneira mais rápida. Por fim, as sementes foram imersas em água na temperatura de 80 °C até o resfriamento.



Figura 6 - Sementes de tamboril selecionadas (a), sementes embebidas em hipoclorito de sódio (b) sementes após a escarificação mecânica (c).

Nos experimentos E1 e E2 foram semeadas 2 sementes diretamente em cada embalagem de cultivo contendo 2,5 L de mistura solo, esterco bovino e biochar e hidrogel (Figura 7) ou conforme os tratamentos e, cerca de 20 dias após a germinação, foi realizado o desbaste e replantio, caso necessário, nos vasos que não houve germinação ou as plântulas estavam pouco desenvolvidas, deixando uma planta por embalagem de cultivo, buscando um melhor estande das mudas em todos os tratamentos.



Figura 7 – Vasos de cultivo com duas plântulas de tamboril antes do desbaste no E2.

4.6 Sistema de irrigação e manejo da irrigação

Tanto no E1 como no E2 foi utilizado fita gotejadora de 12 mm de diâmetro externo (Figura 7) e vazão de $2,0 \text{ L h}^{-1}$ na pressão de 120 kPa. Como o espaçamento entre os emissores era de 0,20 m, as embalagens foram dispostas também a cada 0,20 m, de forma que o gotejamento ocorresse no centro de cada embalagem de cultivo. No E1 e E2 foi utilizado

motobomba periférica monofásica de 1/2 CV, reguladores de pressão, tomadas de pressão, válvulas de esfera (Vg) (Figura 8c) e filtro de disco de 130 microns.

No E1, o acionamento foi realizado por temporizador eletrônico digital, com precisão de acionamento da motobomba de 1 s (Figura 8a). O tempo de irrigação foi o mesmo em todos os tratamentos, com acionamentos às 09:00 h e 17:00 h, por 1min10s (um min e 10 segundos), visando obter uma lâmina de no mínimo 1 min, considerando 10 s de acionamento do conjunto de irrigação, totalizando ao final do ciclo do tamboril uma lâmina aplicada de 471,5 mm

No E2 o sistema de irrigação foi semiautomatizado (SISA), projetado para auxiliar a irrigação, sendo possível acionar a irrigação via internet através de uma interface web simplificada. Nessa interface são mostrados cinco campos que representam as válvulas solenoides ordenadas de S1 a S5 (Figura 8b e 8d), correspondentes as válvulas solenoides Vs1 a Vs5, (Figura 8c), respectivamente. O tempo de irrigação, em segundo, foi digitado nos espaços para registrar a solicitação e clicando no botão “Executar”, iniciado, assim, o processo de irrigação, logo em seguida é mostrado em Tabela (Figura 8e) os tempos programados com o Status em “S” quando a tarefa foi executada ou “N” de não executado, o que representa alguma falha no sistema como, por exemplo, ausência de sinal de internet. O processo é iniciado com o acionamento do relé da válvula solenoide Vs1, sendo o relé da válvula solenoide Vs2 acionado após a desligamento da Vs1 sucessivamente até a Vs5. O tempo, em segundos, é disponibilizado na tabela de registros das informações (Figura 8e).

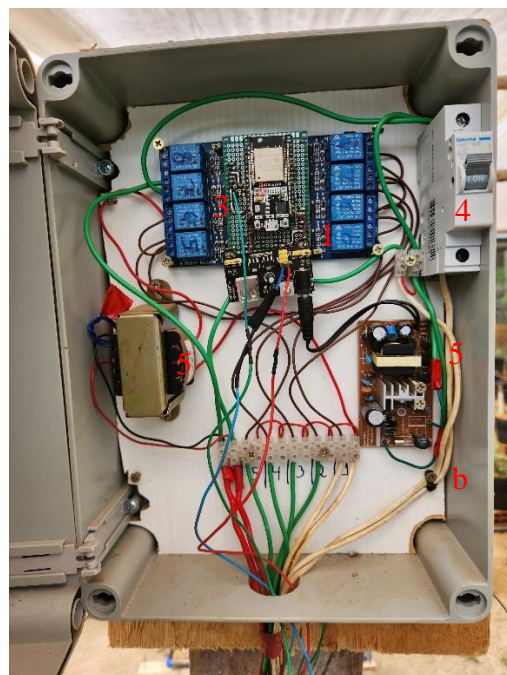
Componentes utilizados para construir o SISA, onde os números entre parênteses representam os componentes eletrônicos na Figura 8b e 8c:

- ESP32, responsável pela parte lógica e de comandos (1);
- 01 motobomba periférica 220 V;
- 05 válvulas solenoides de controle de fluxo de água de 24 V (2);
- 06 relés para controle da motobomba e das válvulas solenoides (3);
- 01 Disjuntor monofásico (4);
- Para alimentação do sistema foram utilizados: 01 transformado de 220V/24V; 01 transformador de 220V/12V e 01 placa de alimentação para equipamentos embarcados de 12V/5V (5);
- Interface web: A interface frontal da web (frontend) foi programada em HTML (HyperText Markup Language - Linguagem de Marcação de Hipertexto) e JAVASCRIPT. Para trazer um design simples foi necessário a utilização do CSS (Cascading Style Sheets que, traduzido para o português, significa Folha de Estilo em Cascatas), já a interface por “trás” da web (backend)

foi utilizado o PHP (Hypertext Preprocessor (Pré-Processador de Hipertexto), que originalmente se chamava Personal Home Page (Página Inicial Pessoal). para criar, salvar e alterar os dados e o MySQL (a origem vem da junção de “My”, que é o nome da filha do cofundador, Michael Widenius, e “SQL”, que é a sigla para Structured Query Language, cuja tradução mais próxima é linguagem de consulta estruturada) para armazenar os dados;

- Interface embarcada: A programação do ESP32 (Eletronic Stability Program) foi feita por meio da plataforma ARDUINO IDE (Integrated Development Environment), onde circuito embarcado utilizada linguagem C++;

Infraestrutura: Para o funcionamento da SISA utilizou-se um repetidor de sinal WIFI com criptografia AES2 (Advanced Encryption Standard), acesso à internet, energia e água.





Status	Data	Hora	S1	S2	S3	S4	S5
N	09/09/2023	08:45:30	349	279	209	140	70
S	09/09/2023	08:55:10	349	279	209	140	70
S	11/09/2023	08:30:20	349	279	209	140	70 e
S	12/09/2023	08:35:02	349	279	209	140	70

Figura 8 – Temporizador eletrônico digital utilizado no acionamento do sistema de irrigação no E1 (a), válvulas solenoides (Vs1 a Vs5) acionadas por um painel semiautomatizado, válvula de gaveta (Vg) no E2 (c), interface para identificação das válvulas solenoides (d) e status, data e hora de acionamento das válvulas solenoides e seus respectivos tempos de irrigação, em segundos para cada evento de irrigação (e).

No E1 e E2 o turno de rega foi de 2 dias, aplicando-se lâmina de irrigação o suficiente para elevar a umidade até capacidade de campo (CC) no tratamento tomado como referência (solo mais esterco bovino, sem BLE e sem H), sendo este assim considerado devido a menor retenção de água nos tratamentos.

No E1 a lâmina total aplicada foi de 471,5 mm em todo o período do experimento, levando em consideração 160 dias, tendo em vista que os primeiros 5 dias foram utilizadas lâminas apenas para auxílio na germinação.

No final de cada parcela foi instalado uma válvula de final de linha de duplo efeito (admite e expulsa ar do sistema de irrigação), pressurizando o sistema de irrigação em 10 s, sendo desconsiderado o no tempo de irrigação de cada tratamento.

O monitoramento da umidade foi realizado indiretamente com o uso de três tensiômetros (Figura 9a) para cada tratamento, instalados na profundidade de 0,10 cm e com leituras realizadas com tensímetro digital de punção. Observa-se que os valores de tensão foram, em média, ao longo do período do experimento 1 (E1) de 7 kPa (H2) (Figura 9c) a 9,6

kPa (B8) (Figura 9b), portanto, sempre abaixo de 10 kPa, mostrando não haver deficiência hídrica ao longo do experimento, possivelmente devido à alta frequência de irrigação, motivo pelo qual não houve efeito na manutenção da umidade em níveis mais elevados com doses maiores de hidrogel, que possivelmente apareceriam caso fosse aplicado lâminas de irrigação menores, não sendo observado deficiência hídrica e estresse hídrico às plantas, não sendo observado drenagem pela embalagem de cultivo. Ao mesmo tempo, o posicionamento do tensiômetro em relação ao local de gotejamento pode ser a causa das variações que ocorreram mesmo dentro das maiores doses de hidrogel.

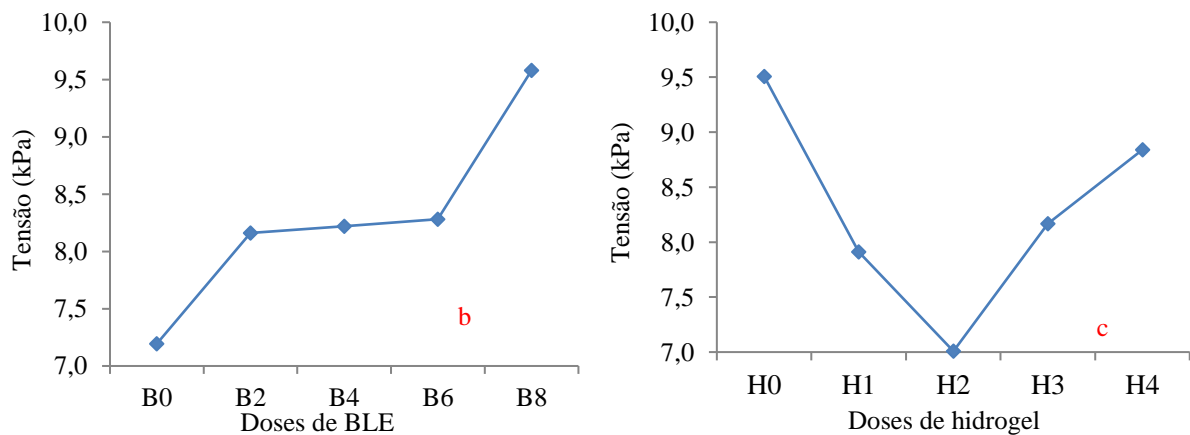
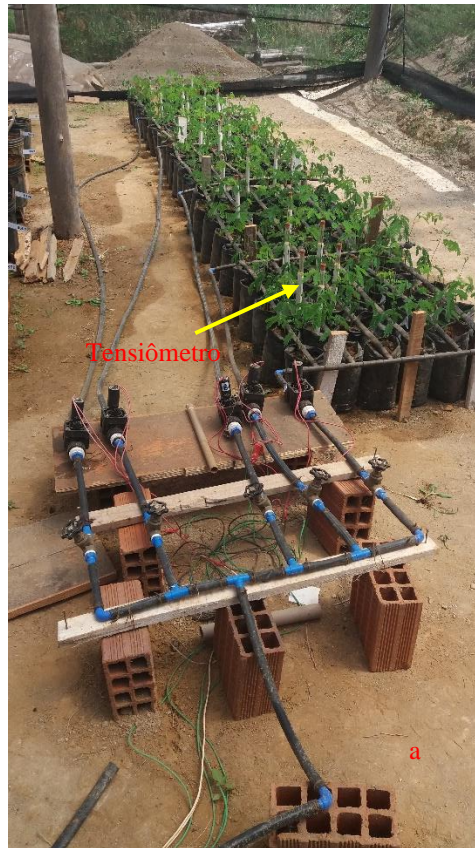


Figura 9 - Tensiômetros instalados na profundidade de 0,10 m, com leituras realizadas com tensímetro digital de punção (a) e valores de tensão médio obtidos durante o período do experimento 1 (E1) do tamboril (b e c).

A curva de retenção de água no solo (CRAS) foi confeccionada a partir de 5 amostras indeformadas coletadas no centro do raio das embalagens de cultivo do tratamento sem presença de hidrogel e biochar, considerado como referência as demais doses de hidrogel e lâminas de irrigação. A coleta das amostras foi realizada depois da instalação dos experimentos com irrigações realizadas duas vezes ao dia durante 5 dias para acomodação das partículas do solo.

No E2, no tratamento de referência foi aplicada lâmina de irrigação suficiente para elevar a umidade à CC (1,0), na demais lâminas de irrigação aplicou-se ao proporcional de 0,8, 0,6, 0,4 e 0,2 da lâmina de 1,0. Considerou-se como referência a umidade do solo a 10 kPa, característicos do solo utilizado e representativo de latossolos vermelho amarelo.

A CRAS foi realizada com extrator de Richards (1965), com a restrição de Mualem (Figura 10) nos potenciais matriciais de -300, -80, -50, -33, -10, -8, -6, -5 e -2 kPa e ajustando a curva de retenção de água no solo pelo modelo Van Genuchten et al. (1980), através da SWRC (Soil Water Retention Curve).

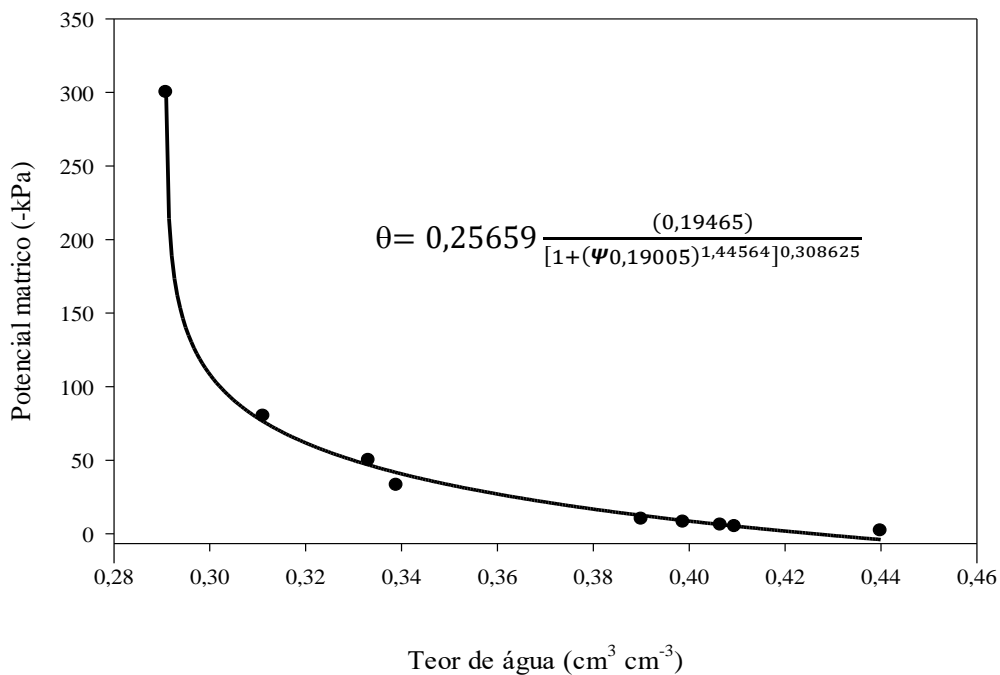


Figura 10 – Curva de retenção com valores de unidade volumétrica em função do potencial matricial do Latossolo Vermelho Amarelo, segundo o modelo de van Genuchten para o ψ : potencial matricial da água no solo (kPa).

4.7 Delineamento experimental nos experimentos E1 e E2

Primeiro Experimento (E1): o delineamento experimental foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 5 x 5, sendo 4 (quatro) doses de biochar, 4 (quatro) de hidrogel e 1 (um) tratamento testemunha para cada fator, com 6 (seis) repetições (embalagens de cultivo), totalizando 25 tratamentos (Figura 11).

Foram utilizadas as doses de biochar de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8 (B8) % base volume e hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L⁻¹ da mistura LVA e esterco bovino.

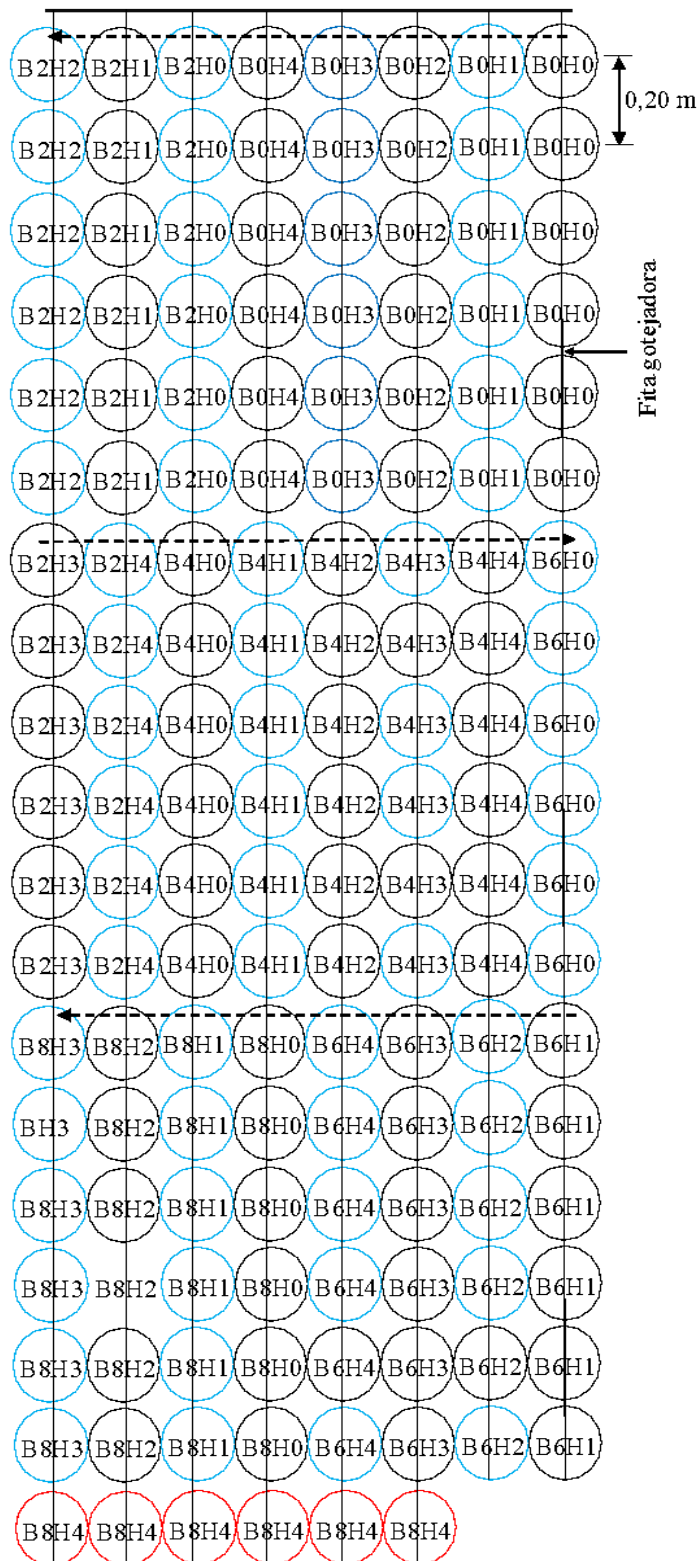


Figura 11 - Distribuição dos tratamentos com diferentes doses de biochar (B0 a B8) e de hidrogel de (H0 a H4) e 6 repetições no E1.

Experimento (E2): Foi utilizado em todos os tratamentos a dose de biochar que no E1 apresentou a melhor resposta nos aspectos massa seca total (MsT) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD). Assim, como as doses de biochar de 6 e 8% base volume apresentaram

respostas similares, optou-se no E2 utilizar em todos os tratamentos a dose de biochar de 6% v/v, tendo como fator de variação a lâmina de irrigação e as doses de hidrogel

Foi utilizado delineamento em blocos ao acaso em esquema fatorial de parcelas subdivididas (Figura 12), sendo as parcelas compostas pelas lâminas de irrigação correspondente a 1,0, 0,8, 0,6, 0,4 e 0,2 da capacidade de campo (CC) e nas subparcelas as doses de hidrogel de 0, 1, 2, 3 e 4 g L⁻¹ de mistura de LVA e esterco bovino, com seis repetições, cada uma representada por uma embalagem de cultivo de 2,5 L.

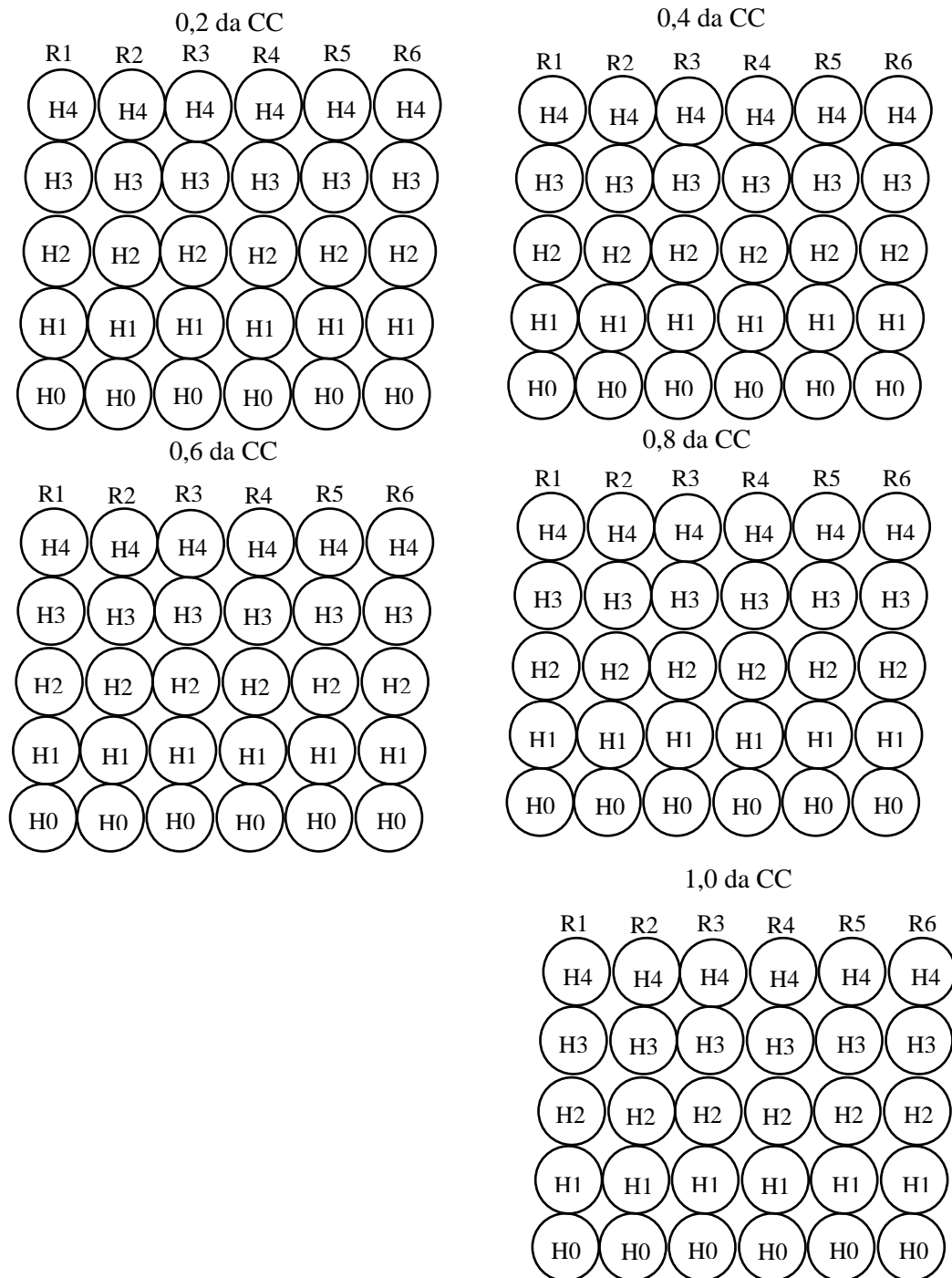


Figura 12 - Distribuição dos tratamentos nas diferentes lâminas de irrigação (1,0 a 0,2 da CC e doses de hidrogel (H0 a H4) e 6 repetições.

4.8 Variáveis de desempenho do Tamboril

Altura das plantas (AP)

Foi medida a altura de 6 plantas úteis por tratamento aos 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 e 165 dias após o semeio (DAS) no E1 e com medida final aos 190 dias no E2, determinada com o auxílio de régua graduada, em mm. Foi medida a altura do caule principal das plantas eretas desde a superfície do solo até a inserção do último par de folhas. As Figuras 13 e 14 mostram o crescimento da altura das plantas de Tamboril no E1 e E2 conforme os dias após a semeadura.



Figura 13 - Mudas de Tamboril no início da germinação, aos 60 e aos 165 dias após a semeadura no E1.

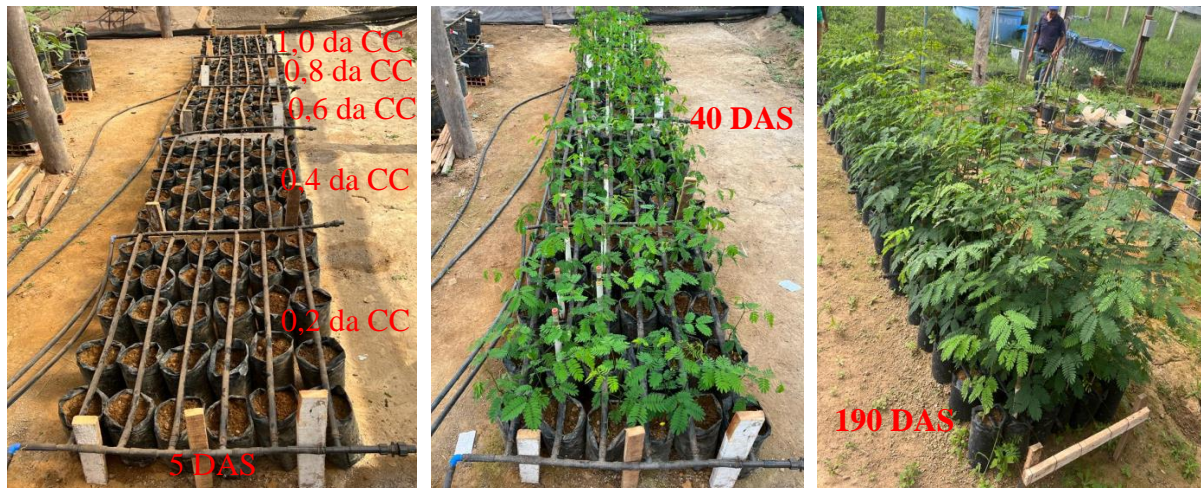


Figura 14 – Vista aos 5 dias após a semeadura do Tamboril (ainda não germinou), aos 40 e aos 190 dias após a semeadura (DAS) no E2 para as lâminas de irrigação de 1,0, 0,8, 0,6, 0,4 e 0,2 da capacidade de campo (CC).

Número de Folhas (NF)

O número de folhas (NF) foi contado a partir da superfície do solo até o último par de folhas completo no último dia de experimento (165 DAS no E1). Este parâmetro foi avaliado apenas no E1.

Diâmetro do coleto (DC)

Foi medido o diâmetro do coleto a 1 cm acima da superfície do solo aos 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 e 165 DAS no E1 e com medida final em 190 DAS no E2, em 6 plantas úteis por tratamento, utilizando um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm.

Massa úmida (MuA) e seca da parte aérea (MsA)

Aos 165 DAS no E1 e aos 190 DAS no E2 foi medida a MuA e MsA, esta última obtida a partir da secagem em estufa de ar forçado a 65 °C (± 1 °C) por 48 h ou até peso constante. Para isso foram podadas rente à superfície do solo 4 plantas úteis de cada tratamento e pesadas em balança analítica com precisão de 0,0001 g.

Massa úmida (MuR) e seca das raízes (MsR)

Foi obtido a MuR e MsR de 4 plantas úteis de cada tratamento utilizando balança analítica com precisão de 0,0001 g. A secagem foi realizada em estufa de circulação de ar forçada com temperatura de 65 °C (± 1 °C) por 48 h ou até peso constante.

A partir da AP, DC e $MsT = MsA + MsR$, sendo MsT = matéria seca total, em g, foi determinada as seguintes variáveis de qualidade:

- ✓ Relação entre altura da planta e diâmetro do coleto (RAD), $DAD = AP/DC$;
- ✓ Relação da massa seca parte aérea e massa seca das raízes (RPAR), $RPAR = MsA/MsR$;
- ✓ Índice de qualidade de Dickson (IQD), obtido pela fórmula $IQD = MST/(RAD + RPAR)$ (DICKSON et al., 1960).

Área foliar (AF)

Para determinar a área foliar de cada folha (AF) foi utilizado o integrador de área foliar de bancada LI-3100C (LICOR), com uma resolução de 1 mm².

Em função das folhas do Tamboril serem de pequeno tamanho e em grande número, a determinação da AF em muitas plantas fica inviável, assim, foi avaliada a AF de 10 plantas, uma de cada tratamento selecionado aleatoriamente. Foi medido a massa úmida da parte aérea

da planta (MuA) e gerado uma curva de regressão que melhor correlacione a AF com a MuA, posteriormente, aplicada a todas as plantas, a partir de um polinômio de terceiro grau: $AF (cm^2) = 0,015x^3 - 1,2796x^2 + 59,155x - 166,13$, e $R^2 = 0,9929$, sendo x = massa úmida da parte aérea da planta (MuA).

4.9 Procedimentos estatísticos

As variáveis morfológicas foram submetidas à análise de variância, comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de significância utilizando-se o software AgroEstat® (Barbosa; Maldonado Júnior, 2010), bem como a análise de regressão e correlação de Pearson.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Atributos morfológicos do Tamboril no experimento 1 (E1): doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) versus doses de hidrogel (H)

A combinação entre biochar de lodo de esgoto (BLE) e o hidrogel, incorporados ao substrato, promoveu elevação significativa nos parâmetros morfológicos do Tamboril, sendo os maiores valores obtidos com a utilização de maiores doses, notadamente B6 e B8 (6 e 8% base volume de BLE) e doses de hidrogel H3 e H4 (3 e 4 g L⁻¹ de substrato) (Tabelas 4, 5 e 6).

A AP respondeu significativamente às maiores doses de BLE e H, com maior valor no tratamento B8H0 e B6H3, com 119,00 cm e 110,3 cm, respectivamente, aos 165 dias DAS (Tabela 4 e Figura 16). Os valores são maiores do que os observados por Abreu et al. (2014) em estudo sobre a produção de mudas de Tamboril em diversos recipientes, onde encontraram o valor de AP de 77,5 cm aos 150 dias após plantio e por Araújo e Paiva Sobrinho (2011) que observaram AP de 90,26 cm, aos 120 DAS, em estudo com diferentes substratos. Os maiores valores de AP encontrados no presente estudo podem ser explicados pelos benefícios resultantes dos nutrientes presentes no biochar, como fósforo, potássio e nitrogênio, influenciando positivamente no desenvolvimento vegetativo das mudas, e pelo maior tempo de experimento (165 dias) comparado aos autores acima mencionados.

Já os maiores valores de DC (10,4 mm), NF (19), MsA (25,79 g) e MsA/MsR (3,00) foram obtidos com o tratamento B6H3 (P<0,05; Tabelas 4, 5 e 6 e Figura 16). Além disso, a relação entre a massa seca da parte aérea e das raízes (MsA/MsR) indica a capacidade de adaptação das mudas nas condições de campo, já que uma boa proporção entre essas duas partes da planta é essencial para um desenvolvimento adequado e saudável (Avelino et al., 2020).

Tabela 4 - Valores de Altura da Planta (AP), Diâmetro do Coleto (DC), Número de Folhas (NF) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) para as doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 e 8% (B8) base volume e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L⁻¹ da mistura Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), esterco bovino (EB) e biochar de lodo de esgoto (BLE) aos 165 dias após a semeadura (DAS) das sementes de tamboril no experimento (E1).

Doses de BLE	Variável									
	AP (cm)					DC (mm)				
	Doses de hidrogel (g L ⁻¹ de substrato)									
	H0	H1	H2	H3	H4	H0	H1	H2	H3	H4
B0	59,7 Ca	61,8 Ba	73,3 Aa	71,3 BCa	72,5 Ba	6,3 Ba	7,0 Ba	6,2 Ba	6,3 Ca	6,6 Ba
B2	71,3 BCa	65,5 Ba	69,3 Aa	67,0 Ca	77,5 ABa	7,0 ABa	7,8 ABa	6,8 Ba	6,1 Ca	6,6 Ba
B4	83,3 BCa	83,3 ABa	71,3 Aa	97,3 ABa	92,5 ABa	7,0 ABa	6,9 Ba	7,1 Ba	8,0 BCa	7,9 ABa
B6	91,3 Bab	86,3 ABab	83,3 Ab	110,3 Aa	100,3Aab	7,4 ABb	9,2 Aab	7,8 ABb	10,4Aa	9,0 Aab
B8	119,0Aa	97,8 Aab	91,8 Ab	89,5 ABCb	85,7 ABb	8,6 Aa	8,1 ABa	9,3 Aa	8,7ABa	8,5 ABa
Va%	58,25	25,24	25,53	18,21	36,51	15,71	50,00	38,10	28,79	58,25
	NF					IQD				
B0	14,0 ABa	12,8 Ba	12,5 Ba	15,5 ABa	14,0 ABa	1,23 Aa	1,03 Ba	0,91 Ba	0,82 Aa	1,14 Ba
B2	15,8 ABa	14,0 ABa	13,8 ABa	15,0 Ba	13,0 Ba	1,23 Aa	1,81 ABa	1,25 Ba	1,10 Aa	1,21 Ba
B4	13,3 Bb	16,0ABab	14,0 ABab	16,8 ABa	16,5 Aab	1,16 Aa	1,09 Ba	1,78 ABa	1,48 BCa	1,71 Ba
B6	17,0Aab	16,5 Aab	15,0 ABb	18,5 Aa	17,3 Aab	1,45 Ab	2,86 Aa	1,79 ABab	2,46 ABab	2,07 ABab
B8	15,0ABa	15,5 ABa	16,8 Aa	17,8 ABa	15,5 ABa	1,65 Ab	1,70 Bb	2,47 Aab	2,80 Aa	2,82 Aa
Va%	21,09	34,40	14,84	10,71	34,15	65,05	171,43	241,46	147,37	21,09

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas na linha não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Trat: Tratamentos. Va%: Variação entre B0 e B8 para cada dosagem de hidrogel.

A utilização de maiores doses de biochar e maiores doses de hidrogel, notadamente 6 e 8% de BLE e 3 e 4 g L⁻¹ de hidrogel, promoveram aumentos significativos nos valores de IQD, com valores de 2,86 em B6H1, 2,80 para B8H3 e 2,82 para B8H4 (Tabela 4 e Figura 16).

Os valores de IQD são semelhantes aos observados por Costa et al. (2020) em estudo sobre os parâmetros morfológicos do Tamboril produzido em tubetes biodegradáveis, com o valor de 3,4±1,3, e com o estudo de Abreu et al. (2014) sobre a produção de mudas de Tamboril e crescimento inicial em diferentes recipientes, com valores de 2,27 para mudas produzidas em sacos plásticos. O IQD é considerado um dos melhores indicadores para a avaliação da qualidade de mudas de espécies florestais, pois inclui os principais parâmetros morfológicos para seu cálculo (AP, DC, MsA, MsR e MsT).

O maior valor de MuA no E1 foi observado no tratamento B6H3, com 55,45 g (Tabela 5), já MuR, MsR e MsT foram maiores na dose de BLE de 8% v/v, no entanto, não houve diferença quando da adição na dose de hidrogel 4 g L⁻¹, sendo que a melhor combinação foi

com o tratamento B8H3 com 67,14 g, 14,67 g e 35,61 g (Tabelas 5 e 6), respectivamente. Os valores são maiores aos obtidos por Araújo e Paiva Sobrinho (2011) que observaram, para MuA, MsA e MuR e MsR, resultados mais discrepantes com 23,03 g, 6,3 g, 6,6 g e 1,44 g, respectivamente, aos 120 DAS. Tais diferenças podem ser explicadas devido ao fato de que o presente estudo se encerrou aos 165 dias após plantio e o dos autores se estendeu por 120 dias, portanto, 45 dias a menos.

As variáveis morfológicas como AP, DC, MsA e MsR, são importantes para o desenvolvimento de mudas de espécies florestais, pois indicam o estado de saúde e a qualidade das mudas, o que influencia diretamente o sucesso da sua implantação no campo (Gomes e Paiva, 2011).

Tabela 5 - Valores de Massa úmida aérea (MuA), Massa úmida radicular (MuR), Massa seca da parte Aérea (MsA) e Massa seca Radicular (MsR) para as doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L⁻¹ da mistura latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) e biochar de lodo de esgoto (BLE) aos 165 dias após a semeadura (DAS) das sementes de Tamboril no E1.

Doses de BLE	Variável									
	MuA (g)					MuR (g)				
	Doses de hidrogel (g L ⁻¹ de substrato)									
	H0	H1	H2	H3	H4	H0	H1	H2	H3	H4
B0	22,90 Ba	21,05 Ca	19,80 Ca	28,05 Ba	28,19 Ca	26,26 Ba	17,70 Ca	21,61 Ca	19,68 Ba	23,88 Ca
B2	34,66AB _a	33,51BCa	29,04BCa	31,36 Ba	35,84BCa	23,84 Ba	32,98BC _a	29,45BCa	32,05Ba	37,33BCa
B4	31,79 Ba	38,66ABC _a	36,50ABC _a	50,21ABa	45,75BCa	28,20AB _b	27,47BC _b	32,00BCa _b	32,23Bab	46,59ABa
B6	41,57AB _a	54,29 ABa	44,25 ABa	55,45 Aa	63,20 Aa	43,10Ab _c	64,67 Aa	40,49 ABc	56,10Aab	46,52ABb _c
B8	55,71 Aa	57,25 Aa	55,64 Aa	55,05 Aa	50,92ABa	43,12Ab _c	37,20 Bc	54,62 Aab	67,14 Aa	59,20 Aa
Va%	171,97	181,01	96,26	80,63	64,20	110,17	152,75	241,16	147,91	171,97
	MsA (g)					MsR (g)				
B0	5,01 Ba	6,58 Ba	8,30 Ba	7,45 Da	6,88 Ba	5,66 Aa	4,04 Ba	4,11 Ba	3,63 Ca	6,05 Ba
B2	10,81AB _a	9,50 Ba	8,14 Ba	8,90 CDa	10,09 Ba	5,56 Aa	7,87 Ba	6,11 Ba	5,01 Ca	7,07 Ba
B4	8,81 Ba	10,30 ABa	10,50 ABa	14,88BCa	13,86ABa	7,40 Aa	5,11 Ba	7,12 ABa	6,36 BCa	8,85 Ba
B6	9,13 Bc	16,91 Ab	12,94ABb _c	25,79 Aa	18,13 Ab	9,39 Aab	13,62 Aa	8,54 ABb	9,81 Bab	9,56 Bab
B8	16,31 Aa	17,07 Aa	16,19 Aa	16,60 Ba	13,68ABa	7,65 Ab	7,81 Bb	11,26 Aab	14,67 Aa	15,36 Aa
Va%	159,42	95,06	122,82	98,84	35,16	93,32	173,97	304,13	153,88	159,42

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas na linha não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Va%: Variação entre B0 e B8 para cada dosagem de hidrogel.

Tabela 6 - Valores de Massa Seca Total (MsT) e Razão entre Massa Seca da Parte Aérea e Massa Seca da Raíz (MsA/MsR), Área Foliar (AF) e Razão entre altura e diâmetro do coleto (RAD) para as doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L⁻¹ da mistura latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) e biochar de lodo de esgoto (BLE) aos 165 dias após a semeadura (DAS) das sementes de Tamboril no E1.

Doses de BLE	Variável									
	MsT (g)					MsA/MsR (g)				
	Doses de hidrogel (g L ⁻¹ de substrato)									
	H0	H1	H2	H3	H4	H0	H1	H2	H3	H4
B0	10,68 Ba	10,63 Ca	12,43 Ba	11,1 Ca	12,93 Ba	0,99 Ba	1,73 Aa	2,00 Aa	2,08 ABa	1,29 Aa
B2	16,39 ABa	17,38 BCa	14,26 Ba	13,92 Ca	17,17 Ba	2,05 ABa	1,22 Aa	1,35 Aa	1,85 ABa	1,48 Aa
B4	16,22 ABa	15,42 BCa	17,62 ABa	21,25 BCa	22,72 ABa	1,25 ABa	2,21 Aa	1,69 Aa	2,38 Aa	1,60 Aa
B6	18,53 ABc	30,54 Aab	21,49 ABbc	31,28 ABa	27,70 Aabc	1,02 ABb	1,23 Ab	1,59 Ab	3,00 Aa	1,95 Aab
B8	23,97 Aa	24,89 ABa	27,46 Aa	35,61 Aa	29,04 Aa	2,17 Aab	2,36 Aa	1,45 Aabc	1,13 ABbc	0,90 Ac
Va%	134,15	120,92	220,81	124,59	119,19	36,42	37,93	-84,07	-43,33	-134,15
	AF (cm ²)					RAD				
B0	614,98 Ba	644,33 Ba	772,40 Aa	817,61 Ba	821,90 Ba	8,6 Ba	8,8 Ba	10,2 Aa	11,4 Aa	11,1 Aa
B2	1054,73 ABa	975,31 ABa	840,52 Aa	897,51 Ba	1017,71 Ba	10,2 ABa	10,2 ABa	10,2 Aa	10,8 Aa	12,1 Aa
B4	904,83 ABa	1171,37 ABa	1051,58 Aa	1514,54 Ba	1475,47 ABa	12 ABa	12,3 Aa	9,2 Aa	12 Aa	11,7 Aa
B6	1453,19 ABa	1904,38 Aa	1250,42 Aa	2057,03 Aa	2302,56 Aa	12,3 Aa	9,4 Aa	10,6 Aa	10,8 Aa	11,5 Aa
B8	1970,51 Aa	2022,85 Aa	1843,80 Aa	1907,41 Aa	1245,56 ABa	12,6 Aa	12,2 Aa	10 Aa	10,4 Aa	9,4 Aa
Va%	213,95	138,71	133,29	51,55	46,51	38,64	2,00	-9,62	-18,09	-213,95

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas na linha não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Va%: Variação entre B0 e B8 para cada dosagem de hidrogel.

No E1, os maiores valores absolutos de AF foram obtidos com maiores doses de biochar e hidrogel, sendo de 2302,56 cm² no tratamento B6H4 e de 2057,03 cm² no B6H3 (Tabela 6 e Figuras 15 e 16), embora, de maneira geral, B0 foi significativamente menor a B6 e B8 (Figura 15), tal diferença não foi verificada entre as doses de hidrogel.

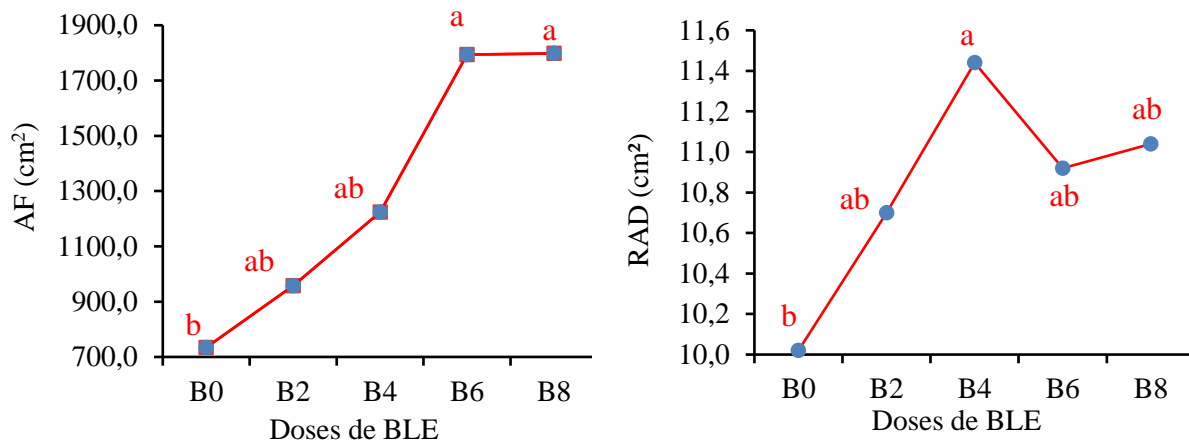


Figura 15 – Valores médios de Área Foliar (AF) e Razão entre altura e Diâmetro do Coletor (RAD) obtidos aos 165 DAS para as doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume no E1. Médias seguidas de letras iguais não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

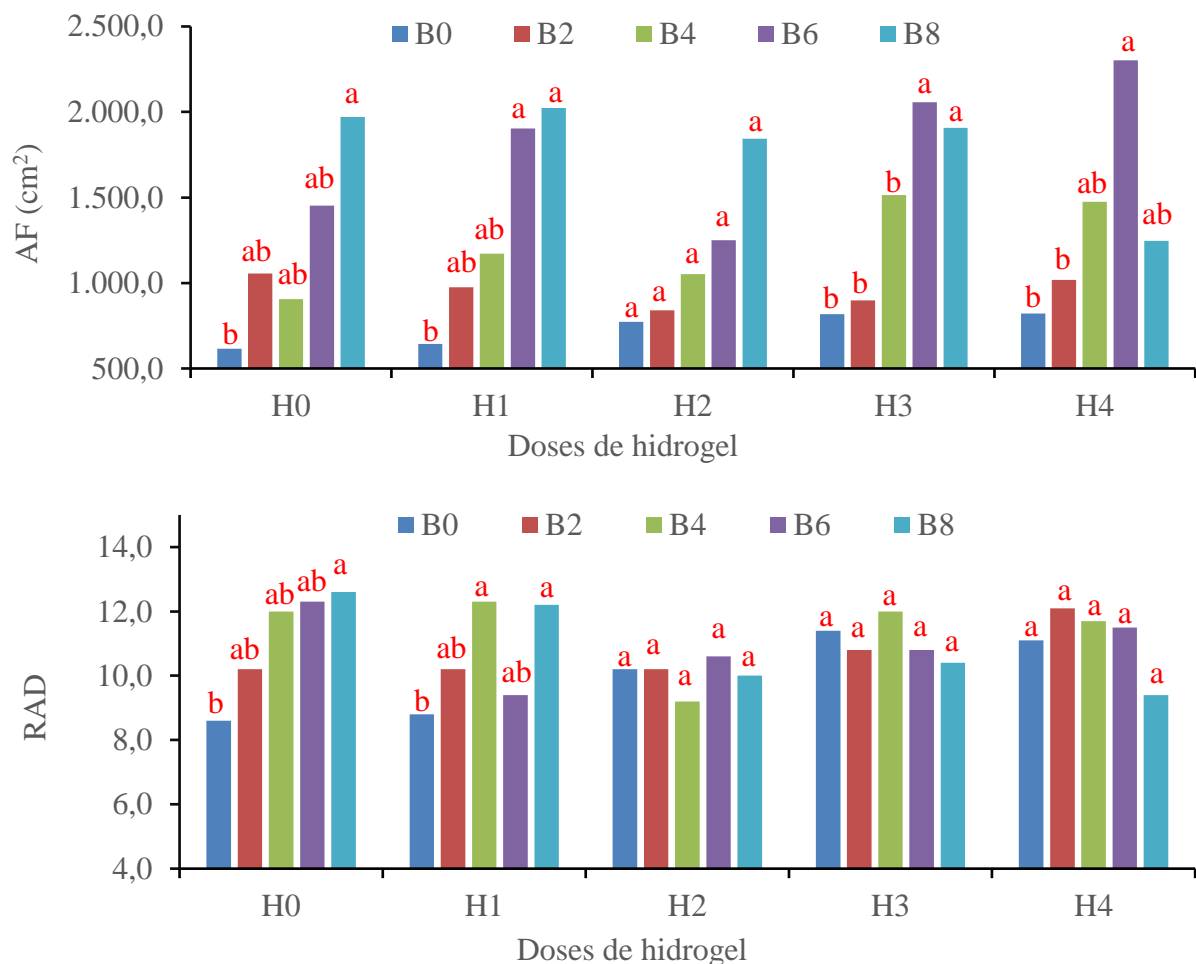


Figura 16 - Valores médios de Área Foliar (AF) e Razão entre altura e diâmetro do coletor (RAD) obtidos aos 165 DAS para as doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume e hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L⁻¹ aos 165 dias após a semeadura (DAS) das sementes de Tamboril no E1. Médias seguidas de letras iguais dentro de cada dose de hidrogel não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

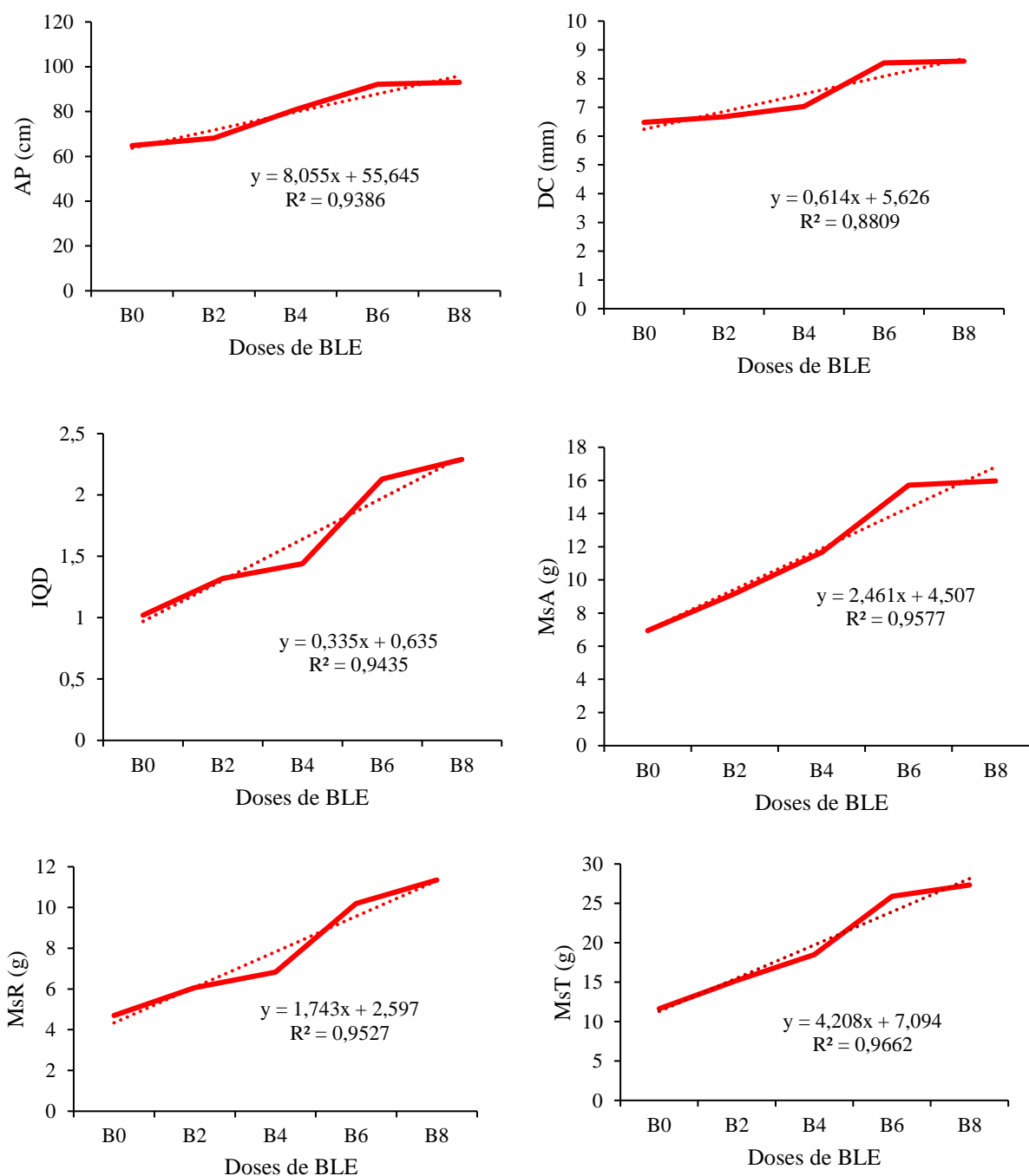


Figura 17 - Valores médios de Altura de Planta (AP), Diâmetro do Coleto (DC), Índice de Qualidade de Dickson (IQD), Massa Seca da Parte Aérea (MsA), Massa Seca da Raíz (MsR) e Massa Seca Total (MsT) obtidos aos 165 DAS para as doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume no E1.

A Razão entre altura e diâmetro do coleto (RAD) respondeu significativamente a incorporação de BLE com maior valor nos tratamentos H0B6 (12,3) e H0B8 (12,6) (Tabela 6 e Figuras 15 e 16). Esse resultado pode ser explicado devido ao fato de que os dois parâmetros que compõem a RAD serem influenciados pela maior quantidade de nutrientes inseridos com

maiores doses de biochar, notadamente nitrogênio e fósforo. A RAD é considerada um importante parâmetro de avaliação de qualidade de mudas florestais, uma vez que indica o acúmulo de reservas químicas, assegura maior resistência e melhor fixação no solo, além de avaliar sua respectiva capacidade de sobrevivência no campo (Peroni et al., 2022).

As maiores doses de BLE, 6 e 8% v/v foram as mais adequadas, pois auxiliaram na disponibilização de nutrientes às plantas interferindo diretamente no seu desenvolvimento, concordando com o relatado por Selvarajoo et al. (2022). Os autores afirmam que o biochar possui grande potencial em aplicações verdes, como energia alternativa, condicionador de solo e sequestro de carbono, sendo que ter biomassa abundantemente disponível no país poderia ser aproveitado para que todo o seu potencial fosse convertido em biocarvão e posteriormente utilizado como aplicações verdes, reduzindo os resíduos que seriam destinados para aterros sanitários e a emissão de gases do efeito de estufa.

Além disso, a aplicação de BLE ao solo aumenta os cátions de caráter básico disponíveis (Mg, Ca e K) e, dada a sua longa persistência, é capaz de manter de forma duradoura o pH em um nível ideal para uma melhor disponibilidade de nutrientes (Hai-Long Lu et al., 2022). Ademais, Hou et al. (2022) afirmam que o BLE pode servir de base para um excelente condicionador de solo e de substrato para o estabelecimento de mudas de espécies florestais devido às suas excelentes propriedades físico-químicas e biológicas, que são principalmente atribuídas ao seu papel no desempenho das plantas, incluindo a influência da absorção de nutrientes.

Os efeitos positivos das maiores doses de BLE nos parâmetros morfológicos de Tamboril observados, também foram relatados por Rezende et al. (2016), em estudo para avaliar o desenvolvimento e a qualidade de mudas clonais de Teca (*Tectona grandis*) cultivadas em substrato com BLE e BLE ativado (BLEA), nas proporções de 25, 50, 75 e 100% do substrato comercial (SC). Segundo os autores, a adição de BLEA na proporção de 25% já é suficiente para melhorar o crescimento das mudas para o mesmo nível, proporcionado pelo já validado substrato de viveiro e que o BLEA adicionado ao SC melhora o desenvolvimento das mudas, tanto para a AP quanto para o DC.

Já Lima et al. (2016) avaliaram o efeito de BLE aplicado com os macronutrientes N e P, para a formação de substratos, no desenvolvimento de mudas de Angico (*Anadenanthera colubrina*) para a restauração florestal, e observaram que a qualidade das plantas, medida pela relação altura/massa seca da parte aérea (H/MsA) e pelo IQD, foi superior, conforme o aumento dos níveis de BLE (acima de 25% v/v) e N (acima de 150 mg dm⁻³). Os autores afirmam que a utilização conjunta de BLE e N apresenta potencial para a produção de mudas de qualidade, o

que favorece o sucesso de práticas de restauração florestal em regiões com baixa fertilidade do solo e sujeitas a períodos de estresse hídrico.

Com relação ao hidrogel, apesar de os efeitos terem sido menos significativos em comparação com o BLE, observa-se que a dose de 3 e 4 g L⁻¹ de substrato possibilitou ganhos positivos no desenvolvimento das mudas de Tamboril pois, ao ser incorporado ao substrato, permite maior retenção de água e de fertilizantes, que podem ser lentamente liberados para as plantas em função dos ciclos de absorção–liberação (Carvalho et al., 2022).

O menor efeito (ou não influência) do hidrogel em alguns parâmetros no presente estudo pode ser explicado devido às condições experimentais, tendo em vista que as lâminas de água aplicadas foram suficientes para deixar as mudas em boas condições de crescimento e desenvolvimento (sem déficit hídrico), independente das doses de hidrogel aplicadas em certos casos.

Apesar disso, a dose de 3 g L⁻¹ corresponde ao observado na literatura com relação à utilização de hidrogel na produção de mudas de espécies florestais. Por exemplo, Faller et al. (2020), em experimento com mudas de Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), observaram a influência positiva do uso de hidrogel nas doses entre 3,0 e 4,0 g L⁻¹, nos parâmetros morfológicos de AP, DC e IQD. Segundo os autores, o maior DC (5,75 mm) estimado para dose de hidrogel de 4,11 g L⁻¹ foi superior àquele medidos em mudas sem hidrogel (5,0 mm) e isso demonstra a eficiência da presença do hidrogel em relação ao DC das mudas de jatobá.

Já Silva et al. (2019b), avaliando o efeito do hidrogel, associado a diferentes frequências de irrigação, no crescimento inicial, alocação de biomassa seca e a qualidade das mudas de Tamboril, constataram que a aplicação do hidrogel de 3 g L⁻¹ deve ser realizada no momento do plantio das mudas, para promover maior crescimento e biomassa seca. Ademais, concluíram que o uso do hidrogel pode mitigar os efeitos decorrentes do estresse hídrico durante a fase de crescimento inicial das plantas, além de melhorar a qualidade morfológica das mudas.

Com relação à dose mais adequada de hidrogel para estabelecimento de mudas de Tamboril, Pontes Filho et al. (2018) encontraram as doses de 2 g L⁻¹ com plantio a pleno sol e 3,5 g L⁻¹ em ambiente sombreado, sendo que essas foram as doses que proporcionaram melhor desenvolvimento inicial das mudas. Vale ressaltar, no entanto, que mesmo tendo sido constatada resposta da espécie às doses de hidrogel, os benefícios do polímero não ficaram evidentes nas condições em que foi realizado o estudo. Isso foi constatado por Da Silva Cadête et al. (2021), em seu trabalho sobre o efeito de doses de hidrogel no desenvolvimento de Tamboril sob diferentes regimes hídricos, onde os autores constataram que a incorporação do hidrogel (0, 1,5 e 3,0 g L⁻¹ de substrato) não influenciou no crescimento, desenvolvimento e

qualidade das mudas. Assim, dadas as presentes condições experimentais, o Tamboril não se mostrou tão responsivo a presença de hidrogel quando comparado com outras espécies vegetais, e isso pode estar relacionado a grande tolerância desta espécie a deficiência hídrica no solo.

5.2 Caracterização química do solo ao final do experimento 1 (E1)

Com relação aos componentes da acidez do solo no E1, a combinação entre o BLE e o hidrogel incorporados ao substrato promoveu aumento significativo na acidez potencial (H + Al), com o maior valor no tratamento B8H1 (4,07 cmolc dm⁻³) e variação de B0 em relação a B8 de 85,00, 67,92, 28,70, 19,63 e 13,48%, respectivamente para H0, H1, H2, H3 e H4, ou seja, com aumento da dose de H houve diminuição da acidez do solo (Tabela 7). Já o pH foi influenciado significativamente apenas pelas doses de BLE, tendo o seu maior valor no tratamento testemunha (B0H0) com 5,76 unidades e o menor valor (5,16) na maior dose, B8H0, ou seja, decréscimo de 10% do pH com a adição do BLE a 8% (Tabela 8 e Figuras 17 e 18).

O aumento na acidez potencial e a diminuição do pH com as maiores doses de biochar, pode estar relacionado às propriedades químicas do biochar e do lodo de esgoto. O lodo de esgoto geralmente contém matéria orgânica ácida e no processo de transformação para biochar parte dessa matéria orgânica pode permanecer no produto final. Ademais, o biochar pode interagir com íons no solo, liberando ou adsorvendo diferentes elementos e afetar a capacidade de troca desses íons, influenciando a disponibilidade de nutrientes. Mudanças nessa capacidade podem afetar o equilíbrio entre cátions e ânions no solo, podendo contribuir para um aumento na acidez.

Zhu, Qing et al. (2023) avaliando os impactos do hidrochar de lodo de esgoto nas propriedades físicas e químicas do solo utilizando as doses de 1, 4 e 8 g kg⁻¹, observaram a redução do pH com o aumento das doses, similarmente ao observado neste experimento. Segundo os autores, a redução do pH com a adição do hidrogel pode ser atribuída a dois fatores: por um lado, o solo estudado ser altamente alcalino e, por outro lado, a adição do hidrochar seria capaz de alterar a composição da matéria orgânica do solo para frações semelhantes ao ácido fúlvico e semelhantes ao ácido húmico, diminuindo o pH. Diferentemente, Chagas et al. (2021) não observaram diferenças significativas no pH do solo e na acidez potencial (H+Al) com a adição de 30 t ha⁻¹ de BLE em comparação com os tratamentos sem o BLE. Na ocasião, os autores estudaram o efeito das doses de BLE na resposta e nutrição do milho e nas propriedades do solo em um experimento de campo por 5 anos.

Os valores de P foram influenciados significativamente pelo BLE e triplicaram com a maior dose em relação à testemunha, com 70 mg dm⁻³ no tratamento B8H0 e 16,7 mg dm⁻³ no

tratamento B0H0 (Tabela 5). Observa-se que o aumento de P de B8 em relação a B0 foram de 270,35, 151,95, 230,81, 188,62 e 19,25%, respectivamente para H0, H1, H2, H3 e H4. Os resultados são semelhantes aos encontrados por Chagas et al. (2021) que observaram aumentos significativos nos valores de P em 6 a 7 vezes em comparação ao controle com a utilização do BLE e aos de Alves et al. (2021) que encontraram aumentos expressivos nos valores de P com a adição de BLE nas proporções de 2,5, 5, 7,5 e 10% em estudo sobre o efeito do lodo de esgoto e do biochar do bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades do solo e na produção de beterraba sacarina.

O parâmetro Matéria Orgânica (MO) respondeu positivamente às baixas doses de hidrogel, com maior valor obtido na dose de 1 g L⁻¹ (B0H1), com o valor de 41,67 g kg⁻¹, e respondeu negativamente às doses de BLE, com valores mais baixos com o aumento de BLE no substrato (Tabela 7). A resposta negativa da matéria orgânica com o aumento do biochar pode ser explicada devido à estrutura estável e resistente à decomposição microbiana do biochar, assim, quando adicionado ao solo, o BLE pode retardar a decomposição de outras formas de MO presentes no solo. Ademais, por possuir uma alta capacidade de adsorção, o BLE pode reter compostos orgânicos no solo, incluindo substâncias que normalmente seriam decompostas por microrganismos presentes na biota do solo. Finalmente, o BLE também pode alterar as propriedades físicas do solo, como a porosidade e a retenção de água e essas mudanças podem influenciar a atividade microbiana e a decomposição da matéria orgânica.

Heydari et al. (2023) observaram efeito prejudicial do BLE na fotossíntese e em características morfológicas de Carvalho (*Quercus Brantii Lindl.*) em concentrações mais altas. Segundo os autores, poucos estudos relatam um efeito geral negativo do BLE na produção ou crescimento de biomassa, no entanto, tal efeito pode ser explicado por mecanismos como a imobilização de nitrogênio pelo BLE. É esperado que este fenômeno dure um tempo relativamente curto até que o componente instável do BLE se decomponha.

A Saturação de Bases (V%) foi maior quando não foram incorporados o BLE e o hidrogel no substrato, com o valor de 74,33% no tratamento B0H0, e houve diminuição significativa dos valores com a incorporação de maiores doses de BLE, sendo de 19,25, 20,12, 5,71, 6,03 e 319,92%, respectivamente para H0, H1, H2, H3 e H4, portanto, as menores variações ocorreram nas maiores doses de H (3 e 4 g L⁻¹). Para o hidrogel, observou-se aumento significativo com maiores doses apenas no tratamento B8H3, com 70% de Saturação de Bases, no entanto, o valor ainda é menor comparado com o tratamento testemunha (B0H0) (Tabela 7). Tais resultados podem ser explicados devido à aplicação de calcário para correção da acidez do solo previamente ao início do experimento.

Tabela 7 - Valores de acidez do solo (H + Al), Matéria Orgânica, Saturação de Bases e P do solo para as doses biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L⁻¹ da mistura latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) e BLE aos 165 dias após a semeadura (DAS) das sementes de Tamboril no E1.

Doses de BLE	Variável									
	H + Al (cmol _c dm ⁻³)					Matéria Orgânica (MO) (g kg ⁻¹)				
	Doses de hidrogel (g L ⁻¹ de substrato)									
	H0	H1	H2	H3	H4	H0	H1	H2	H3	H4
B0	2,20 Ba	2,20 Da	2,40 Ca	2,23 Ba	2,70 Ba	33,67 Ab	41,67 Aa	39,00 Aab	40,33 Aab	35,00 ABab
B2	2,47 Ba	2,70 CDa	2,97 BCa	2,93 ABa	3,10 Ba	33,67 Aab	32,33 Bab	36,33 ABab	39,00 Ba	29,67 ABb
B4	3,53 Aa	3,07 BCa	3,33 ABa	3,43 Aa	3,30 ABa	36,33 Aa	32,33 Ba	32,33 ABa	37,67 ABa	36,33 Aa
B6	3,53 Aa	3,47 ABa	3,63 ABa	3,47 Aa	3,93 Aa	36,33 Aa	35,00 ABab	29,67 Bab	28,33 Ca	28,33 Ba
B8	3,93 Aab	4,07 Aa	4,03 Aa	2,87 ABc	3,23 ABbc	29,67 Aa	33,67 Ba	29,67 Ba	32,33 BCa	32,33 ABa
Va%	85,00	67,92	28,70	19,63	13,48	-23,76	-31,45	-24,74	-8,26	-85,00
	Saturação por Bases (V%)					P (mg dm ⁻³)				
B0	74,33 Aa	74,33 Aa	73,67 Aa	74,00 Aa	70,33 Aa	16,67 Ca	14,67 Ca	16,67 Ba	17,33 Ca	17,67 Ca
B2	73,00 Aa	70,67 ABa	69,33 ABa	70,67 ABa	71,00 Aa	18,67 BCa	30,00 BCa	25,00 ABa	23,67 BCa	24,00 BCa
B4	64,67 Ba	65,33 BCa	64,67 BCa	64,67 Ca	67,33 ABa	29,00 BCa	42,33 ABa	36,00 ABa	30,00 BCa	27,33 BCa
B6	66,00 Ba	64,00 Ca	64,00 BCa	66,00 BCa	64,00 Ba	39,67 Ba	38,67 ABa	46,00 Aa	40,67 ABa	44,67 ABa
B8	63,00 Bb	62,33 Cb	61,33 Cb	70,00 ABCa	66,33 ABab	70,00 Aa	54,33 Aab	42,00 Ab	57,33 Aab	51,00 Aab
Va%	-19,25	-20,12	-5,71	-6,03	-319,92	270,35	151,95	230,81	188,62	19,25

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas na linha não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Va%: Variação entre B0 e B8 para cada dosagem de hidrogel.

O maior valor de Ca foi obtido no tratamento B2H4, com 5,53 cmol_c dm⁻³ e o menor valor com o tratamento B0H3. De maneira geral, o Ca foi influenciado positivamente pelas doses de BLE e sem efeitos significativos pelas doses de hidrogel (Tabela 8 e Figuras 18 e 19). Já os valores de Mg não foram alterados pela utilização do BLE ou hidrogel permanecendo com seus valores médios de 1,40 a 1,63 cmol_c dm⁻³ (Tabela 8 e Figura 18). Chagas et al. (2021) não observaram diferenças significativas nos teores de Ca e Mg com a aplicação de BLE e ressaltaram que a manutenção dos níveis de Ca e Mg ao longo do tempo provavelmente foi influenciada pela calagem realizada para correção da acidez do solo. No presente estudo, apenas o Ca sofreu alterações significativas e o Mg permaneceu com os mesmos teores.

O K foi influenciado significativamente tanto pelas doses de BLE quanto pelas doses de hidrogel, no entanto, o efeito foi positivo com maiores doses de hidrogel e negativo com maiores incorporações de BLE. O maior valor, 215,33 mg dm⁻³ foi obtido no tratamento B0H4 (Tabela 8). Tal efeito foi observado por Heydari et al. (2023), em estudo com mudas Carvalho

(*Quercus Brantii* Lindl.). Os autores afirmam que existe um valor limite para a aplicação de BLE além do qual o desempenho das mudas é prejudicado.

Maiores doses de BLE e hidrogel promoveram maiores valores de CTC sendo que o maior valor foi obtido no tratamento B6H4 com 10,94 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ (Tabela 8). Tais resultados podem ser explicados pelos efeitos benéficos, especialmente do BLE, no solo. Singh et al. (2023), em uma revisão sobre compostos de BLE para aplicações de remediação de solo, afirmam que a utilização desses compostos aumenta o nitrogênio disponível, a abundância de microrganismos, a retenção de água, a condutividade elétrica do solo, a capacidade de troca catiônica (CTC) e a redução na densidade aparente do solo.

Tabela 8 - Valores de pH, Ca, CTC, K e Mg do solo para as doses biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L^{-1} da mistura latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovina (EB) e BLE aos 165 dias após a semeadura (DAS) das sementes de tamboril no E1.

Doses de BLE	Variável									
	pH (CaCl_2)					Ca ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)				
	Doses de hidrogel (g L^{-1} de substrato)									
	H0	H1	H2	H3	H4	H0	H1	H2	H3	H4
B0	5,76 A	5,76 A	5,67 A	5,67 A	5,63 A	4,83 Aa	4,77 ABa	4,87 Aa	4,23 Ba	4,40 Ba
B2	5,60 AB	5,50 B	5,43 B	5,60 A	5,60 AB	4,83 Aa	4,90 ABa	4,90 Aa	5,30 Aa	5,53 Aa
B4	5,43 B	5,30 C	5,40 B	5,30 B	5,43 BC	4,63 Aa	4,10 Ba	4,37 Aa	4,70 ABa	4,77 ABa
B6	5,43 B	5,30 C	5,33 BC	5,30 B	5,27 C	4,80 Aa	4,57 ABa	4,83 Aa	5,17 Aa	5,17 ABa
B8	5,16 C	5,17 C	5,20 C	5,30 B	5,30 C	5,10 Aa	4,97 Aa	4,57 Aa	5,00 ABa	4,63 Ba
Va%	-11,63	-11,41	-9,04	-6,98	-6,23	5,59	4,19	-6,56	18,20	5,23
	CTC ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)					K (mg dm^{-3})				
B0	8,64 Ca	8,68 Ba	9,11 Ba	8,50 Ba	9,18 Ca	82,00 ABc	94,67 Abc	161,33 Aab	196,67 Aa	215,33 Aa
B2	9,08 BCb	9,25 Bb	9,59 ABb	10,11 Aab	10,80 ABa	85,33 ABc	72,67 Ac	88,67 ABbc	159,33 ABab	209,33 Aa
B4	10,04 ABa	8,80 Bb	9,42 ABab	9,77 Aab	10,03 ABCa	108,67 ABab	54,67 Ab	72,67 Bab	52,00 Cb	143,33 ABa
B6	10,32 Aab	9,64 ABb	10,06 ABab	10,22 Aab	10,94 Aa	153,33 Aa	79,33 Ab	78,67 Bb	87,33 BCab	94,67 Bab
B8	10,63 Aab	10,78 Aa	10,35 Aab	9,52 ABb	9,64 BCab	64,00 Ba	95,33 Aa	96,67 ABa	72,00 Ca	106,67 Ba
Va%	24,19	13,61	12,00	5,01	24,19	-28,13	0,70	-66,89	-173,15	-101,87
	Mg ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$)									
B0	1,40 Aa	1,47 Aa	1,43 Aa	1,53 Aa	1,53 Aa					
B2	1,57 Aa	1,47 Aa	1,50 Aa	1,47 Aa	1,63 Aa					
B4	1,60 Aa	1,50 Aa	1,53 Aa	1,50 Aa	1,60 A					
B6	1,60 Aa	1,40 Aa	1,40 Aa	1,37 Aa	1,60 Aa					
B8	1,43 Aa	1,50 Aa	1,50 Aa	1,47 Aa	1,50 Aa					
Va%	2,04	4,90	4,08	2,00	2,04					

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas na linha não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Va%: Variação entre B0 e B8 para cada dosagem de hidrogel.

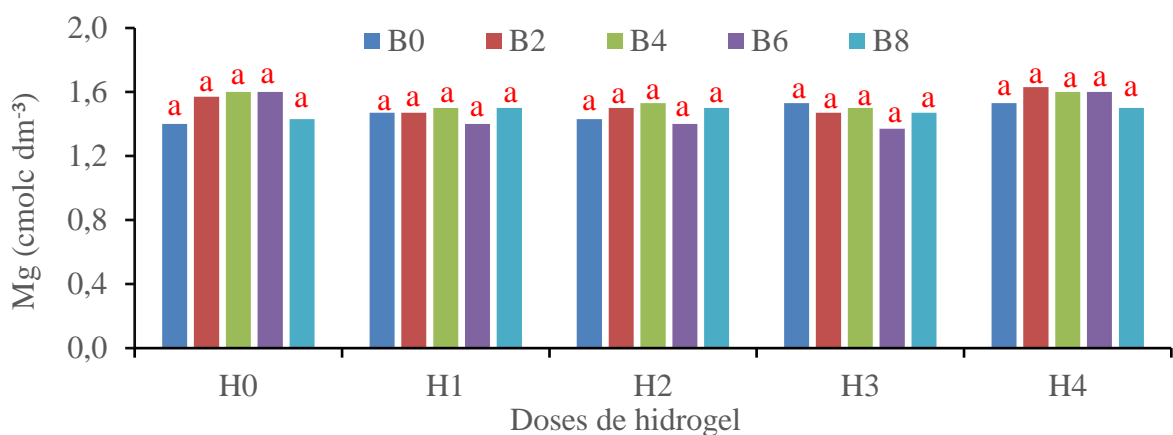
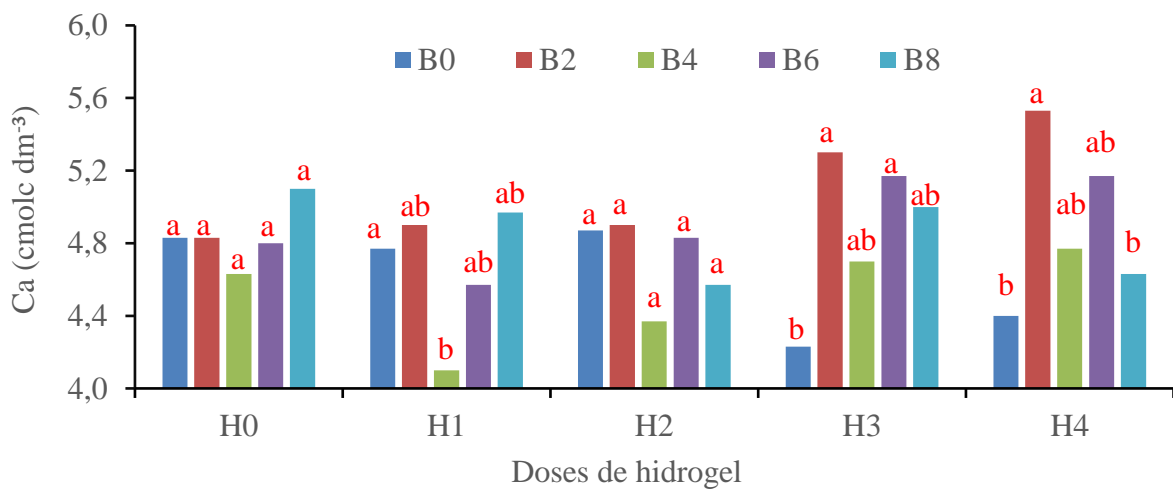
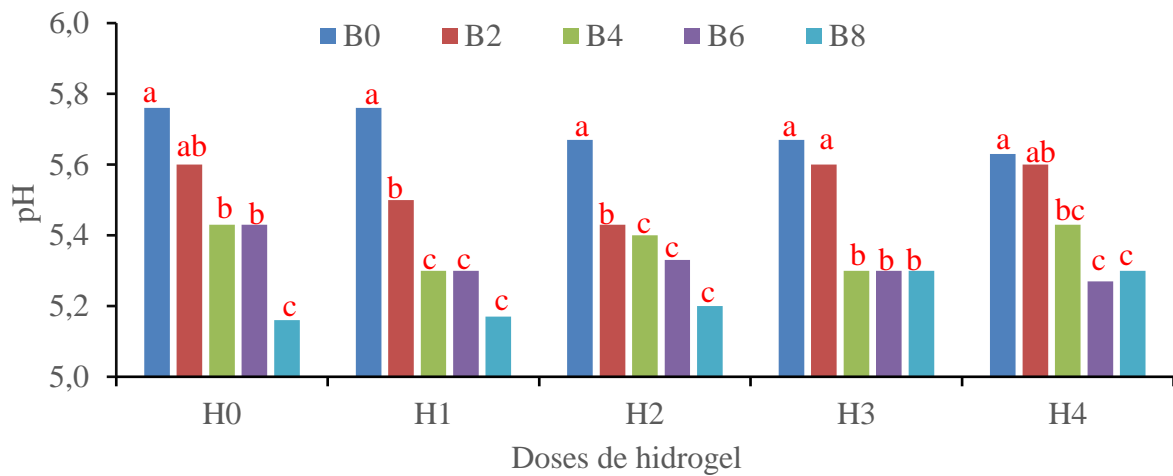


Figura 18 - Valores médios de pH, Ca e Mg obtidos aos 165 DAS para as doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume e hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L⁻¹ aos 165 dias após a semeadura (DAS) das sementes de Tamboril no E1. Médias seguidas de letras iguais não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

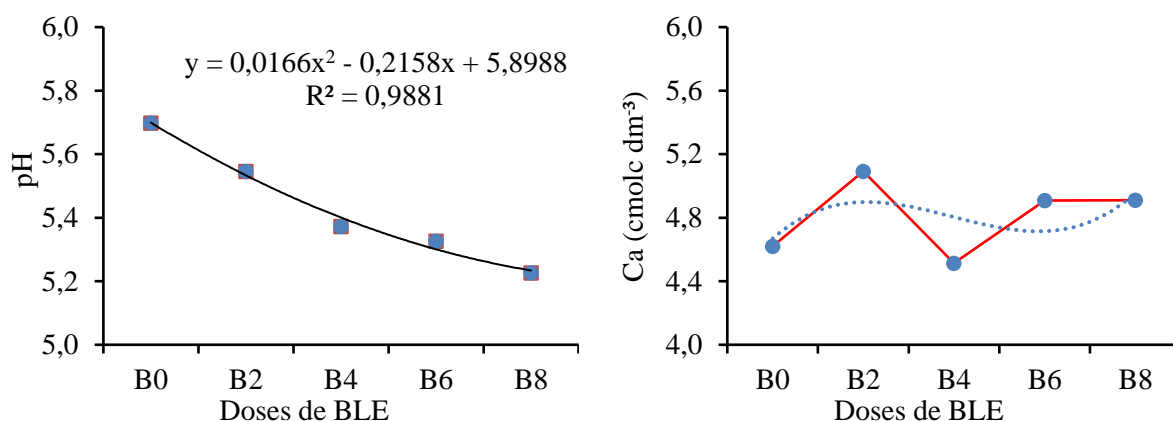


Figura 19 - Valores médios de pH e Ca obtidos aos 165 DAS para as doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 (B6) e 8% (B8) base volume no E1.

De acordo com a categorização apresentada por Jacques-Callegari (2007) que define: $r = 0$, nula; 0 a 0,30, fraca; 0,3 a 0,6 moderada; 0,6 a 0,9, forte; 0,9 a 1, muito forte e 1, perfeita, o pH apresentou correlação de Pearson (r) positiva de 0,59 (moderada) e 0,91 (muito forte), e 0,54 (moderada) em relação a MO, V e K, respectivamente, a acidez potencial apresentou correlação de 0,85 com a CTC (forte), o Ca apresentou correlação de 0,61 em relação a CTC, a CTC de 0,56 de correlação moderada com P, MO apresentou correlação de 0,53 em relação a V. A V apresentou correlação moderada (0,42) em relação ao K. As demais correlações de Pearson's foram nulas e fracas, mas, na sua maioria, negativas, a exemplo da H+Al que foi de -0,96 em relação a V (Tabela 9).

No que se refere a correlação dos valores médios da eficiência, observa-se que foi baixa ou zero em praticamente todas as correlações, destacando-se 0,96 de Ca em relação ao pH e de 0,47, 0,63, 0,54 e 0,78 do Mg em correlação com o pH, H+Al, Ca e CTC, respectivamente, 0,65 da MO em correlação com Mg, de 0,70 e 0,60 da V em correlação com Ca e Mg, já o P apresentou correlação dos valores médios da eficiência de 0,53 em correlação ao Ca, e, por fim, o K de 0,67 e 0,94 em relação ao Ca e CTA, respectivamente (Tabela 9).

Tabela 9 – Correlação de Pearson's dos valores de Valores de pH, H + Al, Ca, Mg e CTC, MO, V, P e K solo para as doses biochar de lodo de esgoto (BLE) de 0 (B0), 2 (B2), 4 (B4), 6 e 8% (B8) base volume e hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L⁻¹ da mistura latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) e BLE aos 165 dias após a semeadura (DAS) das sementes de Tamboril no E1

Atributos	Correlação dos valores médios da eficiência								
	pH	H+Al	Ca	CTC	Mg	MO	V	P	K
pH	1,00	0,00	0,95	0,00	0,47	0,00	0,00	0,00	0,01
H+Al	-0,88	1,00	0,42	0,00	0,63	0,00	0,00	0,00	0,15
Ca	-0,01	0,17	1,00	0,00	0,54	0,17	0,70	0,53	0,67
CTC	-0,62	0,85	0,61	1,00	0,78	0,01	0,00	0,00	0,94
Mg	-0,15	-0,10	0,13	-0,06	1,00	0,65	0,60	0,11	0,44
MO	0,59	-0,57	-0,28	-0,53	-0,09	1,00	0,01	0,00	0,11
V	0,91	-0,96	0,08	-0,67	0,11	0,53	1,00	0,00	0,03
P	-0,89	0,75	0,13	0,56	0,33	-0,62	-0,75	1,00	0,01
K	0,54	-0,30	0,09	0,02	-0,16	0,33	0,42	-0,49	1,00

Correlação dos valores médios dos atributos									
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--

5.3 Atributos morfológicos do Tamboril no experimento 2 (E2): doses de hidrogel (H) versus lâminas de irrigação (Li)

Nas condições do Experimento 2, observou-se que, de modo geral, maiores lâminas de água, especialmente 0,8 da CC e 1,00 da CC, foram as que promoveram melhorias significativas nos atributos morfológicos do Tamboril, com forte efeito positivo. Com relação ao hidrogel, observou-se pouco efeito ou quase nulo mesmo com aumento das doses.

Os valores de AP e DC responderam significativamente às maiores lâminas de água, especialmente nos tratamentos de 0,8 e 1,0 da CC. O maior valor de AP foi 85,7 cm no tratamento 1,0 da CC com H2 e o DC foi de 7,88 mm no tratamento 0,8 da CC com H3 (Tabela 10 e Figuras 20 e 21). A Relação entre Altura e Diâmetro (RAD) apresentou melhor resposta com a maior lâmina de irrigação e sem o hidrogel (tratamento 1,00 da CC H0) com 14,11 (Tabela 10 e Figura 20). Com relação à AP, o maior valor, de 85,7 cm com a maior lâmina de água, foi duas vezes superior ao tratamento com a menor lâmina de água com 40,7 cm em 0,2 CC.

O maior valor de DC foi de 7,88 mm com 0,8 CC, e o menor de 4,44 mm com 0,2 CC, evidenciando a importância da manutenção adequada de água para o desenvolvimento das mudas, sendo os aumentos de DC de 20,17, 23,58, 53,56, 57,66 e 40,84%, respectivamente, para H0, H1, H2, H3 e H4, portanto, as doses de 2, 3 e 4 g L⁻¹ de H apresentaram maior variação do DC entre B0 e B8.

Maiores valores de AP e DC com as maiores lâminas de água são resultado da maior disponibilidade hídrica para as mudas, favorecendo a absorção de água e nutrientes, essenciais para o seu crescimento e desenvolvimento. Além disso, maiores lâminas favorecem o crescimento radicular e o desenvolvimento do sistema vascular, contribuindo para uma maior robustez das mudas e facilitando o transporte eficiente de água e nutrientes.

Os resultados no presente estudo sobre AP e DC são semelhantes aos encontrados por Da Silva et al. (2019), em estudo sobre a influência das lâminas de irrigação e o consumo hídrico no crescimento inicial de cinco espécies florestais, onde observaram que as lâminas com 150% da ETo proporcionaram os melhores resultados e as inferiores a 100% da ETo afetaram o crescimento inicial de todas as espécies.

Já Nascimento et al. (2021b), em estudo sobre lâminas de irrigação e hidrogel nas taxas de crescimento e produção de tomateiro, observaram que a redução das lâminas de irrigação levou a redução linear da altura e diâmetro, da massa média dos frutos e da produtividade por planta. Ainda, segundo os autores, o uso de hidrogel não afetou nenhuma das características avaliadas, não recomendando a sua utilização nas condições do estudo. Para obtenção de melhores resultados, os autores indicam a utilização da lâmina de reposição de 100% da ETc.

Ao contrário, Carvalho et al. (2022), em estudo sobre o crescimento inicial de mudas de *Sapindus saponária* com uso de hidrogel e lâminas de água, observaram que as mudas apresentaram melhor desenvolvimento quando submetidas a presença do hidrogel, mostrando significância para todas as variáveis analisadas. Em contrapartida, as diferentes lâminas de água, não apresentaram resultados promissores, se destacando significativamente apenas para a variável número de folhas.

O maior valor de AF foi obtido com a maior lâmina de água (1,00 CC) e com a dose intermediária de hidrogel (2 g L^{-1}), com $2382,3 \text{ cm}^2$, sendo este valor três vezes maior do que o tratamento com a menor lâmina de água (0,2 CC) com $660,6 \text{ cm}^2$, diferindo estatisticamente dos demais (Tabela 10). O segundo maior valor foi obtido no tratamento com 0,80 CC em H3, com $1981,5 \text{ cm}^2$. A variação percentual entre as lâminas de irrigação de 0,2 a 1,0 da CC foram de 100,22, 260,63, 148,70, 79,34 e 38,89%, respectivamente para H0, H1, H2, H3 e H4 (Tabela 10). Os resultados são convergentes aos obtidos por Tatagiba et al. (2016), avaliando o crescimento de clones de eucalipto em diferentes condições microclimáticas e lâminas de água no substrato, onde identificaram maiores valores de área foliar nos tratamentos com 100% de água disponível (AD) em comparação com aqueles com 50% de AD.

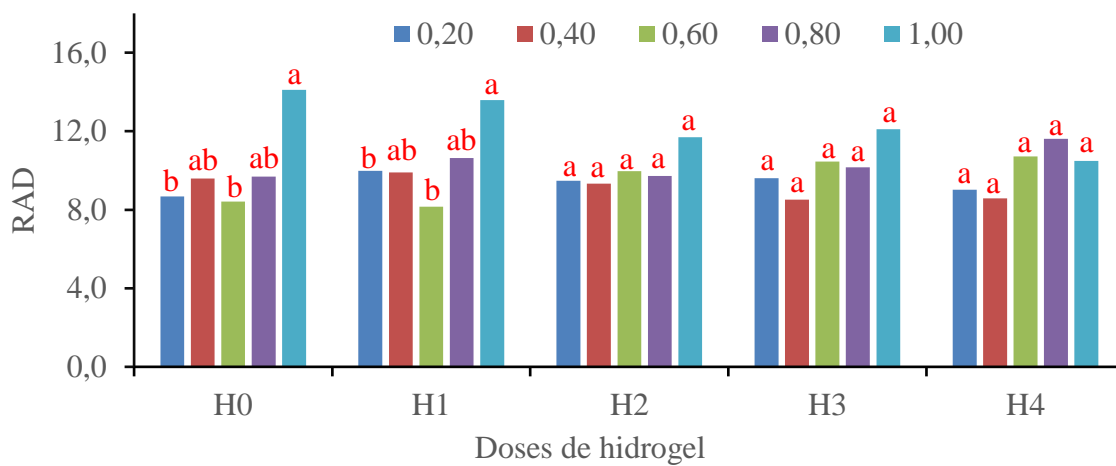
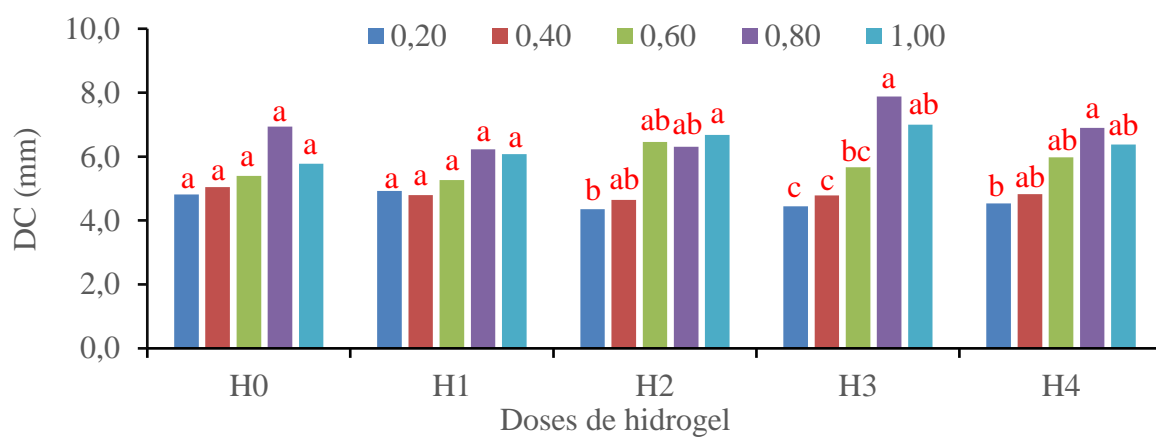
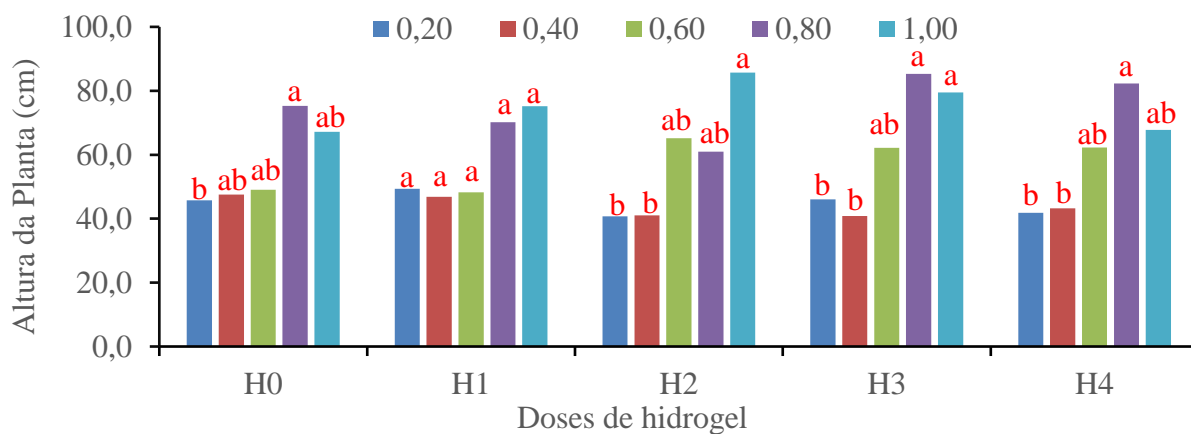
Os maiores valores absolutos de IQD foram obtidos com as maiores lâminas de água (0,8 CC e 1,00 CC), com 3,65 no tratamento 0,80 CC com H2 e 3,56 no tratamento 1,00 CC com

H3. Os valores são significativamente maiores do que aqueles com as menores lâminas (abaixo de 0,6 CC) (Tabela 10 e Figuras 20 e 21). Os resultados são semelhantes aos encontrados por Navroski et al. (2015), que observaram que maiores lâminas de irrigação (a partir de 8 mm dia⁻¹) e doses de hidrogel a partir de 3 g L⁻¹, promoveram os maiores valores de IQD em mudas de eucalipto. A variação percentual entre lâminas de irrigação de 0,2 a 1,0 da CC foram de 55,83, 102,27, 132,68, 111,11 e 100,22%, respectivamente para H0, H1, H2, H3 e H4, onde observa-se variações acima de 100%, com exceção a dose de H de 0 g L⁻¹ que foi praticamente a metade, ou seja, 55,83%.

Tabela 10 – Valores de Altura de Planta (cm), Diâmetro do Coleto (DC), Razão entre altura e diâmetro do coleto (RAD) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) para as lâminas de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC) e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L⁻¹ da mistura de latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) na dose de ¼ base volume e biochar de lodo de esgoto (BLE) com 6% base volume no experimento E2.

% da CC	Variável									
	AP (cm)					DC (mm)				
	Doses de hidrogel (g L ⁻¹ de substrato)									
	H0	H1	H2	H3	H4	H0	H1	H2	H3	H4
0,2	45,7 Ba	49,3 Aa	40,7 Ba	46,0 Ba	41,8 Ba	4,81 Aa	4,92 Aa	4,35 Ba	4,44 Ca	4,53 Ba
0,4	47,5 ABa	46,8 Aa	41,0 Ba	40,8 Ba	43,2 Ba	5,04 Aa	4,79 Aa	4,64 ABa	4,78 Ca	4,82 ABa
0,6	49,0 ABa	48,2 Aa	65,2 ABa	62,2 ABa	62,3 ABa	5,40 Aa	5,27 Aa	6,46 ABa	5,67 BCa	5,98 ABa
0,8	75,3 Aa	70,2 Aa	61,0 ABa	85,3 Aa	82,3 Aa	6,94 Aa	6,23 Aa	6,31 ABa	7,88 Aa	6,90 Aa
1,0	67,2 ABa	75,2 Aa	85,7 Aa	79,5 Aa	67,8 ABa	5,78 Aa	6,08 Aa	6,68 Aa	7,0 ABa	6,38 ABa
Va%	47,05	52,54	110,57	72,83	62,20	20,17	23,58	53,56	57,66	40,84
	RAD					IQD				
0,2	8,67 Ba	9,98 ABa	9,48 Aa	9,60 Aa	9,02 Aa	1,98 Aa	2,06 Aa	1,76 Ba	1,53 Ba	1,53 Aa
0,4	9,59 ABa	9,90 ABa	9,33 Aa	8,52 Aa	8,58 Aa	2,14 Aa	1,72 Aa	2,08 ABa	1,68 Ba	1,96 Aa
0,6	8,42 Ba	8,15 Ba	9,96 Aa	10,45 Aa	10,72 Aa	2,26 Aa	1,63 Aa	2,69 ABa	2,39 ABa	2,41 Aa
0,8	9,69 ABa	10,64 ABa	9,72 Aa	10,16 Aa	11,61 Aa	2,90 Aa	2,76 Aa	3,65 Aa	3,56 Aa	3,23 Aa
1,0	14,11 Aa	13,59 Aa	11,70 Aa	12,10 Aa	10,48 Aa	2,75 Aa	3,21 Aa	3,56 Aa	3,56 Aa	3,23 Aa
Va%	36,17	23,42	26,04	16,19	59,20	55,83	102,27	132,68	111,11	100,22
	AF									
0,2	625,8 Aa	694,8 Aa	660,6 Ba	611,7 Ba	591,0 Aa					
0,4	741,0 Aa	672,6 Aa	667,8 Ba	595,2 Ba	645,6 Aa					
0,6	679,8 Aa	560,0 Aa	1019,5 Ba	820,2 Ba	766,15 Aa					
0,8	1161,4 Aa	988,2 Aa	1150,0 Ba	1981,5 Aa	1329,6 Aa					
1,0	971,1 Ab	1391,1 Aab	2382,3 Aa	1521,3 ABab	1059,9 Ab					
Va%	100,22	260,63	148,70	79,34	38,89					

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas na linha não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Va%: Variação entre B0 e B8 para cada dosagem de hidrogel.



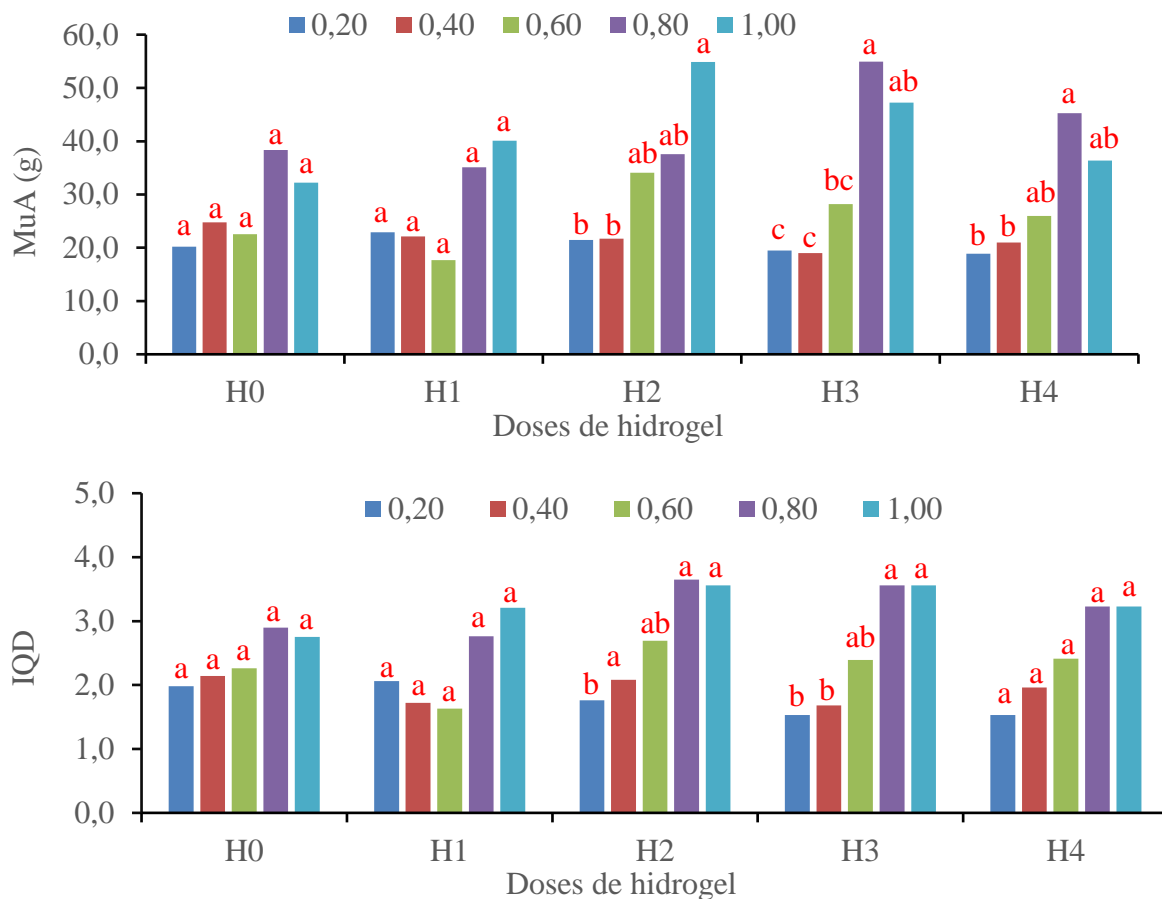


Figura 20 - Valores médios de Altura de Planta (AP), Diâmetro de Coleto (DC), Razão entre altura e diâmetro (RAD), Massa úmida da parte aérea (MuA) para as lâminas de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC) e de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g de hidrogel por L⁻¹ da mistura de latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) na dose de ¼ base volume e biochar de lodo de esgoto (BLE) com 6% base volume, no experimento E2. Médias seguidas de letras iguais não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey entre as lâminas de irrigação dentro de cada dose de hidrogel.

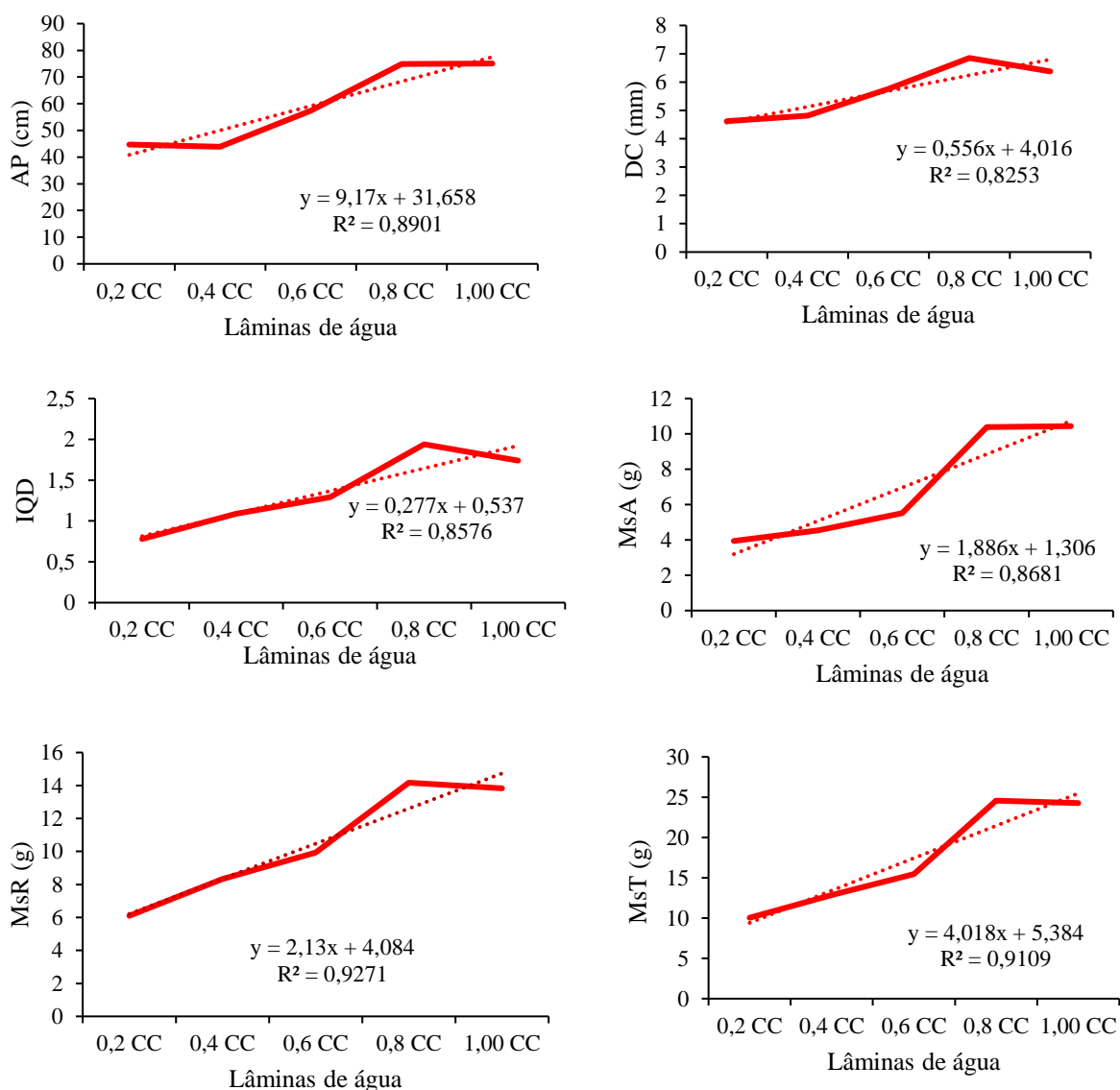


Figura 21 - Valores médios de de Altura de Planta (AP), Diâmetro do Coleto (DC), Índice de Qualidade de Dickson (IQD), Massa Seca da Parte Aérea (MsA), Massa Seca da Raíz (MsR) e Massa Seca Total (MsT) para as lâminas de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC).

Os valores de μ_A , μ_R , M_sA , M_sR e M_sT no E2 aumentaram significativamente com as maiores lâminas de irrigação (0,8 e 1,00 CC). Os maiores valores com os respectivos tratamentos foram para $\mu_A = 54,95$ g (0,8 da CC com H3); $\mu_R = 72,86$ g (1,00 da CC com H3); $M_sA = 14,33$ g (1,00 da CC com H2); $M_sR = 16,74$ g (1,00 da CC com H2); e $M_sT = 31,07$ g (1,00 da CC com H2) (Tabela 10 e Figuras 20 e 21). Na μ_R , por exemplo, as variações lâminas de irrigação de 0,2 a 1,0 da CC foram de 109,21, 98,15, 143,28, 225,27 e 131,80%, respectivamente para H0, H1, H2, H3 e H4, apesar das variações em percentuais serem altas,

houve diferença significativa apenas de 0,2 e 0,4 da CC em relação a 0,8 e 1,0 da CC na dose de hidrogel de 3 g L⁻¹ (Tabela 11).

Esta resposta do Tamboril para MuR está de acordo com Da Silva et al. (2019) que observaram aumento positivo e linear na matéria fresca e seca da folha, do caule e da raiz de cinco espécies florestais com a utilização de maiores lâminas de irrigação, especialmente 150% da ETC.

Tabela 11 - Valores de Massa úmida da raiz (MuR), Massa seca da parte aérea (MsA), Massa seca da raiz (MsR), Massa seca total (MsT) e Massa úmida da parte aérea (MuA) para as lâminas de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC) e de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g de hidrogel por L⁻¹ da mistura de latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) na dose de ¼ base volume e biochar de lodo de esgoto (BLE) com 6% base volume no experimento E2.

% da CC	Variável									
	MuR (g)					MsA (g)				
	Doses de hidrogel (g L ⁻¹ de substrato)									
	H0	H1	H2	H3	H4	H0	H1	H2	H3	H4
0,2	21,71 Aa	24,38 Aa	27,91 Aa	22,4 Ca	22,64 Aa	3,71 Aa	4,79 Aa	4,28 Ba	3,46 Ca	3,45 Ba
0,4	35,57 Aa	28,31 Aa	31,21 Aa	26,89 BCa	23,50 Aa	5,42 Aa	4,66 Aa	4,47 Ba	3,79 Ca	4,3 ABa
0,6	39,86 Aa	26,82 Aa	42,08 Aa	40,25 ABCa	49,25 Aa	4,58 Aa	2,88 Aa	8,33 ABa	5,93 BCa	5,87 ABa
0,8	41,26 Aa	42,74 Aa	50,89 Aa	67,18 ABa	55,92 Aa	9,13 Aa	8,07 Aa	9,88 ABa	13,83 Aa	11,05 Aa
1,0	45,42 Aa	48,31 Aa	67,9 Aa	72,86 Aa	52,48 Aa	7,16 Ab	9,66 Aab	14,33 Aa	11,66 ABab	9,42 ABab
Va%	109,21	98,15	143,28	225,27	131,80	92,99	101,67	234,81	236,99	173,04
	MsR (g)					MuA (g)				
0,2	4,97 Aa	6,33 Aa	8,14 Aa	5,41 Aa	5,67 Aa	20,22 Aa	22,91 Aa	21,44 Ba	19,50 Ca	18,88 Ba
0,4	9,59 Aa	7,5 Aa	10,70 Aa	7,53 Aa	6,30 Aa	24,74 Aa	22,14 Aa	21,73 Ba	18,99 Ca	20,96 Ba
0,6	9,38 Aa	5,81 Aa	13,8 Aa	9,0 Aa	11,72 Aa	22,54 Aa	17,7 Aa	34,07 ABa	28,19 BCa	25,98 ABa
0,8	16,90 Aa	9,78 Aa	12,91 Aa	16,06 Aa	15,23 Aa	38,36 Aa	35,12 Aa	37,59 ABa	54,95 Aa	45,26 Aa
1,0	9,91 Aa	12,58 Aa	16,74 Aa	15,86 Aa	14,06 Aa	32,19 Aa	40,09 Aa	54,86 Aa	47,23 ABa	36,39 ABa
Va%	98,74	105,65	193,16	147,97	96,66	74,99	155,88	142,21	92,74	36,17
	MsT (g)									
0,2	8,68 Aa	11,12 Aa	12,42 Aa	8,87 Ba	9,12 Aa					
0,4	15,01 Aa	12,16 Aa	15,17 Aa	11,32 ABa	10,60 Aa					
0,6	13,96 Aa	8,69 Aa	22,12 Aa	14,93 ABa	17,59 Aa					
0,8	23,04 Aa	17,85 Aa	22,78 Aa	29,89 Aa	26,27 Aa					
1,0	17,07 Aa	22,23 Aa	31,07 Aa	27,52 ABa	23,48 Aa					
Va%	99,91	150,16	210,26	157,46	98,74					

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas na linha não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Va%: Variação entre B0 e B8 para cada dosagem de hidrogel.

Também são corroborados por Navroski et al. (2015), em estudo sobre a utilização do hidrogel e lâminas de irrigação no crescimento inicial de mudas de eucalipto, que notaram

aumento nos parâmetros massa seca da parte aérea (MsA), massa seca radicular (MsR), massa seca total (MsT) e Índice de Qualidade de Dickson (IQD) com maiores lâminas de água e maiores doses de hidrogel. Os autores concluíram que, sem hidrogel, o maior desenvolvimento das mudas foi obtido com maiores lâminas de irrigação (16 e 20 mm dia⁻¹), sendo que o maior crescimento das mudas foi obtido com 3 g L⁻¹ de hidrogel e redução da irrigação (12 mm dia⁻¹). Ainda afirmam que com a utilização do hidrogel há possibilidade de reduzir as lâminas de irrigação e, conseqüentemente do uso da água, aumentando a qualidade das mudas, sendo tal efeito observado neste experimento.

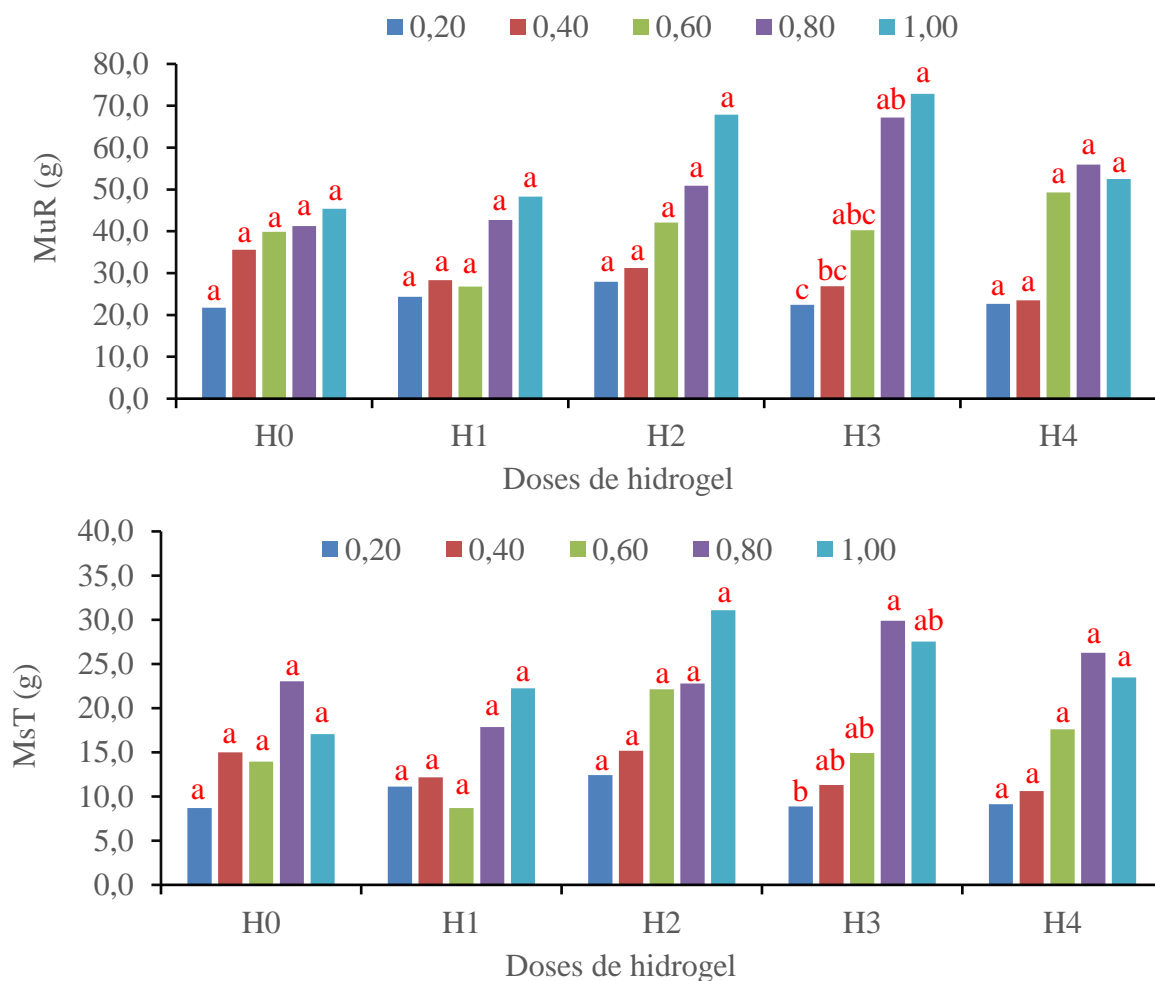


Figura 22 – Valores médios de Massa úmida da raiz (MsR) e Massa seca total (MsT) para as lâminas de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC) e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L⁻¹ da mistura de latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) na dose de ¼ base volume e biochar de lodo de esgoto (BLE) com 6% base volume. Médias seguidas de letras iguais não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey entre as lâminas de irrigação dentro de cada dose de hidrogel no experimento E2.

A MsA/MsR e a MsR não foram influenciadas pelas doses de hidrogel e pelas lâminas de irrigação (Figura 21).

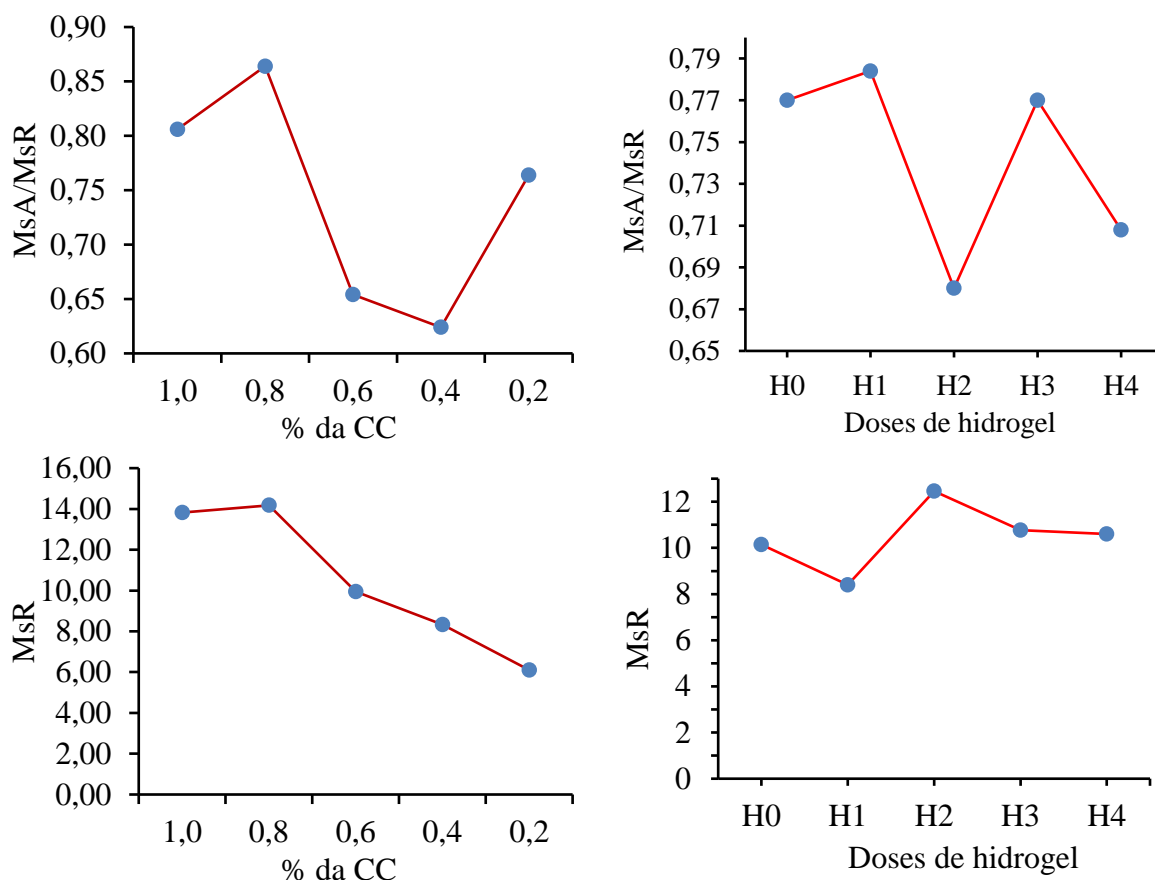


Figura 23 – Valores da razão entre a massa seca da parte aérea e massa seca da raiz (MsA/MsR) para as lâminas de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC) e de doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L⁻¹ da mistura de latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) na dose de ¼ base volume e biochar de lodo de esgoto (BLE) com 6% base volume no experimento E2.

De maneira geral, o aumento nas lâminas de água promoveu as mudanças mais significativas nos parâmetros morfológicos analisados no E2, o que foi observado com menor grau com o aumento das doses de hidrogel (Tabela 11 e Figura 23). Os resultados obtidos estão de acordo com Peroni et al. (2022), ao estudarem o crescimento de mudas de Tamboril sob lâminas de água e substratos com lodo de esgoto compostado, onde observaram que o maior fornecimento de água resultou em um aumento mais consistente nos parâmetros morfológicos analisados.

Ademais, o menor efeito com relação às doses de hidrogel correspondem ao encontrado por Barbosa et al. (2021) ao avaliarem a eficiência do hidrogel com diferentes tipos de fertilizantes e turnos de irrigação na taxa de crescimento e outros dados biométricos da Pinha

(*Annona Squamosa L.*). Segundo os autores, não há nenhum efeito benéfico ao aplicar hidrogel ao solo quando adicionado com fertilizante mineral, independentemente dos turnos de rega. Eles afirmam que a adubação tem maior impacto no desenvolvimento das plantas do que o estresse hídrico, além de ser necessário considerar a composição química do solo, sua densidade e método de aplicação do hidrogel.

Já Silva et al. (2023), estudando a utilização do hidrogel associado a diferentes lâminas de irrigação sob o crescimento de mudas de cacaueteiro, identificaram que o uso do hidrogel na quantidade indicada pelo fabricante não supre a necessidade hídrica das mudas de cacaueteiro, sendo indicado além do hidrogel uma lâmina de irrigação mínima de 50%. Os autores notaram que o hidrogel é importante para manter a planta viva, no entanto, combinado com uma lâmina de irrigação mínima de 50%, obtiveram uma melhor resposta. Esse fato pode ser explicado pois a presença de água permitiu a manutenção hídrica essencial para as plantas desempenharem todos os processos metabólicos vitais de subsistência.

5.4 Caracterização química do solo no experimento 2 (E2)

Os componentes da acidez no solo (pH e H + Al) foram influenciados pelas lâminas de irrigação e doses de hidrogel, sendo que o pH apresentou maior valor com a lâmina de 0,8 da CC e H3, com 5,67 (Tabela 12). De modo geral, houve diminuição dos valores de pH com menores lâminas de irrigação. Já a acidez potencial (H + Al) com a lâmina de 0,4 da CC e H2, com 3,43, no entanto, as doses de hidrogel não impactaram significativamente para este parâmetro (Tabela 12).

A diminuição do pH com uma menor lâmina de irrigação pode estar relacionada aos ácidos dissolvidos na água que podem reagir com minerais no solo, liberando íons de hidrogênio (H⁺) resultando em uma diminuição do pH.

O maior valor de Ca, 5,23 cmol_c dm⁻³, foi obtido com 0,4 da CC em H3 e 0,8 da CC em H2, e o menor valor, 4,10 cmol_c dm⁻³, com 1,00 da CC com H1. Com relação aos maiores valores, observa-se que uma menor lâmina de água foi compensada com uma maior dose de hidrogel e vice-versa (Tabela 12). De modo geral, os tratamentos intermediários com lâminas médias de irrigação e doses médias de hidrogel promoveram os melhores resultados. Já os valores de Mg não foram alterados pelas lâminas de irrigação ou doses de hidrogel, permanecendo com seus valores médios de 1,30 a 2,03 cmol_c dm⁻³ (Tabela 12).

Lâminas médias de água e doses moderadas de hidrogel promoveram os maiores valores de CTC sendo que o maior valor, 10,26 cmol_c dm⁻³, foi obtido com os tratamentos 0,8 da CC com H0 e 0,8 da CC com H2 (Tabela 12 e Figura 20). Tendo em vista que os valores iguais

foram obtidos com doses diferentes de hidrogel, infere-se que o hidrogel não foi relevante para este parâmetro, apenas as lâminas de água.

A variação percentual de 0,2 da CC em relação a 1,0 da CC, para o parâmetro pH, foi de 0,00, 0,72, 1,27, 1,82%, já para o Mg foi de 3,15, 2,04, 4,58, 7,69 e 2,61%, respectivamente, para as doses de hidrogel de 0, 1, 2, 3 e 4 g L⁻¹. Por sua vez, a acidez potencial (H + Al) reduziu para H0 (-17,20), H1 (-3,70%) e aumentou para H2 (2,47), H3 (1,03) e H4 (3,53%), enquanto o Ca reduziu em -4,88, -0,71, -8,75, -19,73 e 11,71%, ou seja, aumentou apenas em H4. Para a CTC a variação percentual observada foi de -3,89, -1,93, -4,80, -8,35 e -4,88%, respectivamente, para as doses de hidrogel de H0, H1, H2, H3 e H4 (Tabela 12).

Tabela 12 - Valores de pH, H + Al, Ca, Mg e CTC do solo para as lâminas de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC) e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L⁻¹ da mistura de latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) na dose de ¼ base volume e biochar de lodo de esgoto (BLE) com 6% base volume no experimento E2.

% da CC	Variável									
	pH (CaCl ₂)					H + Al (cmol _c dm ⁻³)				
	Doses de hidrogel (g L ⁻¹ de substrato)									
	H0	H1	H2	H3	H4	H0	H1	H2	H3	H4
0,2	5,57 ABa	5,53 ABCa	5,53 ABa	5,50 Ca	5,40 Cb	2,93 ABa	2,80 Aa	2,83 Aa	2,90 ABa	2,83 Ba
0,4	5,47 Ca	5,47 Ca	5,50 Ba	5,47 Ca	5,50 Ba	3,10 Aa	3,00 Aa	3,10 Aa	3,40 Aa	3,43 Aa
0,6	5,50 BCa	5,50 BCa	5,50 Ba	5,53 BCa	5,50 Ba	3,17 Aa	3,17 Aa	3,00 Aa	3,17 ABa	3,23 ABa
0,8	5,60 Aab	5,60 Aab	5,53 ABb	5,67 Aa	5,60 Aab	3,10 Aa	2,80 Aa	2,70 Aa	3,03 ABa	3,03 ABa
1,0	5,57 ABa	5,57 ABa	5,60 Aa	5,60 ABa	5,57 ABa	2,50 Ba	2,70 Aa	2,90 Aa	2,93 ABa	2,93 ABa
Va%	0,00	0,72	1,27	1,82	3,15	-17,20	-3,70	2,47	1,03	3,53
	Ca (cmol _c dm ⁻³)					CTC (cmol _c dm ⁻³)				
0,2	4,23 ABa	4,30 Aa	4,26 ABa	4,60 ABa	3,70 Ba	8,97 BC	9,08 A	9,00 BC	9,60 AB	8,50 B
0,4	4,67 ABab	4,73 Aab	5,13 ABab	5,23 Aa	4,17 ABb	9,86 AB	9,57 A	10,09 AB	10,75 A	9,74 A
0,6	5,13 Aa	4,67 Aa	5,03 ABa	5,03 ABa	5,13 Aa	10,24 A	9,89 A	10,10 AB	10,55 A	9,97 A
0,8	4,93 ABa	4,70 Aa	5,23 Aa	4,77 ABa	4,70 Aa	10,26 A	9,58 A	10,26 A	9,56 AB	9,81 A
1,0	4,13 Ba	4,10 Aa	4,23 Ba	4,23 Ba	4,43 ABa	8,03 C	8,74 A	8,83 C	9,16 B	9,21 AB
Va%	-4,88	-0,71	-8,75	-19,73	11,71	-3,89	-1,93	-4,80	-8,35	-4,88
	Mg (cmol _c dm ⁻³)									
0,2	1,47	1,53	1,40	1,57	1,43					
0,4	1,60	1,40	1,40	1,57	1,60					
0,6	1,60	1,60	1,60	1,80	1,47					
0,8	2,03	1,63	1,83	1,57	1,53					
1,0	1,50	1,60	1,30	1,53	1,33					
Va%	2,04	4,58	7,69	2,61	2,04					

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas na linha não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Va%: Variação entre 0,2 CC e 1,0 CC para cada dosagem de hidrogel.

Observa-se, portanto, que o solo se tornou mais ácido, sendo que o Ca foi absorvido pelas plantas reduzindo seu valor absoluto em função do aumento das lâminas de irrigação, possivelmente pela maior absorção pelas mudas de Tamboril, com exceção na dosagem H4, que pode ser devido a retenção do Ca no interior dos grânulos de hidrogel. O Mg, por sua vez, embora tenha aumentado em valor absoluto, não houve variação significativa entre as lâminas de irrigação doses de hidrogel (Tabela 12).

Em valor absoluto, os teores de Ca e CTC reduziram da menor lâmina de irrigação (0,2 CC) para a maior a 100% da CC, em todas as doses de hidrogel, já o Mg aumentou pouco, com maior valor percentual de 7,69%, sem apresentar diferença significativa entre as lâminas de irrigação e doses de hidrogel. A redução dos teores de Ca e da CTC com a maior lâmina de água pode ter ocorrido pelo processo de lixiviação, onde os íons foram levados para camadas mais profundas do solo, diminuindo assim, esses valores.

A Matéria Orgânica (MO) respondeu positivamente e significativamente à menor dose de hidrogel (1,0 g L⁻¹) e maior lâmina de água (1,00 CC) com o valor de 39,00 g kg⁻¹, sendo que maiores doses de hidrogel impactaram negativamente ou não tiveram significância, no entanto, em valores absolutos, houve aumento de 0,2 da CC em relação 1,0 da CC em H0 (12,90%), H1 (25,81%), H2 (4,14%) e redução em H3 (-17,19%) e H4 (3,80%), portanto, aumentou progressivamente com aumento das doses de hidrogel até H2 (Tabela 13).

A Saturação de Bases (V%) apresentou maior valor na lâmina de 0,8 da CC na dose de hidrogel de 2 g L⁻¹ (H2), com o valor de 73,67%, diferindo estatisticamente das demais lâminas de água, no entanto, em valor absoluto mudou pouco entre 0,2 e 1,0 da CC, sendo de 3,97, 0,48, -1,99, -1,46 e 1,49%, respectivamente, para as doses de hidrogel de H0, H1, H2, H3 e H4. As doses de hidrogel não tiveram efeitos significativos em nenhuma lâmina de irrigação (Tabela 13).

Os valores de P foram influenciados positivamente e significativamente com maiores lâminas de água até as doses de hidrogel de 3 g L⁻¹, com o maior valor obtido no tratamento 1,00 CC em H1 sendo de 61,67 mg dm⁻³. Ressalta-se que esse valor é mais do que o dobro do valor do tratamento testemunha sem hidrogel e com lâmina de água de 0,2 CC (28,33 mg dm⁻³). Em termos percentuais, a variação dos teores de P entre 0,2 e 1,0 da CC foram de 52,95, 58,13, 22,64, - 58,72 e 0,00, respectivamente, para as doses de hidrogel de H0, H1, H2, H3 e H4 (Tabela 13). Possivelmente se deve ao fato de que nas doses de hidrogel de 3 e 4 g L⁻¹, as mudas de Tamboril terem se desenvolvido melhor, aumentando a capacidade de extração do P

e acúmulo na sua parte aérea, mesmo que isso não tenha se refletido em variações significativas entre as doses de H.

Os valores de K aumentaram significativamente com maiores doses de hidrogel tendo o seu maior valor de 215,33 mg dm⁻³ com 0,6 da CC e H3. Observa-se que as variações de K entre 0,2 da CC em relação a 1,0 da CC diminuíram em todas as doses de hidrogel progressivamente das menores para a maior dose, sendo de -96,00, -32,14, -25,75, -8,59 e -5,35%, respectivamente, para as doses de hidrogel de H0, H1, H2, H3 e H4, indicando que maiores doses de hidrogel conseguem reter K, sendo menos absorvida pelas mudas de Tamboril (Tabela 13).

Tabela 13 - Valores de Matéria Orgânica, Saturação de Bases, P e K do solo para as para as lâminas (L) de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC) e doses de hidrogel de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g L⁻¹ da mistura de latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) na dose de ¼ base volume e biochar de lodo de esgoto (BLE) com 6% base volume no experimento E2.

% da CC	Variável									
	Matéria Orgânica (MO) (g kg ⁻¹)					Saturação de Bases (V%)				
	Dose de hidrogel (g L ⁻¹)									
	Doses de hidrogel (g L ⁻¹ de substrato)									
	H0	H1	H2	H3	H4	H0	H1	H2	H3	H4
0,2	31,00 Aa	31,00 Ba	32,33 Aa	36,33 Aa	36,33 Aa	67,33 A	69,00 A	68,67 B	69,33 A	67,00 A
0,4	35,00 Aa	32,33 ABa	29,67 Aa	31,00 Aa	35,00 Aa	68,33 A	68,67 A	69,00 AB	68,67 A	65,00 A
0,6	35,00 Aa	36,33 ABa	31,00 Aa	31,00 Aa	36,33 Aa	69,33 A	67,67 A	70,00 AB	70,00 A	67,67 A
0,8	35,00 Aa	35,00 ABa	33,67 Aa	35,00 Aa	29,67 Aa	69,67 A	70,67 A	73,67 A	72,00 A	69,00 A
1,0	35,00 Aab	39,00 Aa	33,67 Aab	31,00 Ab	35,00 Aab	70,00 A	69,33 A	67,33 B	68,33 A	68,00 A
Va%	12,90	25,81	4,14	-17,19	-3,80	3,97	0,48	-1,99	-1,46	1,49
	P (mg dm ⁻³)					K (mg dm ⁻³)				
0,2	28,33 Bb	39,00 Bab	35,33 Bab	42,33 Aa	33,33 Aab	130,67 Bb	172,67 Aa	195,33 Aa	210,67 Aa	210,00 Aa
0,4	26,67 Ba	29,00 Ba	34,00 Ba	23,67 Ba	25,67 Aa	194,00 Aab	171,33 Ab	177,33 ABab	214,67 Aa	212,67 Aa
0,6	29,33 Ba	33,33 Ba	36,00 Ba	26,33 Ba	31,33 Aa	132,00 Bb	178,00 Aab	182,67 ABab	215,33 Aa	152,67 Bb
0,8	26,67 Ba	37,67 Bab	57,33 Aa	24,67 Ba	29,00 Aa	76,67 Cb	174,00 Aa	191,33 ABa	204,67 Aa	211,33 Aa
1,0	43,33 Abc	61,67 Ab	43,33 Ba	26,67 Bc	33,33 Abc	66,67 Cc	130,67 Ab	155,33 Bb	194,00 Aa	199,33 Aa
Va%	52,95	58,13	22,64	-58,72	0,00	-96,00	-32,14	-25,75	-8,59	-5,35

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na coluna e minúsculas na linha não diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Va%: Variação entre 0,2 CC e 1,0 CC para cada dosagem de hidrogel.

Os resultados obtidos de P e K no presente trabalho estão de acordo com os obtidos por Dengxiao et al. (2023) com aumentos significativos de 42,9% de P, em estudo sobre os efeitos

da aplicação de dois tipos de biochar e dois hidrogéis na capacidade de retenção de água no solo e no desenvolvimento inicial do milho, no entanto, divergem dos observados para o K em que houve aumento de 57,5 a 90,8%, enquanto neste estudo houve redução em todas as lâminas de irrigação.

O pH não apresentou correlação de Pearson (r) com nenhum atributo solo, porém a acidez potencial apresentou correlação de 0,46 com o Ca e de 0,72 com a CTC, correlação moderada e forte, respectivamente, porém é negativa com o P ($r = -0,71$) segundo Jacques-Callegari (2007) que define a seguinte categorização: $r = 0$, nula; 0 a 0,30, fraca; 0,3 a 0,6 moderada; 0,6 a 0,9, forte; 0,9 a 1, muito forte e 1, perfeita. Por sua vez, o Ca tem correlação positiva forte com a CTC (0,89) e moderada com a V (0,48) e a CTC apresentou correlação positiva moderada (0,53), o mesmo ocorreu com o Mg, mas com a V (0,47), enquanto com os demais atributos a correlação foi positiva negativa fraca. A MO e V apresentaram correlação moderada em relação ao P, mas próximo a limite inferior da categorização indicada pelo autor acima, sendo de 0,38 e 0,37, respectivamente (Tabela 14).

No que se refere a correlação dos valores médios da eficiência, observa-se que foi baixa em praticamente todas as correlações, destacando-se 0,77 de Ca em relação ao pH, 0,53 e 0,52 do Mg em relação ao pH e H+Al, respectivamente, 0,80 e 0,59 da MO em correlação como o pH e Mg, 0,79 da V em correlação com a MO, já o P o apresentou correlação dos valores médios da eficiência de 0,71 e 0,96 em relação ao pH e Mg, e o K de 0,71 e 0,69 em relação ao pH e V, respectivamente (Tabela 14).

Tabela 14 – Correlação de Pearson's dos valores de Valores de pH, H + Al, Ca, Mg e CTC, MO, V, P e K do solo para as para as lâminas de 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1,0 da Capacidade de Campo (CC) e de 0 (H0), 1 (H1), 2 (H2), 3 (H3) e 4 (H4) g de hidrogel por L⁻¹ da mistura de latossolo vermelho amarelo (LVA), esterco bovino (EB) na dose de ¼ base volume e biochar de lodo de esgoto (BLE) com 6% base volume no E2

Correlação dos valores médios da eficiência									
Atributos	pH	H+Al	Ca	CTC	Mg	MO	V	P	K
pH	1,00	0,17	0,77	0,37	0,53	0,80	0,08	0,71	0,19
H+Al	-0,28	1,00	0,02	0,00	0,51	0,44	0,04	0,00	0,09
Ca	-0,06	0,46	1,00	0,00	0,03	0,20	0,01	0,37	0,71
CTC	-0,19	0,72	0,89	1,00	0,01	0,19	0,24	0,07	0,13
Mg	0,13	0,14	0,43	0,53	1,00	0,59	0,02	0,96	0,36
MO	-0,05	-0,16	-0,27	-0,27	0,11	1,00	0,79	0,06	0,22
V	0,36	-0,42	0,49	0,24	0,47	-0,06	1,00	0,07	0,69
P	0,08	-0,71	-0,19	-0,37	0,01	0,38	0,37	1,00	0,24
K	-0,27	0,35	0,08	0,31	-0,19	-0,26	-0,08	-0,24	1,00
Correlação dos valores médios dos atributos									

6. CONCLUSÕES

Atributos morfológicos no Experimento E1

As maiores doses de biochar de lodo de esgoto (BLE) (6 e 8% v/v) e doses de hidrogel (H) de 3 e 4 g L⁻¹ promoveram elevação significativa nos parâmetros morfológicos do Tamboril.

Os maiores valores de diâmetro do coleto – DC (10,4 mm), número de folhas – NF (19), massa seca da parte aérea – MsA (25,79 g), massa úmida da parte aérea MuA (55,45 g) e relação da massa seca da parte aérea e massa seca das raízes – MsA/MsR (3,00) foram obtidos na dose de 6% de BLE e 3 g L⁻¹ de hidrogel (B6H3).

A massa úmida da raiz (MuR), massa seca da raiz (MsR) e massa seca total (MsT) foram maiores na dose de BLE de 8% e 3 g L⁻¹ de hidrogel (B8H3) com 67,14 g, 14,67 g e 35,61 g, respectivamente, não havendo diferença quando do uso da maior dose de hidrogel (4 g L⁻¹).

O Índice de Qualidade de Dickson (IQD) foi influenciado pelas doses de hidrogel para 6 e 8% de BLE, sendo os maiores valores obtidos nas doses de 1, 3 e 4 g L⁻¹ de H com 2,86 em B6H1, 2,80 para B8H3 e 2,82 para B8H4, respectivamente.

Os maiores valores de área foliar (AF) foram obtidos com as maiores doses de biochar e hidrogel, na combinação de 6% de BLE, com 3 e 4 g L⁻¹ de hidrogel, com os valores de 2302,56 cm² e 2057,03 cm², respectivamente.

A razão entre altura das plantas e diâmetro do coleto (RAD) respondeu significativamente a incorporação de BLE com maior valor quando do uso de 6% (12,3) e 8% (12,6) sem a presença de hidrogel.

Qualidade do solo Experimento E1

A acidez potencial (H + Al) aumentou significativamente com a combinação entre o BLE e o hidrogel incorporados ao substrato (4,07 cmolc dm⁻³ no B8H1) e houve diminuição do pH com aumento das doses de biochar (5,16 no B8H0)

O P foi influenciado significativamente pelo BLE e triplicou na maior dose em relação à testemunha, sendo de 70 mg dm⁻³ em 8% de BLE e 16,7 mg dm⁻³ em 0% de BLE, ambos sem a presença de hidrogel.

A Matéria Orgânica (MO) respondeu positivamente às baixas doses de hidrogel negativamente às doses de BLE, com o maior valor, 41,67 g kg⁻¹, na dose de 1 g L⁻¹ de hidrogel e sem a presença do BLE (B0H1).

A Saturação de Bases (V%) foi maior quando não foram incorporados o BLE e o hidrogel no substrato, com o valor de 74,33% no tratamento B0H0, e houve diminuição significativa dos valores com a incorporação de maiores doses de BLE.

O Ca foi influenciado positivamente pelas doses de BLE com o maior valor obtido no tratamento B2H4, 5,53 cmol_c dm⁻³. Já os valores de Mg não foram alterados pela utilização do BLE ou hidrogel.

O K foi influenciado significativamente tanto pelas doses de BLE quanto pelas doses de hidrogel, no entanto, o efeito foi positivo com maiores doses de hidrogel e negativo com maiores incorporações de BLE. O maior valor, 215,33 mg dm⁻³ foi obtido no tratamento B0H4.

Maiores doses de BLE e hidrogel promoveram maiores valores de CTC sendo que o maior valor foi obtido no tratamento B6H4 com 10,94 cmol_c dm⁻³

Atributos morfológicos no Experimento E2

As maiores lâminas de água, 0,8 CC e 1,00 CC, promoveram as mudanças mais significativas nos parâmetros morfológicos do Tamboril, o que foi observado com menor grau com o aumento das doses de hidrogel.

A Altura da Planta (AP) e o Diâmetro do Coleto (DC) responderam significativamente às maiores lâminas de água, com maior valor de AP na combinação de 1,0 da CC e dose de hidrogel de 2 g L⁻¹ (85,7 cm) e o DC com 0,8 da CC na dose de 3 g L⁻¹ (7,88 mm).

A Massa úmida da parte aérea (MuA), Massa úmida da raiz (MuR), Massa seca da parte aérea (MsA), Massa seca da raiz (MsR) e Massa seca total (MsT) aumentaram significativamente com aumento das lâminas de irrigação, especialmente em 0,8 e 1,00 da CC, com os maiores valores de 54,95 g, 72,86 g, 14,33 g, 16,74 g e 31,07g, respectivamente.

Os maiores valores absolutos do Índice de Qualidade de Dickson (IQD) foram obtidos com as maiores lâminas de água (0,8 CC e 1,00 CC), com 3,65 quando da aplicação de 0,80 CC associado a 2 g L⁻¹ de hidrogel e 3,56 com 1,00 da CC e dose de hidrogel de 3 g L⁻¹.

O maior valor de Área Foliar (AF) foi obtido com a maior lâmina de irrigação (1,00 CC) e com a dose intermediária de hidrogel (2 g L⁻¹), com 2382,3 cm², sendo este valor cerca de três vezes maior do que na lâmina de água de 0,2 CC, com 660,6 cm².

Qualidade do solo Experimento E2

Os componentes da acidez no solo (pH e H + Al) foram influenciados pelas lâminas de irrigação e doses de hidrogel, sendo que o pH apresentou maior valor com a lâmina de 0,8 da

CC e H3, com 5,67. Já a acidez potencial (H + Al) com a lâmina de 0,4 da CC e H2, com 3,43, no entanto, as doses de hidrogel não impactaram significativamente para este parâmetro.

Os teores Matéria Orgânica (MO), P e Saturação de Bases (V) foram significativamente maiores nas lâminas de irrigação de 100% (1,0 da CC) em relação a 20% (0,2 da CC) nas doses de hidrogel de 0, 1 e 2 g L⁻¹, com os valores de 39,00 g kg⁻¹, 61,67 mg dm⁻³ e 73,67%, respectivamente.

Os valores de K aumentaram significativamente com maiores doses de hidrogel tendo o seu maior valor de 215,33 mg dm⁻³ com 0,6 da CC e H3. Os valores de K diminuíram progressivamente da menor para a maior dose de hidrogel, sendo de -96,00, -32,14, -25,75, -8,59 e -5,35%, respectivamente, para as doses de 0, 1, 2, 3 e 4 g L⁻¹ de hidrogel.

O maior valor de Ca, 5,23 cmol_c dm⁻³, foi obtido com 0,4 da CC em H3 e 0,8 da CC em H2, e o menor valor, 4,10 cmol_c dm⁻³, com 1,00 da CC com H1.

A Capacidade de Troca Catiônica (CTC) teve seu maior valor, 10,26 cmol_c dm⁻³, com o tratamento 0,8 da CC e H0 e 0,8 da CC com H2.

Em valores absolutos, os teores de Ca e CTC reduziram da menor lâmina de irrigação (0,2 CC) para a maior a 100% da CC, em todas as doses de hidrogel, já o Mg não foi influenciado pelas lâminas de irrigação e doses de hidrogel.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, G. M., SCHIAVO, J. A., ABREU, P. M., BOBADILHA, G. D. S., ROSSET, J. S. Crescimento inicial e absorção de fósforo e nitrogênio de *Enterolobium contortisiliquum* inoculada com fungos micorrízicos arbusculares. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 41, n.1. p. 156-164, 2018. <https://doi.org/10.19084/RCA17138>
- ALEXANDRE, R. S., GONÇALVES, F. G., ROCHA, A. P., DE ARRUDA, M. P., LEMES, E. D. Q. Tratamentos físicos e químicos na superação de dormência em sementes de *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v., 4, n. 2, p. 156-159, 2009. <https://doi.org/10.5039/agraria.v4i2a6>
- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., GONÇALVES, J. L. M., SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014. DOI 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- ALVES, B. S. Q., ZELAYA, K. P. S., COLEN, F., FRAZÃO, L. A., NAPOLI, A., PARIKH, S. J., FERNANDES, L. A. Effect of sewage sludge and sugarcane bagasse biochar on soil properties and sugar beet production. **Pedosphere**, v. 31, n. 4, p. 572-582, 2021. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(21\)60003-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(21)60003-6)
- ARAÚJO, A. P. D., PAIVA SOBRINHO, S. D. Germinação e produção de mudas de tamboril (*Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong) em diferentes substratos. **Revista Árvore**, v. 35, n. 3, p. 581-588, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000400001>
- ARAÚJO, Y. P. D., SOUZA, L. S. B. D., SILVA, T. G. F. D., e MOURA, M. S. B. D. Water and Radiation Use Efficiencies by *Erythrina velutina* and *Enterolobium contortisiliquum* Under Different Water Conditions. **Floresta e Ambiente**, v. 28, 2020. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2019-0080>
- AVELINO, N. R., SCHILLING, A. C., DALMOLIN, Â. C., SANTOS, M. S. D., e MIELKE, M. S. Alocação de biomassa e indicadores de crescimento para a avaliação da qualidade de mudas de espécies florestais nativas. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 1733-1750, 2022. <https://doi.org/10.5902/1980509843229>
- AZEVEDO, G. T. O. S.; SOUZA, A. M.; AZEVEDO, G. B.; TEODORO, P. E.; SOUSA, J. R. L. Influence of fertilizer and hydrogel on physical-chemical attributes of substrate for seedling production. **Bioscience Journal**, v. 35, p. 1399-1407, 2019. <https://doi.org/10.14393/BJ-v35n5a2019-42267>

- BARBOSA, F. E. L. SOBRINHO, J. F., ALMEIDA, C. L., e SILVA, D. M. Hydrogel associated with soil in a semi-arid environment. **International Journal of Conservation Science**, v. 12, n. 3, p. 1153-1162, 2021.
- BARBOSA, J. C., MALDONADO JÚNIOR, W. (2010). **AgroEstat–sistema para análises estatísticas de ensaios agrônômicos**. Versão 1.0. Jaboticabal: Departamento de Ciências Exatas.
- BATAGLIA, O. C., FURLANI, A. M., TEIXEIRA, J. P. F., GALLO, J. R. **Métodos de análise química de planta**. Campinas-SP: Instituto Agrônômico, 1983.
- BEHERA, S.; SAMAL, K. Sustainable approach to manage solid waste through biochar assisted composting. **Energy Nexus**, p. 100121, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100121>
- BERNARDINO, L. T., BONOM, R., SOUZA, J. M. Desenvolvimento inicial de mudas de eucalipto sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, 13(1), 3169-3179, 2019. <http://dx.doi.org/10.7127/RBAI.V13N100833>
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF: Mapa/ACS, 2009. 399p
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. **Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências**. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconamaetask=arquivo.download&id=797 Acesso em 22/04/2022.
- BREMNER, J. M. SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E., eds. Nitrogen total: In: Methods of analysis. Part 3. Chemical methods. Madison, WI, **Soil Science Society of America**, 1996. p. 1085-1121. (Book series, 5.).
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. (2007). **Bioestatística: Princípios e aplicações**. Artmed Editora.
- CARVALHO, PAULO ERNANI RAMALHO. **Espécies arbóreas brasileiras**. 2003.
- CARVALHO, D. F. D., BUENO, M. M., LELES, P. S. D. S., ABREU, J. F. G., MARTINS, R. D. C. F., & MEDICI, L. O. Production and initial growth of forest species seedlings using sewage sludge and automated irrigation. **Ciência e Agrotecnologia**, 45. 2021. <https://doi.org/10.1590/1809-4392202100372>
- CARVALHO, J. M., CALDEIRA, D. S. A., VIEIRA, C. L., DA SILVA, G. V. B., ROCHA, R. R., DE CAMPOS, I. Crescimento inicial de mudas de *Sapindus saponária* com uso de

- hidrogel e lâminas de água. **Scientific Electronic Archives**, 15(1). 2022.
<https://doi.org/10.36560/15120221489>
- CHAGAS, JHON KENEDY MOURA; DE FIGUEIREDO, CÍCERO CÉLIO; PAZ-FERREIRO, JORGE. Sewage sludge biochars effects on corn response and nutrition and on soil properties in a 5-yr field experiment. **Geoderma**, v. 401, p. 115323, 2021.
- DA SILVA, J. G., TAGLIAFERRE, C., DE PAULA, A., LEMOS, O. L., & ROCHA, F. A. Influência da lâmina de água e consumo hídrico no crescimento inicial de cinco essências florestais. **IRRIGA**, v. 24, n. 2, p. 303-319, 2019.
<https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n2p303-319>
- DAS CHAGAS SILVA, DAS CHAGAS SILVA, O. M., HERNÁNDEZ, M. M., DE ALMEIDA, R. S., MOREIRA, R. P., DOS SANTOS LELES, P. S., & DE MELO, L. A. Seedlings of tree species produced in substrates based on organic composts. **Floresta**, v. 51, n. 2, p. 371-380, 2021.
- DAS, S. K., & GHOSH, G. K. Hydrogel-biochar composite for agricultural applications and controlled release fertilizer: a step towards pollution free environment. **Energy**, v. 242, p. 122977, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122977>
- DENGXIAO Z., HONGBIN, J., WENJING, Z., QINGSONG, Y., ZHIHANG, M., HAIZHONG W., WEI R., SHILIANG, L., DAICHANG, W. Combined biochar and water-retaining agent application increased soil water retention capacity and maize seedling drought resistance in Fluvisols. **Science of The Total Environment**, 2023, 167885, ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167885>.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo** / Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF : Embrapa, 2017. 574 p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Sistema **brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Rio de Janeiro, 2013. 353p.
- FACHINI, JÓISMAN; FIGUEIREDO, CÍCERO CÉLIO DE. Pyrolysis of Sewage Sludge: Physical, Chemical, Morphological and Mineralogical Transformations. **BRAZILIAN ARCHIVES OF BIOLOGY AND TECHNOLOGY (ONLINE) JCR**, v. 65, p. e22210592, 2022.
- FACHINI, J.; FIGUEIREDO, C.C.; VALE, A.T. Assessing potassium release in natural silica sand from novel K-enriched sewage sludge biochar fertilizers. **Journal of Environmental Management**, Volume 314, 2022, 115080, ISSN 0301-4797.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115080>.

- FALLER, B. V., DOS SANTOS AMORIN, R., DE OLIVEIRA, I. A., JARDIM, I. N. (2020). Efeito da poda radicular e do hidrogel no crescimento de mudas de jatobá. **Nativa**, 8(4), 476-483.
- FERREIRA, A. D. S., LEAL, C. C. P., LEITE, M. D. S., BENEDITO, C. P., DUTRA, A. S., ALVES, C. Z., ... & TORRES, S. B. Morphophysiological and biochemical changes in *Enterolobium contortisiliquum* seedlings under abiotic stresses. **Revista Ciência Agronômica**, v. 54, p. e20218621, 2023. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20230037>
- FIGUEIREDO, C. C. D., COSER, T. R., MOREIRA, T. N., LEÃO, T. P., VALE, A. T. D., PAZ-FERREIRO, J. (2019). Carbon mineralization in a soil amended with sewage sludge-derived biochar. **Applied Sciences**, 9(21), 4481.
- FREITAS, TERESA APARECIDA SOARES et al. Performance of tamboril Seedlings Produced in Three Different Tube Volumes. **Floresta e Ambiente**, v. 25, 2018. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.021415>
- FONTES, R., CANTARUTTI, R., NEVES, J. (2007). **Fertilidade do Solo–Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**. 1017p.
- GOMES, J. M.; PAIVA, HN de. Viveiros florestais: propagação sexuada. Viçosa: UFV, v. 3, 2004.
- GOMES JM, PAIVA HN (2011). Viveiros florestais. Viçosa: Editora UFV, 116p.
- HAI-LONG LU, KE-WEI LI, JACKSON NKOH NKOH, YANG-XIAO-XIAO SHI, XIAN HE, ZHI-NENG HONG, REN-KOU XU. Effects of the increases in soil pH and pH buffering capacity induced by crop residue biochars on available Cd contents in acidic paddy soils, **Chemosphere**, 2022, 134674, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134674>.
- HEYDARI, M. HAJINIA, S., JAFARIAN, N., KARAMIAN, M., MOSA, Z., ASGHARZADEH, S., ... & PRÉVOSTO, B. Synergistic use of biochar and the plant growth-promoting rhizobacteria in mitigating drought stress on oak (*Quercus Brantii* Lindl.) seedlings. **Forest Ecology and Management**, v. 531, p. 120793, 2023.
- KHAN, F., ATIF, M., HASEEN, M., KAMAL, S., KHAN, M. S., SHAHID, S., & NAMI, S. A. Synthesis, classification and properties of hydrogels: Their applications in drug delivery and agriculture. **Journal of Materials Chemistry B**, v. 10, n. 2, p. 170-203, 2022. <https://doi.org/10.1039/D1TB01345A>
- KOPITTKE, P. M., MENZIES, N. W., WANG, P., MCKENNA, B. A., LOMBI, E. (2019). Soil and the intensification of agriculture for global food security. **Environment International**, 132, 105078.

- KUMAR, A., SINGH, E., SINGH, L., KUMAR, S., KUMAR, R. (2021). Carbon material as a sustainable alternative towards boosting properties of urban soil and foster plant growth. **Science of the Total Environment**, 751, 141659.
- LI, SIMENG; SKELLY, SHANNON. Physicochemical Properties and Applications of Biochars Derived from Municipal Solid Waste: A Review. **Environmental Advances**, p. 100395, 2023.
- LIU, Y., WANG, J., CHEN, H., CHENG, D. Environmentally friendly hydrogel: A review of classification, preparation and application in agriculture. **Science of the Total Environment**, v. 846, p. 157303, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157303>
- MALAVASI, U. C., MALAVASI, M. D. M. (2004). Dormancy breaking and germination of *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong seed. **Brazilian Archives of Biology and technology**, 47(6), 851-854.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo, Agronômica Ceres, 2006. 638p.
- MARQUES, M. C., CALVI, G. P., PRITCHARD, H. W., & FERRAZ, I. D. K. Behind the forest restoration scene: a socio-economic, technical-scientific and political snapshot in Amazonas, Brazil. **Acta Amazonica**, v. 52, p. 1-12, 2022.
- MATOS, J. M. D. M. M., RAMOS, K. M. O., MARTINS, R. D. C. C., OLIVEIRA, D. V. (2010). Estudo das técnicas de superação da dormência das sementes de **Enterolobium contortisiliquum** (vell.) Morong. **Heringeriana**, 4(1), 60-64.
- MATOSO, S. C. G., WADT, P. G. S., DE SOUZA JÚNIOR, V. S., PÉREZ, X. L. O., PLOTTEGHER, F. (2020). Variation in the properties of biochars produced by mixing agricultural residues and mineral soils for agricultural application. **Waste Management & Research**, 38(9), 978-986.
- MELO, L. D. F. D. A., JUNIOR, J. L. D. A. M., SOARES, L. B. F., CHAVES, L. F. G., NETO, J. C. D. A., FERREIRA, V. M., ... ASSIS, W. O. D. (2021). Thermal-biological aspects of germination of seeds in tropical forest tree species. **Australian Journal of Crop Science**, 15(6), 955-959.
- NASCIMENTO, C. D. V., SIMMONS, R. W., DE ANDRADE FEITOSA, J. P., DOS SANTOS DIAS, C. T., & COSTA, M. C. G. Potential of superabsorbent hydrogels to improve agriculture under abiotic stresses. **Journal of Arid Environments**, v. 189, p. 104496, 2021.
- NASCIMENTO, I. R. S. do; RODRIGUES, E. N. da. S.; SANTOS, F. A. dos; SOARES, F. J. S.; PEREIRA, W. E.; ARAÚJO, J. R. E. S.; CARTAXO, P. H. de A.; SILVA, G.

- R.; BULHÕES, L. E. L.; SANTOS, J. P. de. O. Lâminas de irrigação e hidrogel nas taxas de crescimento e produção de tomateiro. **Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia da UNIPAR**, Umuarama, v. 24, n. 2cont., e2404, 2021.
<https://doi.org/10.25110/arcvet.v24i2cont.2021.8468>
- NAVROSKI, M. C., ARAUJO, M. M., FIOR, C. S., CUNHA, F. D. S., BERGHETTI, Á. L. P., & PEREIRA, M. D. O. Uso de hidrogel possibilita redução da irrigação e melhora o crescimento inicial de mudas de *Eucalyptus dunnii* Maiden. **Scientia Forestalis. Piracicaba. Vol. 43, n. 106 (jun. 2015), p. 467-476**, 2015.
- NDOUNG, O. C. N., DE FIGUEIREDO, C. C., RAMOS, M. L. G. (2021). A scoping review on biochar-based fertilizers: enrichment techniques and agro-environmental application. **Heliyon**, 7(12), e08473.
- NDOUNG, O. C. N.; SOUZA, L. R.; FACHINI, J.; LEÃO, T.P. SANDRI, D.; FIGUEIREDO, C.C. Dynamics of potassium released from sewage sludge biochar fertilizers in soil. *Journal of Environmental Management*. v. 346, 15 November 2023, 119057.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119057>
- OLADOSU, Y., RAFIL, M. Y., AROLU, F., CHUKWU, S. C., SALISU, M. A., FAGBOHUN, I. K., ... & HALIRU, B. S. Superabsorbent polymer hydrogels for sustainable agriculture: A review. **Horticulturae**, v. 8, n. 7, p. 605, 2022.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae8070605>
- OLIVEIRA, M. C. D., OGATA, R. S., DE ANDRADE, G. A., SANTOS, D. D. S., SOUZA, R. M., GUIMARÃES, T. G., ... RIBEIRO, J. F. **Manual de viveiro e produção de mudas: espécies arbóreas nativas do Cerrado**. Embrapa Cerrados-Outras publicações científicas (ALICE), 2016.
- PAZ-FERREIRO, J., NIETO, A., MÉNDEZ, A., ASKELAND, M., GASCÓ, G. (2018) Biochar from biosolids pyrolysis: A review. **Int J Environ Res Public Health**. 15(5):956.
- PERONI, G., FERREIRA MACHADO, G., PACIELLO YAMASHITA, V., FOSSA DA PAZ, M., FIGUEIREDO LOBO, T., & BOHRER MONTEIRO SIQUEIRA, M. V. (2022). Growth of *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong seedlings under water slides and substrates formulated with composted sewage sludge.
<https://doi.org/10.18845/rfmk.v19i44.6095>
- PETERS, F., LIPPE, M., EGUIGUREN, P., & GÜNTER, S. (2023). Forest ecosystem services at landscape level—Why forest transition matters? *Forest Ecology and Management*, 534, 120782. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120782>

- PERY, R. S. M., MARFÀ, O., SERRANO, L. (1995). The effect of a hydrophilic polymer on plant water status and survival of transplanted pine seedlings. **HortTechnology**, 5(2), 141-143.
- PONTES FILHO, R. A., GONDIM, F. A., COSTA, M. C. G. (2018). Seedling growth of tree species under doses of hydrogel and two levels of luminosity. **Revista Árvore**, 42 (1).
- REZENDE, F. A., MAIA, C. D. F., DOS SANTOS, V. A. H. F., DE BARROS, D. L. (2019). Biocarvão: multifuncionalidade no gerenciamento e reutilização de co-produtos agroindustriais. **Embrapa Agrossilvipastoril-Capítulo em livro científico (ALICE)**.
- REZENDE, O; OLIVEIRA, A.D. Análise econômica e social de projetos florestais. 3ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2013.
- RICHARDS, L. A., Physical conditions of water in soil. In: C. A. BLACK, D. D. EVANS, J. L. WHITE, L. E. ENSMINGE and F. E. CLARK, ed. Methods of soil analysis - Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling. Madison, ASASSSA, 1965. p.128-152.
- RODRIGUES, A. P. D., BORTOLOZZO, A. S. S., ARANTES-COSTA, F. M., SARAIVA-ROMANHOLO, B. M., DE SOUZA, F. C. R., BRÜGGEMANN, T. R., ... TIBÉRIO, I. D. F. L. C. (2018). A plant proteinase inhibitor from *Enterolobium contortisiliquum* attenuates airway hyperresponsiveness, inflammation and remodeling in a mouse model of asthma. **Histology and histopathology**, 34(5), 537-552.
- SCHMITT, T., DE ANDRADE, V. C. L., CANDIDO, J. B., DE SOUZA, P. B. (2018). Análise fitossociológica para a recuperação de áreas degradadas utilizando espécies de Cerrado. **Global Science and Technology**, 11(2).
- SELVARAJOO, A. S.; TEE, J. X.; LIEW, Y. W.; WONG, Y .L. Potential green applications of biochar derived from biomass, Materials Today: Proceedings, 2022. ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.058>.
- SINGH, S., KUMAR, V., DHANJAL, D. S., DATTA, S., BHATIA, D., DHIMAN, J., ... & SINGH, J. A sustainable paradigm of sewage sludge biochar: valorization, opportunities, challenges and future prospects. Journal of Cleaner Production, v. 269, p. 122259, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122259>
- SINGH, P., RAWAT, S., JAIN, N., BHATNAGAR, A., BHATTACHARYA, P., MAITI, A. A review on biochar composites for soil remediation applications: Comprehensive solution to contemporary challenges. Journal of Environmental Chemical Engineering, Volume 11, Issue 5, 2023, 110635, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110635>.

- SILVA CADÊTE, A., RIBEIRO, I. R., DOS SANTOS DIAS, I., DE MEDEIROS MENDONÇA, L. F., SILVA, V. F., CUNHA, M. D. C. L. Trocas gasosas e qualidade de mudas de *Enterolobium contortisiliquum* (vell.) Morong sob doses de hidrogel em diferentes regimes hídricos. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n. 11, 2021.
- SILVA, L. K. S., COSTA, R. N., SANTOS, S. A., SILVA, D. M. R., SANTOS, J. C. C., PAVÃ, J. S., ... SILVA, J. V. (2019). Hydrogel improves the initial growth and quality of *Enterolobium contortisiliquum* seedlings. **Scientific Electronic Archives**, 12(3), 53-61.
- SILVA, M. A. LOPES, C. F., FERREIRA, M. C. D. Q., CARVALHO, F. V. D. B., SANTOS, C. A. F. D., LIMA, N. S., ... & VIEIRA, D. D. Hidrogel e diferentes lâminas de irrigação em mudas de cacaueteiro na amazônia. **Tecnologia e inovação na agricultura: aplicação, produtividade e sustentabilidade em pesquisa**, v. 1, n. 1, p. 147-158, 2023.
- SILVA, R. V. D., RODRIGUES, L. A., SILVA, M. G. D., SILVA, B. G. D., MARTINS, M. A. (2019) Biochar and mucuna increase papaya plant growth and nutrition, as well as soil fertility. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 49, e55210.
- STUEPP, C. A., KRATZ, D., GABIRA, M. M., & WENDLING, I. Survival and initial growth in the field of eucalyptus seedlings produced in different substrates. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, 2020.
- TATAGIBA, S. D., PEZZOPANE, J. E. M., VINCO, J. S., & PINHEIRO, A. A. Crescimento de clones de eucalipto em diferentes condições microclimáticas e lâminas de água no substrato. **Irriga**, v. 21, n. 1, p. 104-104, 2016.
- TAVARES, S. D. L., MELO, A. D. S., DE ANDRADE, A. G., ROSSI, C. Q CAPECHE, C. L. BALIEIRO, F. D. C., ... PIMENTA, T. S. (2008). Curso de recuperação de áreas degradadas: a visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação. **Embrapa Solos-Documentos** (INFOTECA-E).
- TORRES, M. F. O., FERREIRA, R. A., PRATA, L. C. D., SILVA-MANN, R. (2020). Longevidade de sementes de *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong. **Journal of Seed Science**, 42. e202042032.
- TRANNIN, I. C. B.; MOREIRA, FM de S.; SIQUEIRA, J. O. Crescimento e nodulação de *Acacia mangium*, *Enterolobium contortisiliquum* e *Sesbania virgata* em solo contaminado com metais pesados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 743-753, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000300024>

- van GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, 44:892-898, 1980.
- VELÁZQUEZ MACHUCA, M. A., EQUIHUA SORIANO, J. R., VENEGAS GONZÁLEZ, J., MONTAÑEZ SOTO, J. L., PIMENTEL EQUIHUA, J. L., MUÑOZ NAVIA, M. Caracterización física y química de biochar de lodos residuales. ***Terra Latinoamericana***, v. 37, n. 3, p. 243-251, 2019.
- ZHU, Q., LIANG, Y., ZHANG, Q., ZHANG, Z., WANG, C., ZHAI, S., ... & SUN, H. Biochar derived from hydrolysis of sewage sludge influences soil properties and heavy metals distributed in the soil. ***Journal of Hazardous Materials***, v. 442, p. 130053, 2023.