



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE SAÚDE E TECNOLOGIA RURAL
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
CAMPUS DE PATOS - PB



GEORGE MARTINS DE FRANÇA

USO DO BIOCHAR E DE RESÍDUOS DE CAULIM NA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS
DO DÉFICIT HÍDRICO EM MUDAS DE JUREMA-PRETA (*Mimosa tenuiflora*
(Willd.) Poir.)

Patos - PB
2025

GEORGE MARTINS DE FRANÇA

**USO DO BIOCHAR E DE RESÍDUOS DE CAULIM NA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS
DO DÉFICIT HÍDRICO EM MUDAS DE JUREMA-PRETA (*Mimosa tenuiflora*
(Willd.) Poir.)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal de Campina Grande, *Campus* Patos/PB, na área de Ecologia e Manejo dos Recursos Naturais, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Lucineudo de Oliveira Freire

Coorientadora: Profa. Dra. Cheila Deisy Ferreira

**Patos - PB
2025**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado Bibliotecas – SISTEMOTECA/UFCG

F815u

França, George Martins de

Uso do biochar e de resíduos de caulim na mitigação dos efeitos do déficit hídrico em mudas de Jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.) / George Martins de França. – Patos, 2025.
78f.

Orientador: Antonio Lucineudo de Oliveira Freire.

Mestrado (Dissertação) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Saúde e Tecnologia Rural, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais.

1. Caatinga. 2. Estresse hídrico. 3. Rejeitos de mineração. 4. Trocas gasosas.
I. Freire, Antonio Lucineudo de Oliveira, *orient.* II. Título.

CDU 628.16

Bibliotecário-documentalista: Bárbara Costa – CRB-15/806

GEORGE MARTINS DE FRANÇA

**USO DO BIOCHAR E DE RESÍDUOS DE CAULIM NA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS
DO DÉFICIT HÍDRICO EM MUDAS DE JUREMA-PRETA (*Mimosa tenuiflora*
(Willd.) Poir.)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal de Campina Grande, *Campus* Patos/PB, na área de Ecologia e Manejo dos Recursos Naturais, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

APROVADA EM 25/02/2025

Prof. Dr. Antonio Lucineu de Oliveira Freire (PPGCF/CSTR/UFCG)
Orientador

Dra. Angeline Maria da Silva Santos (CCA/UFPB)
1ª Examinadora

Profa. Dra. Ivonete Alves Bakke (PPGCF/CSTR/UFCG)
2ª Examinadora

Dedico...

Este trabalho a Deus e a todos os meus familiares, em especial aos meus pais (Cícera Martins e Luciano José de França) e à minha querida esposa (Débora Raquel dos Santos Ferreira França), pessoas que fizeram de tudo para a realização deste sonho. Esta vitória é fruto de todos os momentos que me motivaram a seguir em frente e daqueles que acreditaram na minha capacidade.

E disse Deus: Produza a terra erva verde, erva que dê semente, árvore frutífera que dê fruto segundo a sua espécie, cuja semente esteja nela sobre a terra. E assim foi.

Gênesis 1:11.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas suas misericórdias para comigo, por ter me concedido a vida, por todas as bênçãos e valiosas oportunidades, por me dar saúde e a minha família, por ser sempre a luz dos meus caminhos. Obrigado Deus, por mais uma conquista!

Aos meus pais, Cícera Martins de França e Luciano José de França, por todo apoio, educação, humildade e respeito. Vocês merecem o mérito dessa conquista, sou eternamente grato.

Aos meus irmãos Cintia Luciely, Lucivânia, Germanio e Gerlândio, que nunca mediram esforços para me ajudar, principalmente nos momentos mais difíceis. São exemplos de seres humanos para mim.

À minha querida esposa, amiga e companheira Débora Raquel, pessoa incrível, que sempre esteve ao meu lado, cuidando de mim e colaborando muito com a minha formação. Te amo de verdade! Agradeço aos seus pais Francisco e Raquel pelo apoio e todo carinho, sem dúvidas tiveram participação especial em minha vida.

Aos meus sobrinhos que amo tanto Ludimyla, Keven e Raquel, formando minha família, motivo de continuar e enfrentar todas as batalhas. À minha família inteira – avós, tios (as), primos (as), padrinhos (as) pelo apoio e torcida por mim. Pelas palavras de motivação nos momentos difíceis e pelos momentos de alegria que vocês me proporcionaram.

Agradeço a toda família Filadélfia Pentecostal Independente, em especial aos irmãos das congregações Jatobá I e Vista da Serra. Agradeço pelo carinho, respeito e pelas orações em meu favor. Deus abençoe todos.

Ao professor orientador Antonio Lucineudo de Oliveira Freire, por toda confiança, atenção e conhecimentos repassados, orientação durante toda a pós-graduação e na realização deste trabalho, pelos conselhos e principalmente pelo grande amigo que sempre foi.

À coorientadora Profa. Dra. Cheila Deisy Ferreira pelas ricas sugestões e esforços dedicados ao longo de estudo. Aos membros da banca examinadora, Profa. Dra. Ivonete Alves Bakke e Profa. Dra. Angeline Maria da Silva Santos, pela disponibilidade e por todas as contribuições para o enriquecimento deste trabalho.

A todos os professores do PPGCF/UFCG, que sem dúvidas fizeram parte da minha formação. Gratidão e respeito eternamente por todos. À minha turma de mestrado, juntos vivenciamos momentos de alegria, aprendizado e muita luta.

A todos os funcionários e amigos da UFCG, *Campus Patos*, que contribuíram direta ou indiretamente na minha formação.

Agradeço ao Projeto MAI/DAI Nº 68/2020, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de estudos. À APCE-RN Associação de Produtores de Caulim e outros Minérios de Equador e às empresas Caulim e Caiçara e Carvão Vegetal Ipueira, pela recepção e doação dos materiais para constituição dos substratos.

A todos, minha eterna gratidão!

RESUMO

FRANÇA, George Martins de. **Uso do biochar e de resíduos de caulim visando mitigar os efeitos do déficit hídrico em mudas de jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poiret).** 2025. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Saúde e Tecnologia Rural, Patos, PB. 2025.

A região semiárida é caracterizada pela potencialidade de recursos naturais, a exemplo de madeira para fins energéticos, comumente utilizada na produção de carvão vegetal, porém gerando resíduos (pó do carvão) que na maioria das vezes não são utilizados. Destaca-se também a riqueza de minerais, dentre estes, o caulim, cuja exploração proporciona impactos ambientais diversos, com o acúmulo de pilhas de rejeitos. Alternativas que amenizem esses impactos supracitados, podem ser adotadas, como dar utilidade aos rejeitos oriundos de ambas os processos produtivos. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de uso do rejeito de caulim e do biochar na composição do substrato e seus efeitos nas trocas gasosas, crescimento e qualidade de mudas de jurema-preta, sem e com déficit hídrico. Os materiais usados na produção dos substratos foram solo (S), esterco bovino (EB), rejeito de caulim (RC) e biochar (B). O experimento foi conduzido em ambiente telado localizado no Viveiro Florestal, pertencente ao Centro de Saúde e Tecnologia Rural (CSTR/UFCG), sendo distribuído em delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), esquema fatorial 4 x 2, correspondendo a quatro substratos [**S1**: S (75%) + EB (25%); **S2**: S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3**: S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4**: S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%)] e dois regimes hídricos [(sem déficit hídrico (80% cv) e com déficit hídrico (40% cv)], com quatro repetições, totalizando 32 parcelas. Aos 120 dias após início dos tratamentos foram avaliados os parâmetros condutância estomática (g_s), taxa de transpiração (E), taxa de fotossíntese (A), concentração interna de CO_2 (C_i), eficiência no uso da água (EUA), eficiência de carboxilação (A/C_i), teor relativo de água (TRA), potencial hídrico foliar (Ψ_w), altura das mudas, taxa de crescimento absoluto (TCA), diâmetro do caule, razão altura/diâmetro (RAD), produção de biomassa e Índice de qualidade das mudas (IQD). Verificou-se que, independente do substrato utilizado, o déficit hídrico afetou negativamente as trocas gasosas, crescimento, produção de biomassa e a qualidade das mudas. Contudo, o substrato contendo solo, esterco bovino e biochar favoreceu as trocas gasosas, enquanto que o composto por solo, esterco bovino e rejeito de caulim proporcionou maior crescimento e produção de biomassa, independente da condição hídrica imposta. A adição de rejeito de caulim ao solo e esterco bovino possibilitou maior produção de biomassa das mudas submetidas às duas condições hídricas (sem ou com déficit hídrico). Recomenda-se utilizar o substrato S4, pois contém maior concentração de rejeito de caulim (30%) em substituição ao solo, somado ao esterco bovino e biochar.

Palavras-chave: Caatinga; estresse hídrico; rejeitos de mineração; trocas gasosas.

ABSTRACT

FRANÇA, George Martins de. **Use of biochar and kaolin residues to mitigate the water deficit effects on *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poiret seedlings.** 2025. 78f. Dissertation (Master in Forest Sciences) – Federal University of Campina Grande, Center for Health and Rural Technology, Patos, PB. 2025.

The semi-arid region is characterized by the potential of natural resources, such as wood for energy purposes, commonly used in the production of charcoal, but generating waste (charcoal dust) that is often not used. The wealth of minerals also stands out, including kaolin, the exploitation of which causes diverse environmental impacts, with the accumulation of piles of waste. Alternatives that mitigate these aforementioned impacts can be adopted, such as making use of waste from both production processes. In this context, this work aimed to evaluate the potential use of kaolin residue and biochar in substrate composition, and their effects on gas exchange, growth and quality of black jurema (*Mimosa tenuiflora*) seedlings, under both water deficit and non-deficit. The materials used in the production of the substrates were soil (S), cattle manure (CM), kaolin residue (KR), and biochar (B). The experiment was conducted in a shaded environment at the Forest Nursery of the Center for Health and Rural Technology (CSTR/UFCG), and was arranged in a completely randomized design (CRD), 4 x 2 factorial scheme, corresponding to four substrates [S1: S (75%) + CM (25%); S2: S (60%) + KR (15%) + CM (25%); S3: S (60%) + KR (15%) + B (25%); S4: S (45%) + KR (30%) + CM (15%) + B (10%)] and two water regimes [(without water deficit (80% cv) and with water deficit (40% cv)], with four replicates, totaling 32 plots. At 120 days after the start of treatments, were evaluated: stomatal conductance (g_s), transpiration rate (E), photosynthesis rate (A), internal CO_2 concentration (C_i), water use efficiency (WUE), carboxylation efficiency (A/C_i), relative water content (RWC), leaf water potential (Ψ_w), seedling height, absolute growth rate (AGR), stem diameter, height/diameter ratio (HDR), biomass production and seedling quality index (SQI). It was found that, regardless of the substrate used, water deficit negatively affected gas exchange, growth, biomass production and seedling quality. However, the substrate containing soil, cattle manure and biochar favored gas exchange, while the compound composed of soil, cattle manure and kaolin residue provided greater growth and biomass production, regardless of the imposed water condition. The addition of kaolin residue to the soil and cattle manure enabled greater biomass production of seedlings subjected to both water conditions (water deficit or non-deficit). It is recommended to use substrate S4, as it contains a higher concentration of kaolin residue (30%) to replace soil, combined with cattle manure and biochar.

Keywords: Caatinga; gas exchange; mining residue; water stress.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delimitações do bioma Caatinga dentro do Semiárido brasileiro e distribuição da Jurema-preta dentro da Caatinga.....	16
Figura 2 – Mapa de localização onde foi conduzido o experimento.....	26
Figura 3 – Aspecto das pilhas de rejeito de caulim e respectiva coleta do material...	28
Figura 4 – Fornos utilizados na carbonização e aspectos do local.....	28
Figura 5 – Ilustração da pesagem dos sacos para o controle dos regimes hídricos.	30
Figura 6 – Análise dos parâmetros estomáticos das mudas de jurema-preta ao 120 DAE em função dos quatro substratos e dos dois regimes hídricos utilizados....	30
Figura 7 – Avaliação de altura inicial (30 DAE), altura final (120 DAE) e diâmetro do caule (120 DAE) das mudas de jurema-preta em função dos quatro substratos e dos dois regimes hídricos utilizados.....	31
Figura 8 – Potencial hídrico foliar (ψ_w) das mudas de jurema-preta ao 120 DAE em função da interação substratos e regimes hídricos.....	35
Figura 9 – Condutância estomática (g_s) das mudas de jurema preta aos 120 DAE em função dos substratos.....	37
Figura 10 – Taxa de transpiração (E) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos quatro substratos.....	37
Figura 11 – Taxa de fotossíntese (A) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos.....	38
Figura 12 – Concentração Interna de CO_2 (C_i) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos.....	39
Figura 13 – Eficiência no Uso da Água (EUA) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função da interação substratos e regimes hídricos.....	40
Figura 14 – Eficiência de Carboxilação (A/C_i) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos.....	41
Figura 15 – Altura das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos (A) e dos regimes hídricos (B).....	42
Figura 16 – Taxa de Crescimento Absoluto (TCA) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos (A) e dos regimes hídricos (B).....	43
Figura 17 – Diâmetro das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos (A) e dos regimes hídricos (B).....	44

Figura 18 – Massa seca da parte aérea (<i>MSPA</i>) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função da interação substratos e regimes hídricos.....	46
Figura 19 – Massa seca das raízes (<i>MSR</i>) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função da interação substratos e regimes hídricos (B) e da interação.....	47
Figura 20 – Razão parte aérea/raiz (<i>RPAR</i>) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos.....	47
Figura 21 – Massa seca total (<i>MSTt</i>) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função da interação substratos e regimes hídricos.....	48
Figura 22 – Razão Altura/ Diâmetro (<i>RAD</i>) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos (A) e dos regimes hídricos (B).....	50
Figura 23 – Índice de Qualidade de Dickson (<i>IQD</i>) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos (A) e dos regimes hídricos (B).....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição dos substratos e níveis dos regimes hídricos.....	27
Tabela 2 – Características químicas do rejeito de caulim e do biochar	29
Tabela 3 – Resumo da análise de variância (valores de $F_{\text{calculado}}$) do Teor Relativo de Água (TRA) e Potencial Hídrico Foliar (ψ_w) das mudas de jurema-preta	34
Tabela 4 – Resumo da análise de variância (valores de $F_{\text{calculado}}$) da Condutância Estomática (g_s), Taxa de transpiração (E), Taxa de fotossíntese (A), Eficiência no Uso da água (EU_{Ai}) e Eficiência de Carboxilação (A/C_i) das mudas de jurema-preta.....	36
Tabela 5 – Resumo da análise de variância da Altura de plantas, Taxa de Crescimento Absoluto (TCA), Diâmetro do caule e Razão Altura/Diâmetro das mudas de jurema-preta.....	42
Tabela 6 – Resumo da análise de variância (valores de $F_{\text{calculado}}$) da massa seca da parte aérea ($MSPA$), massa seca das raízes (MSR), razão parte aérea/raiz ($RPAR$) e massa seca total ($MSTt$) das mudas de jurema-preta.....	45
Tabela 7 – Resumo da análise de variância (Valores de $F_{\text{calculado}}$) da Razão Altura/Diâmetro (RAD) e do Índice de Qualidade de Dickson (IQD) das mudas de jurema-preta.....	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
3.1 JUREMA-PRETA (<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poiret)	16
3.2 CONDIÇÕES HÍDRICAS ADVERSAS E SEUS REFLEXOS NAS PLANTAS...	18
3.3 SUBSTRATOS E A QUALIDADE DE MUDAS DE ESPÉCIES FLORESTAIS..	20
3.3.1 Caulim.....	23
3.3.2 Biochar.....	24
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
4.1 LOCAL DA PESQUISA.....	26
4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS.....	27
4.3 OBTENÇÃO E PREPARO DOS CONSTITUINTES PARA FORMULAÇÃO DOS SUBSTRATOS.....	27
4.4 QUEBRA DE DORMÊNCIA E SEMEADURA.....	29
4.5 PARÂMETROS AVALIADOS.....	30
4.5.1 Trocas gasosas.....	30
4.5.2 Avaliações de crescimento.....	31
4.5.3 <i>Status</i> hídrico das mudas.....	32
4.5.4 Massa seca e qualidade das mudas.....	32
4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
5.1 <i>STATUS</i> HÍDRICO DAS MUDAS.....	34
5.2 COMPORTAMENTO ESTOMÁTICO.....	36
5.3 CRESCIMENTO, PRODUÇÃO DE BIOMASSA E QUALIDADE DAS MUDAS.....	41
6 CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS.....	54
APÊNDICES.....	70

1 INTRODUÇÃO

O Bioma Caatinga abrange quase em sua totalidade a região semiárida, sendo exclusivamente brasileiro, atingindo área de 912.529 Km² (Tabarelli *et al.*, 2018), correspondendo a cerca de 70% da região Nordeste e 13% do território nacional (Souza *et al.*, 2016), caracterizado pelo clima tropical semiárido quente (Instituto Brasileiro de Florestas, 2020).

Arelado à essa condição climática, a disponibilidade de água se constitui em um fator limitante para o crescimento das plantas, notadamente, a produção e desenvolvimento de mudas florestais. Esse problema tem se agravado devido às mudanças climáticas, que além de afetar a biodiversidade, tem acelerado processos de desertificação, devido à diminuição da evapotranspiração e, conseqüentemente, a diminuição das chuvas nas terras secas, entre outros fatores correlatos (Tavares; Arruda; Silva, 2019).

Dessa forma, a busca por espécies florestais nativas que possibilitem o reflorestamento e que melhorem as condições físicas e químicas em áreas desmatadas é fundamental. Uma alternativa pode ser o plantio da jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.), espécie da família Fabaceae, reconhecidamente como resistente à seca (Flora e Funga do Brasil, 2023). É uma planta predominantemente da região semiárida do Nordeste do Brasil, além de ser pioneira, possui uso múltiplo e elevada capacidade de se desenvolver em ambientes semiáridos e degradados (Bezerra *et al.*, 2011; Azevêdo *et al.*, 2012; Roque; Loiola, 2013).

No entanto, na procura de alternativas que possibilitem a sobrevivência das plantas em campo após o transplante, o uso do substrato que possibilite a obtenção de mudas de qualidade, capazes de suportar as adversidades no campo assume uma importância fundamental. Porém, dependendo do material utilizado na sua composição, seu custo impacta no valor das mudas.

Nesse contexto, o uso de subprodutos da extração de minerais pode ser uma alternativa, a exemplo do caulim, um minério composto de silicatos hidratados de alumínio, utilizado na fabricação de papel, cerâmica, tintas, entre outros (Silva *et al.*, 2021). Porém, sua extração gera sérios problemas aos ecossistemas devido ao acúmulo dos seus resíduos no meio ambiente. Assim, é necessário pesquisar formas de utilização desses resíduos, como na composição de substrato para a produção de

mudas florestais, reduzindo assim, os impactos dessa acumulação e a degradação do solo.

Com a possibilidade de utilização do rejeito de caulim no intuito de produzir mudas de qualidade, a adição de subprodutos oriundos da extração de diferentes recursos, a exemplo do biochar. Este resíduo é o resultado da pirólise de biomassa vegetal e/ou animal, sob baixo suprimento de oxigênio, cujo aproveitamento ainda é pouco explorado. A sua adição ao substrato se apresenta como uma alternativa sustentável, em virtude de mesmo sua contribuição na melhoria das características físicas e químicas do substrato (Costa *et al.*, 2019).

Esse biocarvão tem possibilidade de reter água e nutrientes em sua matriz e liberá-los de forma equilibrada para as mudas (Maia *et al.*, 2021a). Assim, haverá aumento da disponibilidade de nutriente e, incremento na atividade microbiana favorecendo o crescimento das plantas. Além disso, o biochar proporciona aumento na retenção de umidade, resultando em diminuição na quantidade de água utilizada durante a fase de viveiro. Acrescenta-se ainda que reduz os custos na compra de outros insumos, uma vez que o biochar pode ser obtido por preços menos elevados, atendendo dessa forma, a minimização dos impactos ambientais e econômicos, fatores essenciais em empreendimentos florestais.

Tais características demonstram que pelo menos 5 dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS's) previstos na Agenda 2030, estão relacionados ao tema do presente estudo: Indústria, inovação e infraestrutura (9), Cidades e Comunidades Sustentáveis (11), Consumo e Produção Responsáveis (12), Ação contra a Mudança Global do Clima (13) e Vida terrestre (15). Isso traz uma importância maior no que se refere à utilização de resíduos na produção de mudas florestais, tornando-se desafiador o comprometimento em prol do meio ambiente.

Assim, em virtude da importância para o desenvolvimento sustentável, a possibilidade do uso do rejeito de caulim e do biochar, ou da combinação de ambos, na produção de mudas de espécies florestais da caatinga, surgiram alguns questionamentos: (a) Qual o potencial de uso do rejeito de caulim e do biochar na composição do substrato para mudas de essências florestais? (b) De que maneira esses materiais podem contribuir na qualidade de mudas de *M. tenuiflora* mantidas em condições hídricas adversas?

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar a qualidade de mudas de *M. tenuiflora* em função dos substratos e dos regimes hídricos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

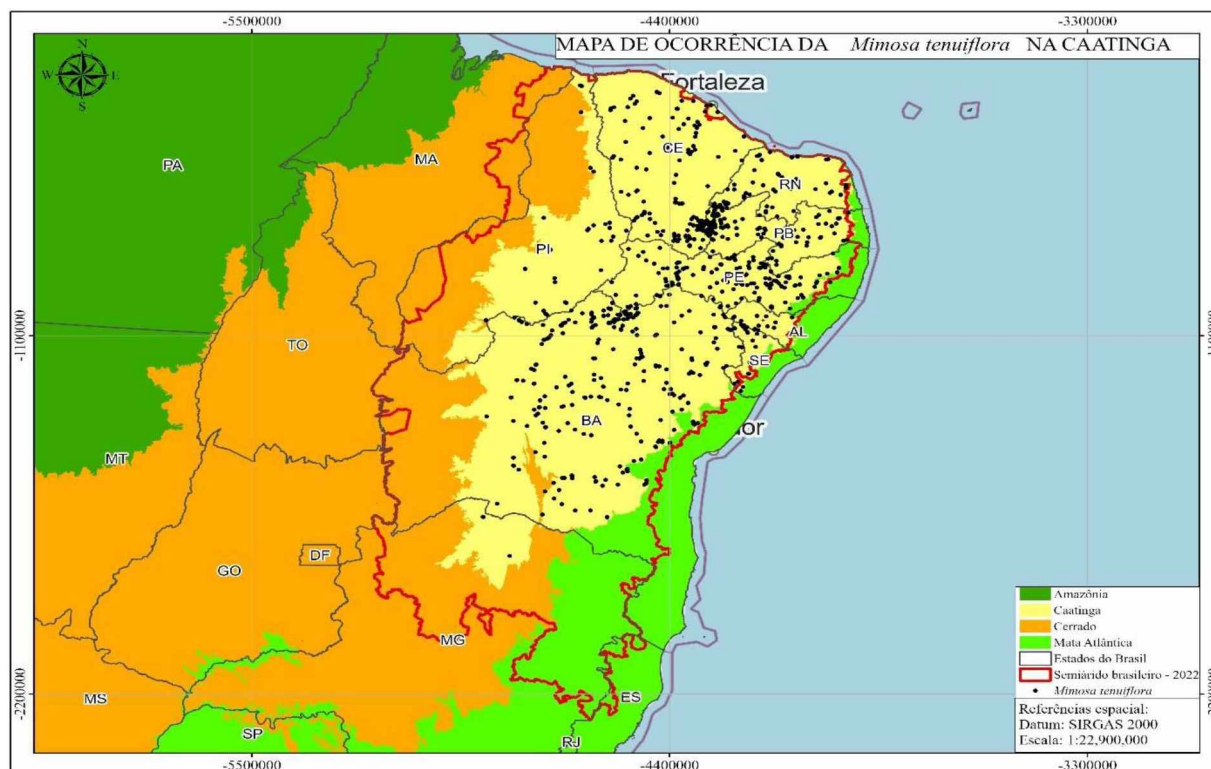
- Avaliar o potencial do uso do rejeito de caulim e do biochar na composição de substrato para a produção de mudas de *M. tenuiflora*;
- Analisar os efeitos desses materiais no crescimento e parâmetros morfológicos das mudas;
- Aferir o comportamento fisiológico de mudas de *M. tenuiflora*, mantidas em condições hídricas adversas, produzidas com substrato contendo rejeito de caulim e biochar;
- Verificar o potencial do uso do rejeito de caulim e do biochar na mitigação dos efeitos do déficit hídrico em mudas de *M. tenuiflora*.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 JUREMA-PRETA (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.)

A *Mimosa tenuiflora*, conhecida popularmente como jurema-preta, pertence à família Fabaceae, apresenta ocorrências confirmadas na região Nordeste distribuindo-se nos estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte, Sergipe e também na região Sudeste no estado de Minas Gerais, onde a região semiárida se faz presente (Flora e Funga do Brasil, 2023).

Figura 1 – Delimitações do bioma Caatinga dentro do Semiárido brasileiro e distribuição da Jurema-preta dentro da Caatinga.



Fonte – Dados da pesquisa (2025).

É uma espécie pioneira e nativa que apresenta rápido crescimento, com sua madeira muito utilizada para retirada de lenha, produção de carvão vegetal e confecção de cercados (Calegari *et al.*, 2021). Essa espécie é conhecida na Caatinga pela presença de espinhos em seus ramos, e por florescer em diferentes meses do ano, como resposta à umidade favorecida pela ocorrência de chuvas, mesmo fora do período chuvoso (Santisteban *et al.*, 2019).

Esses autores ainda destacam a presença de inflorescências reunidas em espigas, formadas por flores brancas, pequenas e suavemente perfumadas, fornecendo recursos florais, pólen e néctar, para muitas espécies de abelhas nativas e outros insetos, fator importante para a manutenção da biodiversidade e funcionamento do ecossistema.

Possui sistema radicular profundo, o que possibilita a sua ocupação inicial e secundária de áreas degradadas onde o solo se encontra erodido e exposto (Azevêdo *et al.*, 2012), confirmando a rusticidade das plântulas dessa espécie. Nestas condições, podem se estabelecer em agrupamentos, como uma estratégia de sobrevivência às condições climáticas adversas (Ferreira *et al.*, 2020).

Diante disso, verifica-se que a jurema preta é de grande importância, pois de acordo com Delarmelina *et al.* (2014), para recuperação de áreas degradadas, de uma maneira geral, recomendam-se espécies de rápido crescimento, rústicas e fixadoras de nitrogênio, e tais características são amplamente encontradas na *M. tenuiflora*. França *et al.* (2023) destacam a possibilidade da utilização dessa espécie para recuperar áreas salinizadas, mesmo havendo reduções em altura, diâmetro e na produção de massa seca, proporcionadas pelo aumento da salinidade na solução.

Na produção de extratos tânicos, apesar dos teores serem inferiores aos obtidos na acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.), a jurema-preta apresenta potencial para tal finalidade (Calegari *et al.*, 2021). Para fins farmacológicos (Roque; Loiola, 2013), ressaltam o uso por algumas comunidades rurais, sendo retirados extratos etanólicos a partir de suas cascas. Bezerra *et al.* (2011), também confirmam a sua atividade antimicrobiana e o seu potencial terapêutico.

Alves e Freire (2019) relataram que as mudas de *M. tenuiflora* respondem rapidamente à suspensão da irrigação, promovendo o fechamento dos estômatos, reduzindo à condutância estomática, taxa de transpiração e fotossíntese. Já Macedo *et al.* (2022) observaram em plantios homogêneos de *M. tenuiflora*, um bom estoque de serapilheira em um curto espaço de tempo, com boa capacidade de retenção hídrica, sendo uma condicionante fundamental para o desenvolvimento dos processos de restauração, pois a umidade é fundamental para a germinação, estabelecimento e o crescimento de plantas (Mateus *et al.*, 2013).

3.2 CONDIÇÕES HÍDRICAS ADVERSAS E SEUS REFLEXOS NAS PLANTAS

A água é um dos fatores abióticos mais importantes para as plantas, em especial para as submetidas a períodos de déficit hídrico do solo durante seu ciclo de vida (França *et al.*, 2022). Diante disso, selecionar espécies tolerantes ao déficit hídrico, possibilita maior segurança na renda para os produtores rurais de ambientes semiáridos (Matos *et al.*, 2018).

Segundo França *et al.* (2022), a forma com que as plantas toleram a baixa disponibilidade de água no solo, é fator primordial para o seu crescimento e estabelecimento em regiões com problema de seca frequente. No que se refere à disponibilidade, as plantas podem sofrer danos tanto por excesso, como por falta de água (Sá *et al.*, 2023), e que a ocorrência de estresse devido à deficiência hídrica é comum, notadamente, em regiões secas, afetando, a produtividade e a sobrevivência das plantas.

A diminuição na disponibilidade da água para as raízes, resulta na redução do potencial hídrico celular e, conseqüentemente, na turgescência das mesmas (França *et al.*, 2022). Quando esse potencial da água é reduzido nas raízes (Scalon *et al.*, 2011), afirmaram que várias espécies ajustam rapidamente o potencial osmótico, auxiliando o restabelecimento da pressão de turgor e permitindo a manutenção do alongamento celular.

A manutenção de um balanço hídrico positivo, com máxima absorção de CO₂ e mínima perda de água por transpiração possibilita o desenvolvimento de suas atividades metabólicas e consequente sobrevivência (Larcher, 2006; Marengo; Lopes, 2009; Taiz *et al.*, 2017). Isso é atingido através do controle da abertura dos estômatos, em que as plantas regulam as taxas de transpiração de acordo com as necessidades do seu balanço hídrico (Larcher, 2006). Equilibrar as perdas por transpiração sob alta demanda evaporativa e a absorção de CO₂ se constitui em um grande desafio para as plantas.

De acordo com Scalon *et al.* (2011), além de efeitos nas raízes, o déficit de água normalmente leva a uma diminuição da taxa de fotossintética, embora os níveis de tolerância possam variar para diferentes espécies vegetais. Os autores supracitados afirmam que essa redução da taxa fotossintética é resultante do fechamento estomático, ocasionando uma resistência maior do mesófilo, provocando

a menor eficiência da rubisco, restringindo a absorção de CO₂ nos cloroplastos e aumentando a sua ação oxigenase e, em consequência, a fotorrespiração.

Reduções em alguns parâmetros, a exemplo do déficit hídrico, têm sido relatadas para diferentes espécies, como na condutância estomática, taxa de transpiração e de fotossíntese, a exemplo de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos (Dombroski *et al.*, 2014; Pessoa; Freire; Costa, 2017), *Cnidocolus quercifolius* Pohl (Ramos; Freire, 2019), *M. tenuiflora* (Alves; Freire, 2019; Almeida *et al.*, 2020) e *Astronium urundeuva* (M.Allemão) Engl. (Almeida *et al.*, 2020), onde os resultados variaram de acordo com a espécie estudada, assim como, com a intensidade do estresse hídrico imposto.

Entretanto, os efeitos do estresse hídrico na fotossíntese não se limitam apenas a fatores estomáticos, mas também a aspectos não estomáticos, como o comprometimento da fotoquímica do fotossistema II (PSII) em decorrência da incapacidade do aceptor primário de elétrons quinona (QA) de se oxidar completamente (Tòth *et al.*, 2007) ou da diminuição no transporte de elétrons da plastoquinona para o PS I (Panda *et al.*, 2006; Tòth *et al.*, 2007), contribuindo para o decréscimo na fotossíntese.

Sabe-se que, de forma geral, a baixa disponibilidade de água no solo ocasiona diversas alterações morfológicas e fisiológicas nas plantas, interferindo em vários processos metabólicos essenciais à vida das plantas (Pinheiro; Chaves, 2011). Para Slamani *et al.* (2022), além dessas alterações fisiológicas, afetam diretamente o crescimento e o desenvolvimento. Sob déficit hídrico, podem ocorrer alterações bioquímicas nas plantas, a exemplo do estresse oxidativo em razão da produção de altas concentrações de espécies reativas de oxigênio (EROs), causando danos às organelas celulares e à integridade da membrana (Benadjaoud *et al.*, 2022).

Dentre as formas de EROs encontrados nas células vegetais estão radicais superóxido (O₂⁻), radicais hidroxila (OH⁻), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), oxigênio singleto (¹O₂) e óxido nítrico (NO), cuja acumulação pode resultar em peroxidação lipídica, fragmentação do DNA, oxidação de diferentes moléculas e morte celular (Ahanger *et al.*, 2017; Nxele; Klein; Ndimba, 2017; Schneider; Caverzan; Chavarria, 2019).

Como estratégias de tolerância a baixos potenciais hídricos, as plantas desenvolvem vários mecanismos celulares, dentre os quais está o acúmulo de solutos

osmóticos compatíveis, como prolina e açúcares orgânicos, que possibilitam o ajustamento osmótico (Chen; Jiang, 2010) e, dessa forma, garantem a absorção de água. Além disso, podem produzir vários reguladores de crescimento para tolerância à seca, como ácido salicílico, ácido giberélico, citocinina e ácido abscísico (Ahanger *et al.*, 2014) e, para que consigam eliminar as formas de EROs acumuladas, as células produzem vários antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos (Hussain *et al.*, 2019).

3.3 SUBSTRATOS E A QUALIDADE DE MUDAS DE ESPÉCIES FLORESTAIS

Para mitigar as consequências negativas desse estresse abiótico nas mudas, várias estratégias podem ser usadas, a exemplo da qualidade do substrato no qual elas se desenvolvem. Aspectos como melhorias na agregação, aeração, permeabilidade, capacidade de retenção de água, transporte e disponibilidade de nutrientes devem ser levados em consideração quando da escolha do substrato ideal.

Tais características influenciam na qualidade das mudas, pois de acordo com Ramos, Freire e França (2021), dentre os fatores que interferem está a disponibilidade hídrica e a nutrição mineral. Assim, a composição do substrato é um fator que também influencia na qualidade das mudas formadas, devendo fornecer suporte físico ao sistema radicular e condições para suprir adequadamente a demanda hídrica e nutricional da muda (Siqueira *et al.*, 2018).

O substrato tem a função de além de sustentar e fornecer condições adequadas para as mudas, suprimindo os requisitos nutricionais necessários para seu crescimento e desenvolvimento inicial, possibilita maior sobrevivência em campo, para resistir aos estresses ambientais (Kratz; Wendling, 2016; Jesus *et al.*, 2019). Assim, o desenvolvimento das mudas é influenciado pelo tipo de substrato, em que, dependendo de suas características físico-químicas e biológicas, proporciona melhores condições de umidade e disponibilidade de nutrientes (Barreto *et al.*, 2018).

Geralmente os substratos comerciais tendem a conter em sua composição atributos que favorecem o desenvolvimento das mudas, porém a escolha desse material tende a aumentar os custos de produção (Ibrahim *et al.*, 2019). Para Silva *et al.* (2020), essas condições fornecidas pelo substrato utilizado, estão diretamente relacionadas ao sucesso obtido na produção de mudas florestais.

Esse sucesso é fundamental, pois atualmente as florestas nativas vêm sofrendo forte degradação ambiental devido aos desmatamentos, resultante de fatores como retirada ilegal da madeira, aumento nas áreas de pastagem para produção agropecuária (Nascimento, 2022). Atualmente, acrescenta-se as extensas áreas utilizadas para implementação de usinas eólicas e fotovoltaicas. Com essa intensa devastação das florestas, é fundamental a produção de mudas de espécies florestais nativas, objetivando-se mitigar os impactos ambientais (Delarmelina *et al.*, 2014).

O processo de produção de mudas florestais é uma das etapas mais importantes do sistema produtivo, sendo fundamental no estabelecimento de florestas, na restauração florestal e na recuperação de áreas degradadas (Nascimento, 2022). No entanto, de acordo com Araújo *et al.* (2017), a produção de mudas apresenta restrições em algumas regiões, devido ao alto custo e o difícil acesso a substrato e fertilizantes adequados.

Porém, sabe-se que o substrato é um dos principais insumos utilizados na produção de mudas (Kratz *et al.*, 2013), e que seu custo impacta muito o valor final das mudas. Assim, se faz necessário utilizar materiais renováveis como fonte de nutrientes, sendo uma interessante solução para destinação dos resíduos, reduzindo os altos custos com insumos (Trazzi *et al.*, 2013). Porém, para que esse aproveitamento seja possível, deve-se caracterizar os materiais disponíveis na região e seu valor de aquisição, bem como a adequabilidade de suas características físicas e químicas que irão compor o substrato para produção das mudas (Butzke *et al.*, 2018).

Silva *et al.* (2019) também ressaltam a possibilidade de utilização dos substratos alternativos para produção de mudas de diversas culturas, que podem ser desenvolvidos através da reutilização de rejeitos. Estes materiais geralmente em sua maioria provocam prejuízos ao meio ambiente se descartados erroneamente, assim, sua utilização é de grande importância sob o ponto de vista econômico e ecológico. Assim, a prospecção da utilização de componentes alternativos tem se intensificado devido à crescente demanda por substratos, possibilitando o uso de diferentes resíduos orgânicos na sua composição (Siqueira, 2022).

Existem, na literatura especializada, inúmeros trabalhos visando a utilização de diferentes subprodutos para produção de mudas, a exemplo do estudo de Vieira *et*

al. (2019), que destaca a casca de arroz carbonizada como uma alternativa economicamente viável para o plantio de aroeira-do-sertão (*A. urundeuva*). Na produção de mudas *Joannesia princeps* Vell., substratos compostos com casca de café carbonizada, foram utilizados com uma alternativa para a destinação dos resíduos dessa produção para o Estado de Minas Gerais (Almeida *et al.*, 2021). Já Alves *et al.* (2021), utilizaram o rejeito de caulim no substrato na produção de mudas de paineira (*Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna).

Rodrigues, Freire e Nascimento Neto (2014) também citam o uso de subprodutos da extração dos minerais na composição de substratos, a exemplo do caulim. Estudos têm demonstrado resultados promissores da utilidade de rejeito de caulim como constituinte de substratos para produção de mudas de algumas espécies vegetais (Alves *et al.*, 2021).

Dos diversos materiais utilizados na composição dos substratos (Freire *et al.*, 2022), citam o uso de compostos orgânicos, como os esterco de animais, resíduos vegetais e de mineração e o próprio carvão vegetal. De acordo com Cavalcante *et al.* (2012), dentre os produtos com potencial de uso como substrato, destaca-se o biochar. Percebe-se que estudos voltados para o efeito de diferentes composições de substrato sobre a qualidade de mudas são constantes e atuais, buscando sustentabilidade, redução de tempo e de custos do processo produtivo, oferecendo alternativas aos pequenos e médios viveiristas e produtores (Butzke *et al.*, 2018; Siqueira *et al.*, 2018).

Diante desse notório aumento na produção de mudas de espécies florestais, a qualidade das mesmas tem se constituído em desafio constante para atender essa crescente demanda por matéria prima florestal (Ramos; Freire; França, 2021). Segundo Gomes *et al.* (2019), parâmetros morfológicos são utilizados para caracterizar a qualidade de mudas florestais, destacando-se a altura, diâmetro de colo, relação altura sobre diâmetro, massa aérea, radicular e total.

No entanto, apesar de bons resultados obtidos em tais parâmetros avaliados utilizando-se substratos compostos por resíduos, Toledo *et al.* (2015), ressaltam que são necessários mais estudos, devido a complexibilidade, e oferta desses materiais aliada a diversidade e possibilidades de combinações entre eles.

3.3.1 Caulim

O caulim é um minério composto de silicatos hidratados de alumínio, como a caulinita e a haloisita, que apresenta características especiais, permitindo a sua utilização em diversos processos industriais, como na fabricação de papel, cerâmica, tintas, entre outros (Silva *et al.*, 2021). Ainda segundo os mesmos autores, o caulim é um dos seis minerais mais abundantes da crosta terrestre, apresentando cor branca ou quase branca, devido ao seu baixo teor de óxido de ferro.

Dentre as atividades mineradoras, a extração e industrialização do caulim, caracteriza-se pelo expressivo volume de resíduos ou subprodutos que se produz, desencadeando a poluição e outros problemas ambientais (Alves *et al.*, 2021). Assim, são necessárias alternativas visando o aproveitamento desse rejeito, iniciando pela sua utilização na composição de substratos, sendo esta uma ferramenta viável, resultando em diminuição dos impactos ambientais gerados pelo descarte desse material (Melo, 2019a).

Na literatura, verifica-se que a proporção adequada de rejeito de caulim no substrato, varia de acordo com a espécie utilizada. Na produção de porta-enxertos de gravioleira (*Annona muricata* L.), Campos *et al.* (2008), verificaram efeito positivo no índice de velocidade de emergência, altura e o número de folhas, quando adicionado rejeito de caulim na proporção de até 40% (v v⁻¹). Pereira *et al.* (2008), destacaram o efeito positivo do emprego de 22% (v v⁻¹) do rejeito de caulim no substrato, para plantas de mamoeiro (*Carica papaya* L.), pois em resposta a esse material verificaram incremento do diâmetro do colo, altura e matéria seca da parte aérea.

O emprego de até 20% de rejeito de caulim na composição de substrato contendo terra de subsolo, areia lavada e esterco bovino, em proporções variáveis, não resultaram em efeitos negativos no crescimento de mudas de angico (*Anadenanthera macrocarpa* Brenan) (Alves *et al.*, 2012). Na produção de mudas de (*Genipa americana* L.), (Oliveira *et al.*, 2014) verificaram que a utilização de 60% de rejeito de caulim, com 40% de terra de subsolo, resultou em um substrato que proporcionou melhorias na qualidade das plantas.

Na produção de mudas de (*Carica papaya* L.), foi observado que a substituição de 30% do volume de solo por resíduo de mineração de caulim,

proporcionou produção de massa seca semelhante em mudas produzidas em substrato padrão (Melo *et al.*, 2020). Resultados semelhantes foram obtidos em estudo desenvolvido por Alves *et al.* (2021), em mudas de paineira (*Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna) utilizando substratos com proporções de rejeito de caulim superiores a 30% (v v⁻¹), resultaram em redução no potencial de crescimento, e em menor probabilidade de sucesso após transplântio para o local definitivo de cultivo.

Com base nos resultados destes trabalhos, a quantidade de rejeito de caulim utilizado tem-se demonstrado bastante variável entre as diferentes espécies, evidenciando a necessidade de mais estudos.

3.3.2 Biochar

Biochar ou biocarvão, é o produto sólido da pirólise da biomassa, onde tem sido utilizado há milhares de anos, conhecido também como carvão vegetal, quando produzido a partir de biomassa lenhosa (Weber; Quicker, 2018). Conforme Melo e Silva (2018), biochar é rico em carbono, obtido pela transformação termoquímica de biomassa em condições de baixa oxigenação, resultante da pirólise.

O rendimento da produção de biocarvão é altamente dependente do tipo de pirólise utilizada (Trazzi *et al.*, 2018). Esses autores verificaram que além das condições de pirólise, a exata composição química e estrutural, também é dependente da matéria-prima. Recentemente, esse material tem recebido atenção crescente para uso em diversas aplicações, sendo a mais comum a correção do solo para mitigar a emissão de gases de efeito estufa e melhorar a qualidade do solo (Qian *et al.*, 2015). O biochar para fins florestais não envolve somente seu uso em plantios, mas também em substratos para produção de mudas (Maia *et al.*, 2021a).

Esse material apresenta propriedades que possibilitam seu uso para mitigar os efeitos do estresse hídrico, tais como, capacidade de retenção de água, riqueza em nutrientes, elevada capacidade de troca catiônica e alta porosidade (Ibrahim *et al.*, 2020), além de participar na melhoria da estrutura da comunidade microbiana (Liu *et al.*, 2017; Du *et al.*, 2019). Essas propriedades são desejáveis, pois, além contribuir com a melhoria do substrato, também pode diminuir os custos com irrigação e fertilização (Pimenta *et al.*, 2019).

Assim, o uso do biocarvão como aditivo no solo demonstra ser uma estratégia para a melhoria das condições de desenvolvimento das mudas, uma vez que suas características favorecem a produtividade vegetal (Laurentino, 2021). As possibilidades de seu uso devido as vantagens já conhecidas são muitas e englobam diversas finalidades (Melo, 2019b), haja vista que esse material se destaca como uma alternativa de reaproveitamento de grandes quantidades de resíduos orgânicos gerados da indústria de produção de carvão vegetal (Siqueira, 2022).

Nos estudos desenvolvidos sobre a adição de biochar na composição do substrato para a produção de mudas de espécies florestais, foi verificado que o mesmo melhorou a qualidade de *Corymbia citriodora* (Hook). e *Eucalyptus urophylla* S.T.Blake (Petter *et al.*, 2012), *Tectona grandis* L.F. (Rezende *et al.*, 2016) e *Eucalyptus saligna* Sm. (Silva *et al.*, 2017). Já em trabalho desenvolvido com angico, Lima *et al.* (2016) relataram que a aplicação das doses de biochar e dos macronutrientes N e P não afetaram o crescimento, mas promoveram efeitos positivos sobre a qualidade das mudas, mostrando o potencial de uso do produto.

No entanto, no estudo de Petter *et al.* (2012), ficou evidente que o uso do biocarvão na composição de substratos deve ser utilizado com cautela, pois concentrações acima de 30% inibiram o desenvolvimento morfológico em mudas de *Eucalyptus*. Siqueira (2022), confirma esse valor recomendando-se a adição de 30% de biochar na composição de substratos para produção de mudas de *Tabebuia aurea* e de 20% nas de *H. impetiginosus* e *Pityrocarpa moniliformis* (Benth.) Luckow & R.W.Jobson.

Além da concentração, a qualidade do biocarvão também deve ser analisado, e de acordo com pesquisadores, as principais características para avaliação são: pH, conteúdo de materiais voláteis, teor de cinzas, capacidade de retenção de água, densidade aparente, volume de poros e superfície específica (Trazzi *et al.*, 2018). Apesar do relato de vários estudos demonstrando a possibilidade do uso do biochar, é necessário que mais estudos sejam desenvolvidos, principalmente em relação a matéria prima utilizada na sua produção e à dosagem a ser aplicada (Wang; Wang, 2019).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 LOCAL DA PESQUISA

O experimento foi conduzido em ambiente telado (Figura 2) no Viveiro Florestal da Unidade Acadêmica de Engenharia Florestal, pertencente ao Centro de Saúde e Tecnologia Rural da Universidade Federal de Campina Grande (UAEF/CSTR/UFCG), *Campus de Patos* – PB ($7^{\circ}1'28''$ S e $37^{\circ}16'48''$ O, e 242 m de altitude).

Figura 2 – Mapa de localização onde foi conduzindo o experimento.



Fontes – Google Earth, Dados da pesquisa (2025).

4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O experimento foi distribuído em delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), esquema fatorial 4 x 2, correspondendo a quatro substratos e dois regimes hídricos, com quatro repetições e um vaso por unidade experimental. A aleatorização dos tratamentos foi realizada três vezes por semana, visando reduzir a influência do ambiente.

Na preparação dos substratos foram utilizados terra de subsolo (S), esterco bovino (EB), rejeito de caulim (RC) e biochar (B), em diferentes proporções. Os regimes hídricos (RH) adotados foram 80% da capacidade de vaso (cv) (Sem déficit hídrico – SDH) e 40% cv (Com déficit hídrico – CDH). A combinação dos fatores acima resultou em oito tratamentos, descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição dos substratos e níveis dos regimes hídricos.

Tratamentos	S	EB	B	RC	RH
	-----% (v:v)-----				----% (cv)----
T ₁	75	25	0	0	80
T ₂	75	25	0	0	40
T ₃	60	25	0	15	80
T ₄	60	25	0	15	40
T ₅	60	0	25	15	80
T ₆	60	0	25	15	40
T ₇	45	15	10	30	80
T ₈	45	15	10	30	40

Terra de sub-solo (S); esterco bovino (EB); rejeito de caulim (RC); biochar (B) e regimes hídricos (RH).

Fonte – Dados da pesquisa (2025).

4.3 OBTENÇÃO E PREPARO DOS MATERIAIS PARA A FORMULAÇÃO DOS SUBSTRATOS

O solo utilizado foi proveniente do Núcleo de Pesquisa do Semiárido (NUPEÁRIDO), pertencente ao CSTR/UFCG, sendo coletado entre 0 a 20 cm de profundidade. O rejeito de caulim (RC) foi obtido na Empresa Caulim Caiçara, localizada no município de Equador-RN (Figura 3), enquanto que o Biochar foi

resultado da fragmentação de carvão vegetal a partículas com dimensão máxima entre 20 e 40 mm, proveniente da carbonização da madeira de algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw.) DC., adquirido na Empresa Carvão Vegetal Ipueira, localizada no município de Ipueira-RN (Figura 4).

Figura 3 – Aspectos das pilhas de rejeito de caulim e respectiva coleta do material.



Fonte – Dados da pesquisa (2025).

Figura 4 – Fornos utilizados na carbonização e aspectos do local.



Fonte – Dados da pesquisa (2025).

A análise química do Rejeito de caulim foi realizada no Centro de Referência em Tecnologia Mineral do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN, Currais Novos, RN, enquanto que a do Biochar foi realizada no Laboratório de Tecnologia da Madeira – UFCG/CSTR (Tabela 2). Após a preparação

dos substratos (tratamentos), os mesmos foram colocados em sacos de polietileno preto (28 cm x 12 cm), com capacidade de 5 kg. Foi determinado a capacidade de retenção de água de cada substrato, para a definição da quantidade de água a ser fornecida para que se atinja os regimes hídricos a serem avaliados.

Tabela 2 – Características químicas do rejeito de caulim e do biochar.

Rejeito de Caulim			
Óxidos	%	Elementos	%
SiO ₂	60,51	Si	28,29
Al ₂ O ₃	28,00	Al	14,82
K ₂ O	6,55	K	5,44
Fe ₂ O ₃	1,80	Fe	1,26
CaO	0,09	Ca	0,07
MnO	0,08	Mn	0,06
ZnO	0,03	Zn	0,03
Biochar			
Materiais Voláteis	Teor de Cinzas	Carbono Fixos	
16,42%	7,63%	75,95%	

Fonte – Adaptado aos dados da pesquisa (2025).

4.4 QUEBRA DE DORMÊNCIA DAS SEMENTES E SEMEADURA

As sementes de *M. tenuiflora* foram provenientes de matrizes presentes no Viveiro Florestal do CSTR/UFCG, uniformes quanto ao tamanho e sanidade, desinfestadas com hipoclorito de sódio a 5%, durante 5 minutos e lavadas com água destilada para retirada do excesso do hipoclorito, e posteriormente submetidas à quebra da dormência tegumentar, segundo metodologia de Bakke *et al.* (2006).

Em seguida, foi realizada a semeadura nos sacos (cinco sementes por vaso) e, decorridos 10 dias após a emergência (DAE), procedeu-se o desbaste, deixando-se a plântula mais vigorosa, procurando-se manter a uniformidade entre os sacos, em termos de altura e diâmetro.

A irrigação foi realizada mantendo-se o substrato com teor de umidade próximo a 80% cv até os 30 DAE. Após esse período, tiveram início os regimes hídricos, em que um grupo de mudas foi mantido com teor de umidade a 80% da

capacidade de retenção do substrato (cv) e o outro a 40% cv. O controle do nível de umidade do substrato foi realizado três vezes por semana durante 90 dias (dos 30 aos 120 DAE), através de pesagem em balança analítica com precisão de três casas decimais (Figura 5).

Figura 5 – Ilustração da pesagem dos sacos para controle dos regimes hídricos.



Fonte – Dados da pesquisa (2025).

4.5 PARÂMETROS AVALIADOS

4.5.1 Trocas gasosas

Ao final do experimento (120 DAE) foram avaliados os parâmetros condutância estomática (g_s), taxa de transpiração (E), concentração intercelular de CO_2 (C_i) e taxa de fotossíntese (A), utilizando-se o analisador portátil de fotossíntese LCpro-SD (IRGA) (ADC BioScientific Ltd.) (Figura 6).

Figura 6 – Análise dos parâmetros estomáticos das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos quatro substratos e dos dois regimes hídricos utilizados.



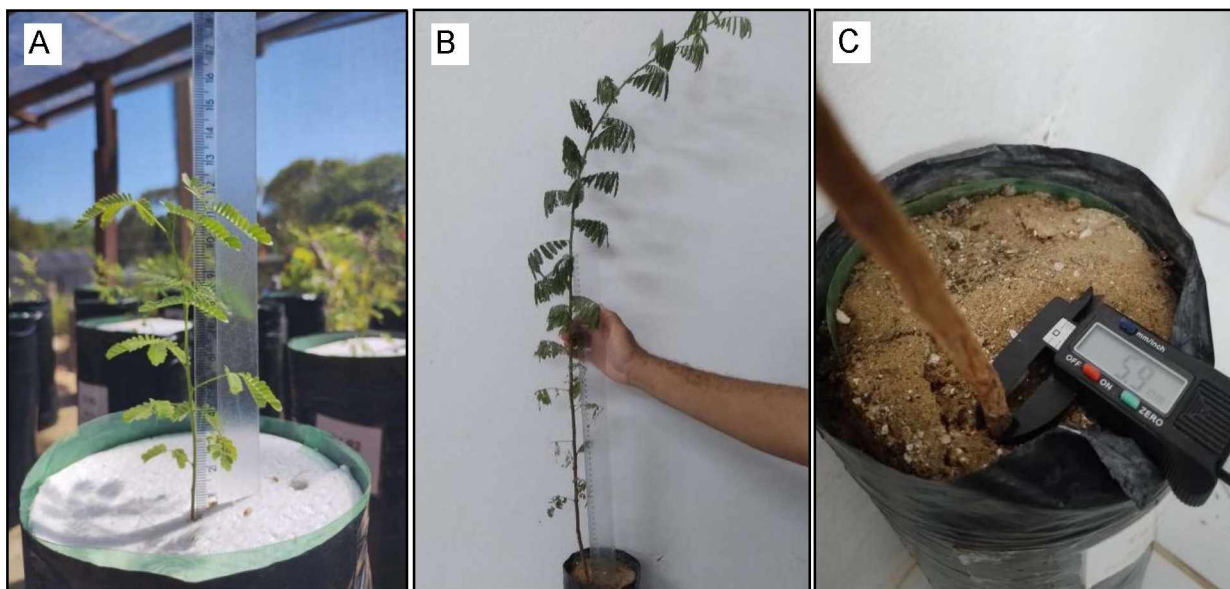
Fonte – Dados da pesquisa (2025).

Essas leituras foram realizadas em folhas completamente expandidas inseridas no segundo ou terceiro nó a partir do ápice das mudas, entre 10:00 e 11:00 horas da manhã, com a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) do equipamento ajustada para $1200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Através dos valores de *A* e *E* foi calculada a eficiência no uso da água (*EUA*) e, pela razão *A/Ci*, a Eficiência de Carboxilação.

4.5.2 Avaliações de crescimento

No início dos regimes hídricos (30 DAE), foi realizada a medição da altura das mudas, com auxílio de régua graduada, correspondendo à altura inicial (Figura 7A). Decorridos 120 (DAE), foi realizada a medição da altura final (Figura 7B), e para medição do diâmetro do caule, foi utilizado paquímetro digital, tomado a 1 cm do nível do substrato (Figura 7C).

Figura 7 – Avaliação de altura inicial (30 DAE), altura final (120 DAE) e diâmetro do caule (120 DAE) das mudas de jurema-preta em função dos quatro substratos e dos dois regimes hídricos utilizados.



Fonte – Dados da pesquisa (2025).

A taxa de crescimento absoluto (*TCA*) e a razão altura/diâmetro (*RAD*) foram calculadas empregando as equações 1 e 2, de acordo com Benincasa (1988):

$$TCA = \frac{AF - AI}{\Delta t} \text{ (cm dia}^{-1}\text{)}$$

Equação (1)

$$RAD = \frac{AF}{D}$$
Equação (2)

Em que: AF e AI correspondem às alturas no início e no final dos regimes hídricos respectivamente, Δt corresponde ao intervalo de tempo entre as medições e D: diâmetro do coleto no final do experimento.

4.5.3 Status hídrico das mudas

- Teor relativo de água (TRA)

Para a determinação do TRA, duas folhas por repetição foram colhidas, levadas ao Laboratório de Fisiologia Vegetal do CSTR/UFCG e submetidas à pesagem para a determinação da massa fresca (MF), colocadas em placas de Petri, sob folha de papel de filtro embebidas em água e mantidas em refrigerador (5°C) por 72 horas. Decorrido esse período, foram retiradas e secas levemente com papel absorvente e pesadas, obtendo-se a massa túrgida (MT), levadas para secagem em estufa à temperatura de 65 °C, durante 72 horas, e submetidas à pesagem para a determinação da massa seca (MS). O teor relativo de água foi calculado de acordo com a equação 3:

$$TRA = \frac{MF-MS}{MT-MS} \times 100$$
Equação (3)

Em que: MF: massa fresca (g); MT: massa túrgida (g); e MS: massa seca.

- Potencial hídrico foliar (Ψ_w)

A determinação foi realizada entre 09:00 e 11:00 horas da manhã, em folhas completamente expandidas e com bom estado fitossanitário utilizando-se a bomba de pressão tipo Scholander, (Turner, 1981).

4.5.4 Massa seca e qualidade das mudas

As plantas foram colhidas, tendo os seus componentes separados (folhas, caule e raízes) e colocados em sacos de papel para secagem em estufa ($\pm 65^\circ \text{C}^\circ$),

durante 3 dias, com posterior pesagem para a determinação das massas secas do caule, das folhas, das raízes, da parte aérea e total.

A qualidade das mudas foi avaliada pelo Índice de Qualidade de Dickson segundo Dickson, Leaf e Hosner (1960), através da equação a seguir:

$$IQD = \frac{MST}{RAD + RPAR} \quad \text{Equação (4)}$$

MT: massa seca total; *RPAR*: razão massa seca da parte aérea/massa seca das raízes.

4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados foram analisados de acordo com a técnica de Análise de Variância pelo teste F. As médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância, utilizando-se o Software ASSISTAT 7.7 (Silva; Azevedo, 2002).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 STATUS HÍDRICO DAS MUDAS

Não foi detectado efeito significativo dos substratos e dos regimes hídricos no *TRA* das mudas (Tabela 3), indicando a independência entre os fatores nesse **parâmetro**. Para o ψ_w , verificou-se variações no estado hídrico foliar das mudas, atingindo efeitos significativos entre os substratos e na interação com os regimes hídricos. Já para o fator regime hídrico, de acordo com análise de variância (Tabela 3), observou-se o mesmo comportamento apresentado no *TRA*, não diferindo independente do substrato utilizado.

Tabela 3 – Resumo da análise de variância (valores de $F_{\text{calculado}}$) do Teor Relativo de Água (*TRA*) e Potencial Hídrico Foliar (ψ_w) das mudas de jurema-preta.

F.V.	<i>TRA</i>	ψ_w
Substratos	2,5345 ^{ns}	4,4141 [*]
Regimes Hídricos	0,5500 ^{ns}	1,7379 ^{ns}
Substratos x Regimes Hídricos	0,2236 ^{ns}	3,8261 [*]
Tratamentos	1,2606 ^{ns}	3,7798 [*]

FV: Fonte de Variação. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Fonte – Dados da pesquisa (2025).

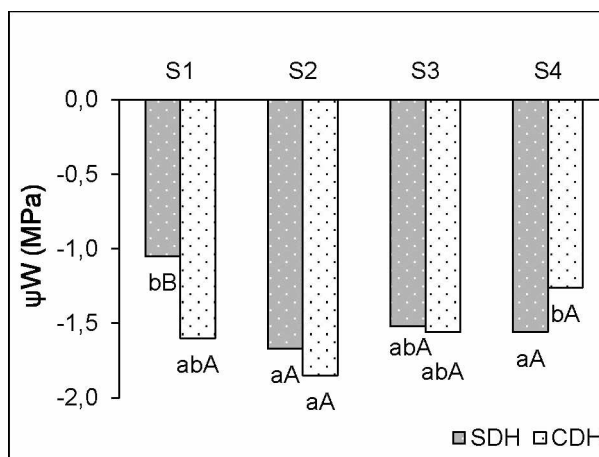
Em relação ao efeito do substrato no ψ_w , constata-se que a substituição de solo (S) pelo rejeito de caulim (RC), na proporção de 15% (S2) proporcionou redução de 59% nesse parâmetro, quando comparado com o substrato controle (S1) sob condições de 80% cv (Figura 8). Na análise da interação entre os tratamentos, ao comparar os regimes hídricos em cada substrato, verificou-se que, no substrato S1, as mudas mantidas sem déficit hídrico (80% cv) apresentaram maior ψ_w (-1,05 MPa) do que as mantidas sob déficit hídrico (40% cv) (-1,6 MPa), representando decréscimo de cerca de 52%.

No entanto, nos demais substratos, não foram constatadas diferenças estatísticas entre os regimes hídricos, ou seja, quando utilizados o rejeito de caulim (S2) ou o biochar (S3), ou a combinação de ambos (S4), em adição ao solo, as mudas sob déficit hídrico apresentam o mesmo comportamento daquelas sem déficit hídrico,

APÊNDICES: Tabela 3A: Análise de variância do *TRA*; Tabela 3B: Análise de variância do ψ_w .

evidenciando o aspecto positivo do uso desses produtos quando as mudas foram mantidas sob condições hídricas adversas.

Figura 8 – Potencial hídrico foliar (ψ_w) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função da interação substratos e regimes hídricos.



S1: S (75%) + EB (25%); **S2:** S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3:** S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4:** S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%). **SDH:** Sem Déficit Hídrico; **CDH:** Com Déficit Hídrico
 *Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Letras minúsculas comparam os substratos, enquanto letras maiúsculas os regimes hídricos.

Fonte – Dados da pesquisa (2025).

Além disso, é interessante destacar que, apesar da redução no ψ_w acima descrita, o *TRA* das mudas não foi afetado, fato que pode indicar a manutenção da turgescência celular, possivelmente resultante do provável ajustamento osmótico.

A manutenção de potenciais hídricos baixos em plantas sob deficiência hídrica pode resultar em diversos aspectos negativos, resultando em fechamento estomático e prejuízos na fotossíntese (Scalon *et al.*, 2011; Fernandes-Silva *et al.*, 2016) e no crescimento das plantas (Valadares; Paula; Paula, 2014; Padilha *et al.*, 2016; Felipe *et al.*, 2020).

No entanto, esse comportamento estomático pode ser uma estratégia de sobrevivência das plantas, decorrentes do acúmulo de solutos orgânicos compatíveis (Moura *et al.*, 2016), possibilitando o ajustamento osmótico, garantido assim, a absorção de água pelas plantas (Taiz *et al.*, 2017).

O ψ_w indica o seu *status* hídrico da planta, cujos gradientes explicam os fluxos da água no sistema solo-planta-atmosfera (Bergonci *et al.*, 2000). Nessa perspectiva, avaliar o comportamento do ψ_w é extremamente importante pois, de acordo com Martins *et al.* (2010), tal variável tem sido usada, principalmente, para o entendimento dos mecanismos envolvidos e os processos fisiológicos afetados pelo déficit hídrico.

5.2 COMPORTAMENTO ESTOMÁTICO

De acordo com a análise de variância (Tabela 4), houve efeito significativo do fator Substrato em todos os parâmetros estomáticos avaliados, sendo que o fator Regime hídrico, bem como a interação desses, exerceu efeito significativo apenas na variável Eficiência no Uso da Água – *EUA*.

Tabela 4 – Resumo da análise de variância (valores de $F_{\text{calculado}}$) da Condutância Estomática (*gs*), Taxa de transpiração (*E*), Taxa de fotossíntese (*A*), Concentração Interna de CO_2 (*Ci*), Eficiência no Uso da água (*EUAi*) e Eficiência de Carboxilação (*A/Ci*) das mudas de jurema-preta.

F.V.	<i>gs</i>	<i>E</i>	<i>A</i>	<i>Ci</i>	<i>EUA</i>	<i>A/Ci</i>
Substratos	8,34 *	32,91 *	5,71 *	7,33 *	11,2313 *	4,1729 *
Regimes Hídricos	0,43 ^{ns}	2,96 ^{ns}	0,14 ^{ns}	2,74 ^{ns}	5,1182 *	0,3649 ^{ns}
Substratos x Regimes Hídricos	1,63 ^{ns}	0,61 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,18 ^{ns}	5,2420 *	0,4054 ^{ns}
Tratamentos	4,34 *	14,79 *	2,65 *	3,61 *	7,7911 *	2,0143 *

FV: Fonte de Variação; * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

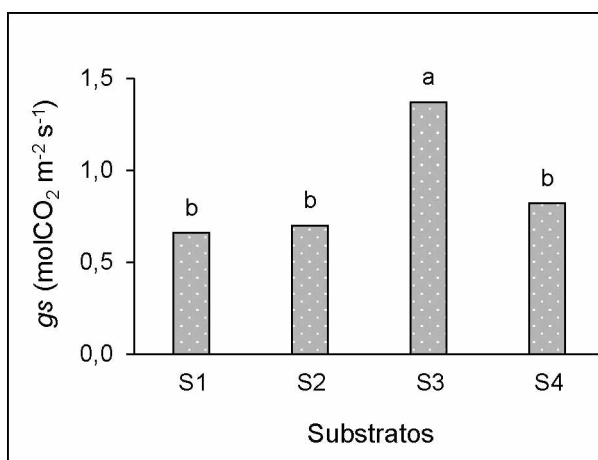
Fonte – Dados da pesquisa (2025).

Conforme consta na Figura 9, o uso de 25% do B em substituição ao EB, combinado com 15% de RC e 60% de S (S3), possibilitou valor de *gs* superior ($1,37 \text{ molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) aos demais substratos, representando elevações de aproximadamente 52%, 44% e 40%, respectivamente em S1 ($0,66 \text{ molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), S2 ($0,7 \text{ molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e S4 ($0,82 \text{ molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), os quais foram iguais estatisticamente.

Em relação à taxa de transpiração (*E*) (Figura 10), verificou-se igualdade estatística entre os substratos S3 e S4, os quais foram superiores aos demais. Comparando-se os substratos S1 e S2 com S3, ocorreram aumentos de 77% e 31%, respectivamente, na taxa de *E* das mudas. Percebe-se, então, que o uso de B (25%), ao invés do EB, juntamente com S (60%) e RC (15%) (S3) ou 10% de B, em adição ao S (45%), RC (30%) e EB (15%) (S4), favoreceu a *E* das mudas.

APÊNDICES: Tabela 4A: Análise de variância da *gs*; Tabela 4B: Análise de variância da *E*; Tabela 4C: Análise de variância da *A*; Tabela 4D: Análise de variância da *Ci*; Tabela 4E: Análise de variância da *EUA*; Tabela 4F: Análise de variância da *A/Ci*.

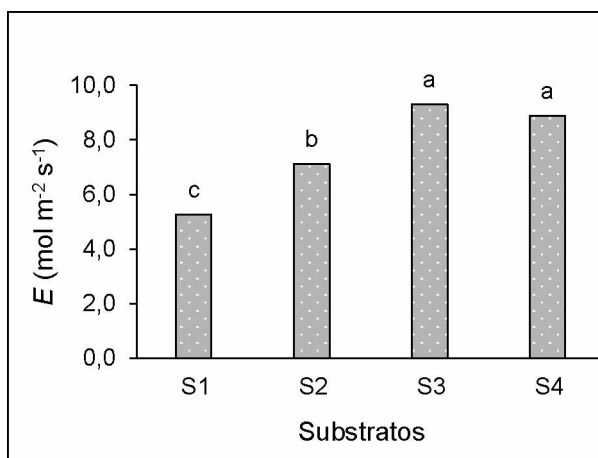
Figura 9 – Condutância estomática (g_s) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos.



S1: S (75%) + EB (25%); **S2:** S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3:** S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4:** S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%). *Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

Fonte – Dados da pesquisa (2025).

Figura 10 – Taxa de transpiração (E) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos.



S1: S (75%) + EB (25%); **S2:** S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3:** S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4:** S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%). *Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

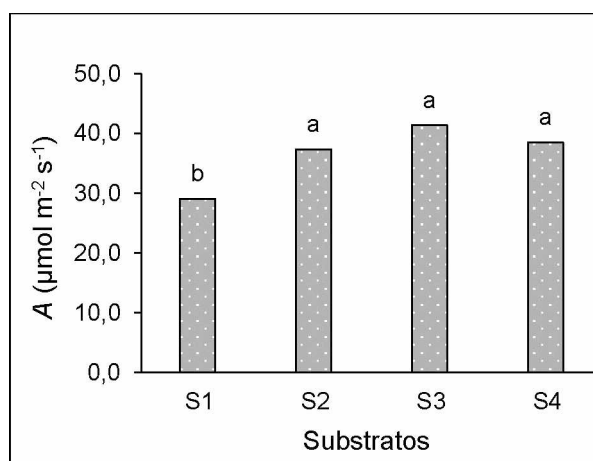
Fonte – Dados da pesquisa (2025).

O maior valor de E , verificado nas mudas produzidas no S3, pode ser reflexo da g_s , uma vez que os estômatos são a via de entrada de CO_2 para a realização da fotossíntese, a perda de água durante esse processo é inevitável (Taiz; Zeiger, 2006). No entanto, a transpiração é um processo fisiológico fundamental para as plantas, pois possibilita o transporte ascendente de nutrientes e compostos orgânicos, além

de evitar o aquecimento foliar através da dissipação de calor latente e possibilitar a absorção de CO₂ (Lima *et al.*, 2014).

Na taxa de fotossíntese (*A*), foi detectada igualdade estatística entre os substratos S2, S3 e S4, os quais foram superiores ao S1, além da igualdade entre S1 e S2 (Figura 11). O efeito positivo destacado do substrato S3 nos parâmetros *g_s* (Figura 9) e *E* (Figura 10) se refletiu diretamente na *A* das mudas (Figura 11), a qual aumentou 42% em relação ao substrato S1. Percebe-se, mais uma vez, o efeito positivo do uso do B, juntamente com o S, RC e EB, em processos fisiológicos essenciais às plantas.

Figura 11 – Taxa de fotossíntese (*A*) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos.



S1: S (75%) + EB (25%); **S2:** S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3:** S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4:** S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%). *Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

Fonte – Dados da pesquisa (2025).

Os valores expressivos de *g_s*, *E* e *A* obtidos especialmente nas mudas produzidas no S3, podem ser explicados pela capacidade do biochar adsorver (Akhtar *et al.*, 2015) e reter água no solo (Alghamdi; Alkhasha; Ibrahim, 2020; Maia *et al.*, 2021b) devido à sua estrutura altamente porosa (Ogawa; Okimori; Takahashi, 2006; Abel *et al.*, 2013), proporcionando às plantas uma condição hídrica favorável (Ekebafé; Ekebafé; Maliki, 2013; Blanco-Canqui, 2017; Edeh; Masek; Buss, 2020; Razzaghi; Obour; Arthur, 2020).

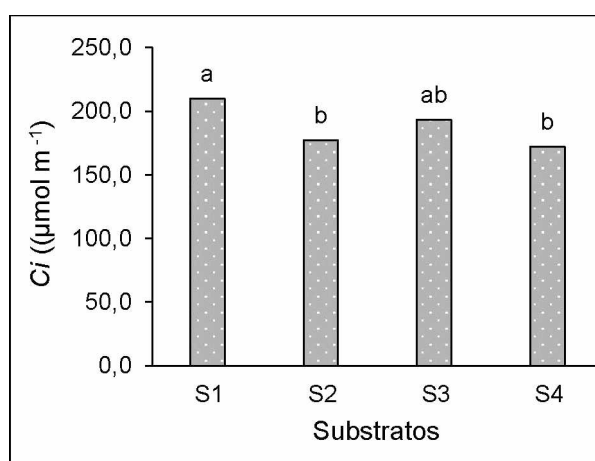
Além disso, o biochar, por ser uma boa fonte de potássio (Lacerda; Enéas; Pinheiro, 2007), que pode contribuir na osmorregulação e a manutenção da turgescência celular (Marenco; Lopes, 2011; Battie-Laclau *et al.*, 2014) e regulação

estomática (Benlloch-González *et al.*, 2008; Pasquini; Santiago, 2012; Zahoor *et al.*, 2017), influenciando positivamente as trocas gasosas das plantas.

Além disso, segundo Rondon *et al.* (2007) o biochar também pode aumentar o teor de P, K, Mg e outros nutrientes no solo, que por sua vez também podem aumentar a FBN. Aumento na g_s , E , e em outras variáveis estomáticas em função da aplicação do biochar também foram destacadas por Tsolis e Barouchas (2023), em ampla revisão de literatura sobre a seus impactos nas propriedades do solo.

Para o parâmetro Concentração Interna de CO_2 (C_i), o maior valor foi verificado no substrato controle (S1), estatisticamente igual ao S3, o qual também foi semelhante aos substratos S2 e S4 (Figura 12).

Figura 12 – Concentração Interna de CO_2 (C_i) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos.



S1: S (75%) + EB (25%); **S2:** S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3:** S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4:** S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%). *Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

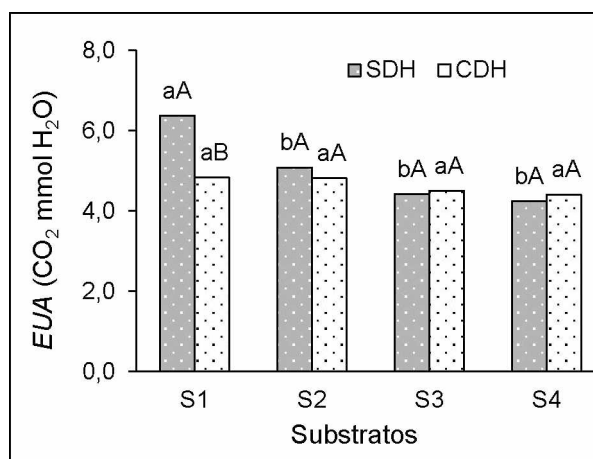
Fonte – Dados da pesquisa (2025).

As condições proporcionadas pelo S1 resultaram em valores inferiores de g_s (Figura 9), os quais podem ter sido decorrentes da menor abertura estomática e o CO_2 absorvido possibilitou maior C_i (Figura 12). Entretanto, esses altos valores de C_i não resultaram em aumento na fotossíntese, em comparação com os demais substratos (Figura 11). Dessa forma, acreditamos que a menor taxa fotossintética das mudas no S1 não foi decorrente de aspectos relacionados aos estômatos.

Quanto à Eficiência no uso da água (EUA) (Figura 13), conforme consta na Tabela 4, foi detectado efeito significativo da interação Substrato x Regime hídrico. Comparando-se os regimes hídricos dentro do mesmo substrato, constatou-se que

apenas no S1 ocorreu diferença significativa entre os regimes hídricos, em que as mudas mantidas a 80% cv (SDH) apresentaram maior *EUA*, com redução 24% nesse parâmetro em relação àquelas mantidas a 40% cv (CDH) (Figura 13).

Figura 13 – Eficiência no Uso da Água (*EUA*) (*A/E*) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função da interação substratos e regimes hídricos.



S1: S (75%) + EB (25%); **S2:** S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3:** S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4:** S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%). **SDH:** Sem Déficit Hídrico; **CDH:** Com Déficit Hídrico
 *Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Letras minúsculas comparam os substratos, enquanto letras maiúsculas os regimes hídricos.

Fonte – Dados da pesquisa (2025).

No entanto, é interessante que os demais substratos em que foi adicionado somente RC (S3) ou a combinação de RC com B (S3 e S4), apresentaram comportamento análogo do ponto de vista estatístico, independentemente do regime hídrico utilizado.

Isso pode ser justificado pela maior concentração do Silício (Si) presente no RC (Tabela 2), elemento benéfico as plantas superiores (Gama *et al.*, 2021), especialmente quando expostas a condições de déficit hídrico, estimulando a redução da perda excessiva de água através do processo de transpiração (Rao *et al.*, 2019), aumentando assim a eficiência do uso da água (Camargo *et al.*, 2017). Além disso, deve-se considerar os efeitos do biochar, por apresentar estrutura poroso (Maia, 2021b), podendo ter disponibilizado água para as mudas mesmo com 40% cv.

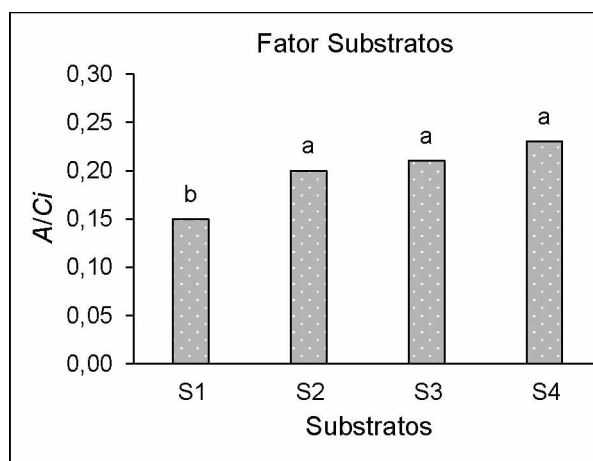
Comparando-se os substratos sob o mesmo regime hídrico, nas mudas mantidas sob déficit hídrico (CDH), não foi detectada diferença estatística dos valores de *EUA* entre os substratos. Naquelas sem déficit hídrico (SDH), verificou-se igualdade estatística entre S2, S3 e S4, os quais foram inferiores ao S1, quando as mudas foram mantidas sem déficit hídrico (SDH), com decréscimo médio de 28% na

EUA das mudas dos substratos citados em relação ao S1. Dessa forma, ocorreu redução na *EUA* à medida que se adicionou RC e B ao substrato contendo S e EB, independente da proporção utilizada.

Vale salientar que esse comportamento foi resultante do maior aumento na transpiração (Figura 10) em detrimento da fotossíntese (Figura 11), nas mudas dos substratos S2, S3 e S4 em comparação com o S1. Uma vez que a *EUA* foi obtida através da razão A/E , quanto maior for o valor da taxa de transpiração (E) em relação à taxa de fotossíntese (A), menor será a *EUA*.

Na Eficiência de carboxilação (A/C_i), ocorreu efeito significativo apenas do fator Substrato (Tabela 4), com igualdade estatística entre os substratos S2, S3 e S4, os quais foram superiores ao S1 (Figura 14). Percebe-se, que independente da proporção utilizada, o uso do rejeito de caulim e do biochar, em adição ao solo e esterco bovino, proporcionou aumento médio de 30% na eficiência de carboxilação das plantas.

Figura 14 – Eficiência de Carboxilação (A/C_i) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos.



S1: S (75%) + EB (25%); **S2:** S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3:** S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4:** S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%). *Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

Fonte – Dados da pesquisa (2025).

5.3 CRESCIMENTO, PRODUÇÃO DE BIOMASSA E QUALIDADE DAS MUDAS

Houve efeito **significativo** ($P \leq 0,05$) dos substratos e regimes hídricos nos parâmetros altura das mudas, taxa de crescimento absoluto (*TCA*) e diâmetro do caule, não tendo sido detectado efeito significativo da interação (Tabela 5).

Tabela 5 – Resumo da análise de variância da Altura de plantas, Taxa de Crescimento Absoluto (*TCA*), Diâmetro do caule e Razão Altura/Diâmetro das mudas de jurema-preta.

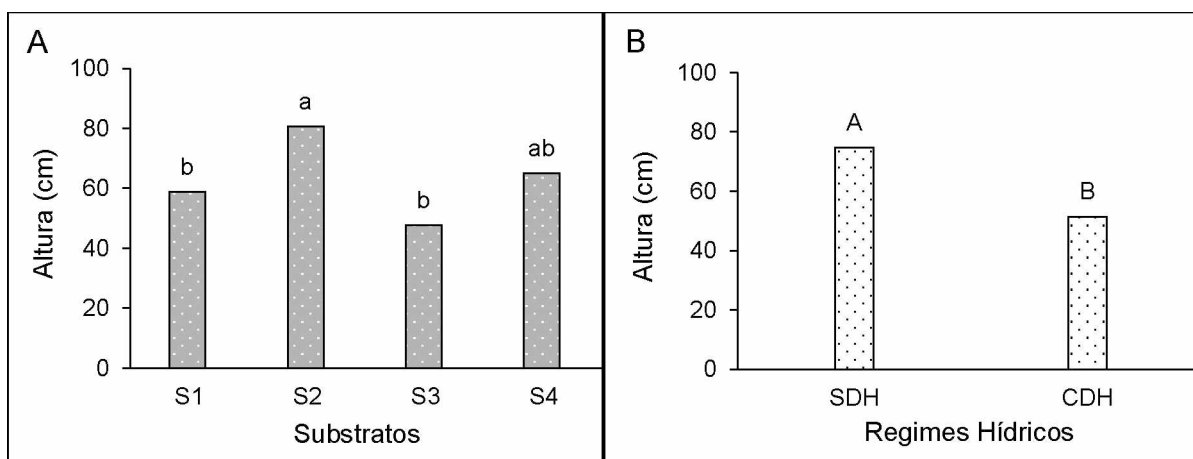
F.V.	Altura das mudas	<i>TCA</i>	Diâmetro do caule
Substratos	6,9870 *	6,3147 *	5,4122 *
Regimes Hídricos	20,1266 *	20,1609 *	18,4746 *
Substratos x Regimes Hídricos	1,1666 ^{ns}	1,2711 ^{ns}	1,6087 ^{ns}
Tratamentos	6,3696 *	6,1312 *	5,6482 *

FV: Fonte de Variação; * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

Fonte – Dados da pesquisa (2025).

Verificou-se que o substrato S2 proporcionou a obtenção de mudas mais altas que os demais tratamentos, estatisticamente igual ao S4 (Figura 15A). Em comparação com S1 e S3, o valor de altura de mudas no S2 foram 27% e 41% inferiores, respectivamente.

Figura 15 – Altura das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos (A) e dos regimes hídricos (B).



S1: S (75%) + EB (25%); **S2:** S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3:** S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4:** S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%). *Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

Fonte – Dados da pesquisa (2025).

Possivelmente a utilização de 15% RC (S2) proporcionou melhoria nas propriedades químicas do substrato, pois de acordo com Alves *et al.* (2008) e Pereira *et al.* (2008), quando esse material é utilizado de forma equilibrada, proporciona

APÊNDICES: Tabela 5A: Análise de variância da altura; Tabela 5B: Análise de variância da *TCA*; Tabela 5C: Análise de variância do diâmetro.

aumento na solubilidade de nutrientes importantes para o desenvolvimento das plantas, como o N, P e K.

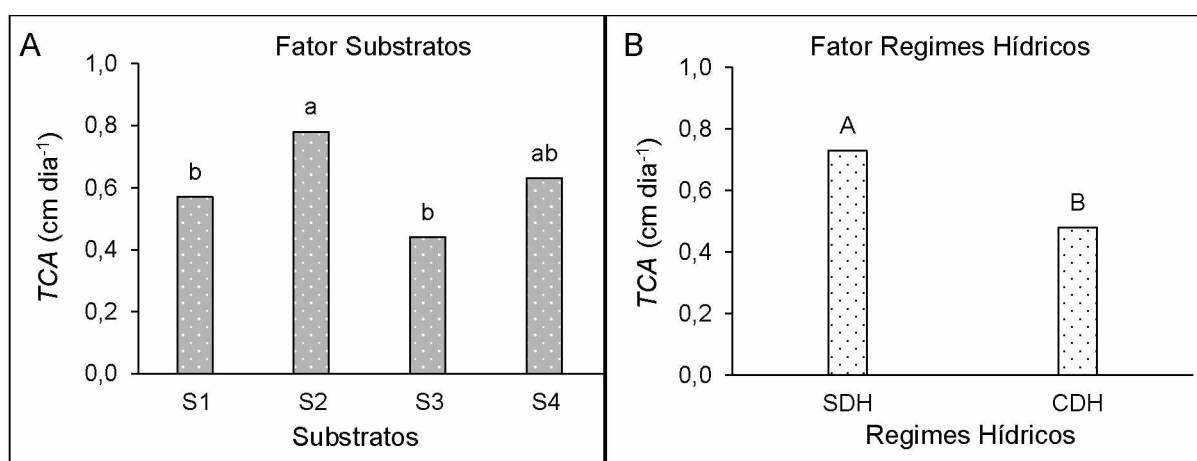
Ao comparar a altura das mudas em função dos regimes hídricos empregados, percebe-se que aquelas produzidas no tratamento SDH apresentou valor médio (74,75 cm) superior ao obtido em CDH (51,38 cm), equivalendo a uma altura cerca de 69% superior.

A variável altura das mudas é de fácil mensuração, sendo utilizada para avaliar o potencial de desempenho das mesmas, tendo em vista que é um dos mais importantes parâmetros morfológicos para estimar o crescimento das plantas após o plantio definitivo no campo (Gomes *et al.* 2002).

Em virtude do comportamento apresentado pela altura das mudas (Figura 15A), a maior *TCA* foi obtido nas mudas produzidas nos tratamentos S2 e S3, sendo esse igual estatisticamente aos demais substratos e, comparando-se os substratos S2 e S4, os quais proporcionaram a maior e a menor *TCA*, respectivamente, percebe-se decréscimo de 43,59% (Figura 16A).

Quanto ao efeito dos regimes hídricos, as mudas mantidas sem déficit hídrico (SDH) apresentaram *TCA* 66% superior a aquelas que cresceram em condições de déficit hídrico (CDH) (Figura 16B).

Figura 16 – Taxa de Crescimento Absoluto (*TCA*) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos (A) e dos regimes hídricos (B).

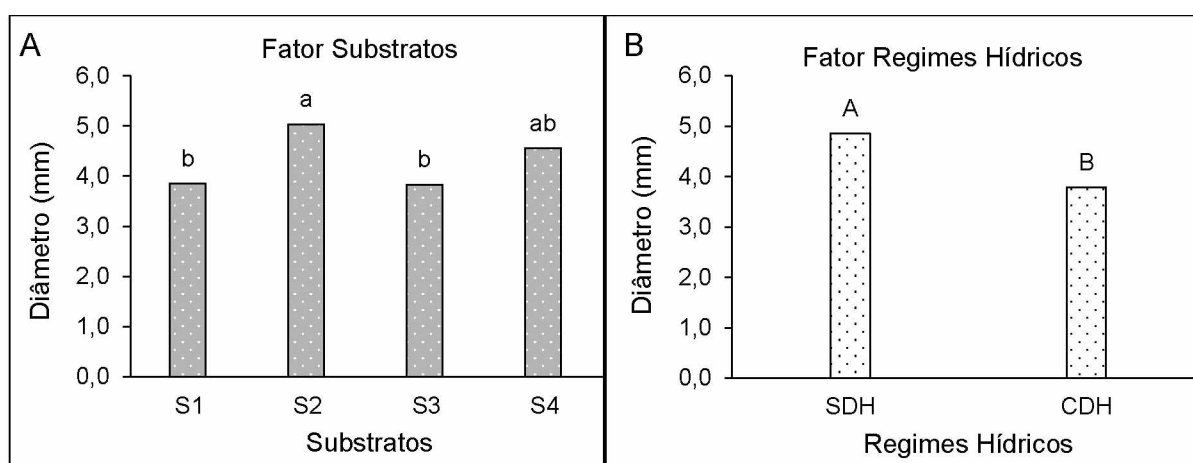


S1: S (75%) + EB (25%); **S2:** S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3:** S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4:** S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%). *Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

Fonte – Dados da pesquisa (2025).

Em relação ao diâmetro do caule (Figura 17A), o comportamento foi semelhante ao da altura das mudas (Figura 15A) e TCA (Figura 16A), com os substratos S2 e S3 promovendo maior e o menor valor, respectivamente, com redução de 24% nesse parâmetro. Quanto ao fator regime hídrico, as plantas mantidas sob déficit hídrico (CDH) apresentaram decréscimo de 21% no diâmetro do caule, em comparação com aquelas do tratamento SDH (Figura 17B).

Figura 17 – Diâmetro do caule das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos (A) e dos regimes hídricos (B).



S1: S (75%) + EB (25%); **S2:** S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3:** S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4:** S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%). *Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

Fonte – Dados da pesquisa (2025).

A altura das plantas é um fator a ser levado em consideração quando da transferência da mesma para o campo, juntamente com o diâmetro do caule, o qual é considerado uma das melhores características para indicar a capacidade de sobrevivência das mudas em condições de campo em virtude de indicar a robustez da planta (Alves *et al.*, 2008), possibilitando maiores índices de sobrevivência e de crescimento das mudas em campo.

Porém, mudas altas e com o diâmetro do colo reduzido, quando em condições de campo podem ter problemas em situações de ventos fortes, ficando sujeitas ao tombamento (Costa *et al.*, 2010; Almeida *et al.* 2014), ocasionando morte ou deformações. Então, para avaliar a qualidade de uma muda, não se deve tomar como base unicamente a altura da planta ou o diâmetro do caule ou coleto, sendo mais adequado considerar a razão entre esses dois parâmetros (Razão Altura/Diâmetro -

RAD). Nesse, caso se a decisão fosse tomada apenas pela altura (Figura 15A) ou diâmetro do caule (Figura 17A), o melhor substrato seria o S2.

Analisando-se a produção de biomassa das mudas (Tabela 6), foi verificado efeito isolado da interação substratos x regimes hídricos nos parâmetros massa seca da parte aérea (*MSPA*), massa seca das raízes (*MSR*) e massa seca total (*MSTt*), enquanto houve efeito isolado dos substratos na razão parte aérea/raiz (*RPAR*).

Tabela 6 – Resumo da análise de variância (valores de $F_{\text{calculado}}$) da massa seca da parte aérea (*MSPA*), massa seca das raízes (*MSR*), razão parte aérea/raiz (*RPAR*) e massa seca total (*MSTt*) das mudas de jurema-preta.

F.V.	<i>PSPA</i>	<i>PSR</i>	<i>RPAR</i>	<i>PSTt</i>
Substratos	7,9850 *	6,2922 *	13,7159 *	6,8998 *
Regimes Hídricos	24,3283 *	16,4773 *	0,0405 ^{ns}	23,3492 *
Substratos x Regimes Hídricos	3,7918 *	3,3397 *	0,5538 ^{ns}	3,3802 *
Tratamentos	9,5227 *	6,4818 *	6,1214 *	7,7413 *

FV: Fonte de Variação; * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

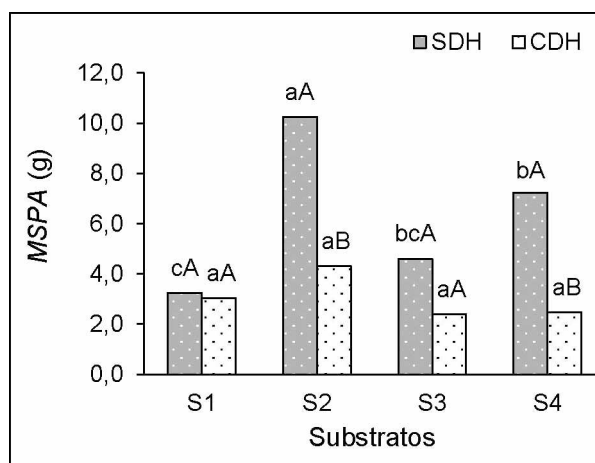
Fonte – Dados da pesquisa (2025).

Na *MSPA*, comparando-se os substratos em cada regime hídrico (Figura 18), verificou-se que, nas mudas não submetidas ao déficit hídrico (SDH), o substrato S2 proporcionou maior valor (10,25 g), seguido do S4 (7,22 g), S3 (4,60 g) e S1 (3,23 g), representando decréscimos, respectivamente, de 30%, 55% e 68,5% nesse parâmetro. Nas mudas do tratamento CDH, não foi verificada diferença estatística entre os substratos.

Considerando-se os regimes hídricos, em cada substrato, não foram detectadas diferenças significativas entre S1 e S3, porém em S2 e S4 as mudas do tratamento SDH apresentaram maior *MSPA*, com decréscimos de 58% e 66%, respectivamente, quando foram mantidas ao regime hídrico CDH.

APÊNDICES: Tabela 6A: Análise de variância da *MSPA*; Tabela 6B: Análise de variância da *MSR*; Tabela 6C: Análise de variância da *RPAR*; Tabela 6D: Análise de variância da *MSTt*.

Figura 18 – Massa seca da parte aérea (*MSPA*) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função da interação substratos e regimes hídricos.



S1: S (75%) + EB (25%); **S2:** S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3:** S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4:** S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%). **SDH:** Sem Déficit Hídrico; **CDH:** Com Déficit Hídrico
 *Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Letras minúsculas comparam os substratos, enquanto letras maiúsculas os regimes hídricos.

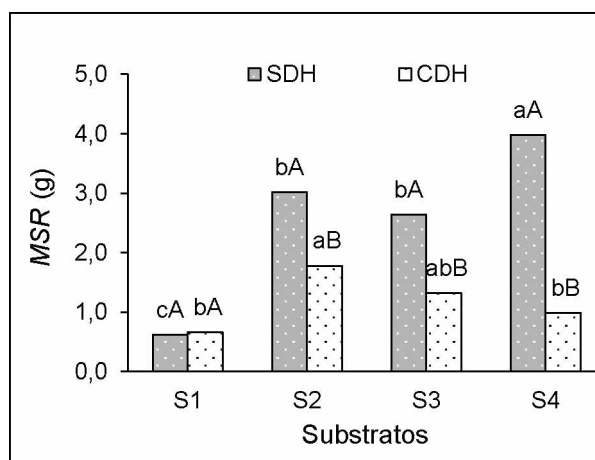
Fonte – Dados da pesquisa (2025).

A avaliação da *MSPA* é importante, pois indica a rusticidade e se correlaciona diretamente com a sobrevivência e desempenho inicial das mudas após o plantio em campo (Volkweis *et al.*, 2014).

Quando se analisa *MSR* (Figura 19), comparando-se os substratos no regime hídrico SDH, constatou-se que o S4 proporcionou maior acúmulo de massa seca (3,98 g), seguido de S2 (3,02 g), S3 (2,64 g) e S1 (0,62 g), com decréscimos de 24%, 34% e 84%, respectivamente, em comparação com S4. No entanto, no tratamento CDH, no geral, os valores foram inferiores aos verificados naquelas bem irrigadas, sendo que a maior *MSR* foi obtida em S2 (1,78 g), seguida do S3 (1,32 g), S4 (0,99 g) e S1 (0,66 g) e, em termos percentuais, os decréscimos nesse parâmetro, em relação ao S2 foram, respectivamente, de 26%, 44% e 63%.

Com relação aos regimes hídricos, em cada substrato, os efeitos do déficit hídrico foram mais pronunciados no S4, em que ocorreu redução de 75% na *MSR* quando as mudas foram mantidas a 40% cv (CDH), ao passo que no S3 foi de 50% e 41% no S2, não havendo diferença significativa entre os regimes hídricos nas mudas que cresceram no substrato S1.

Figura 19 – Massa seca das raízes (*MSR*) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função da interação substratos e regimes hídricos.

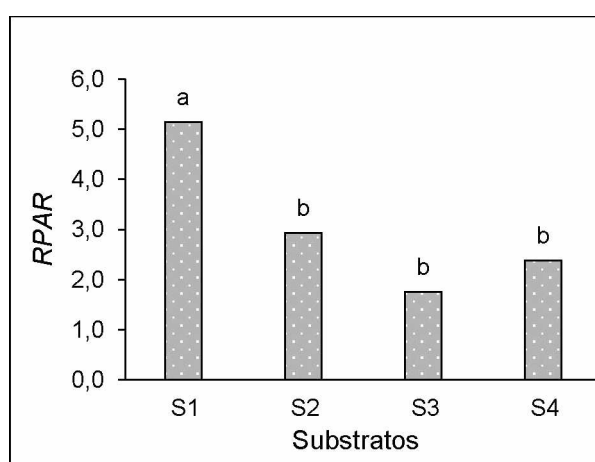


S1: S (75%) + EB (25%); **S2:** S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3:** S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4:** S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%). **SDH:** Sem Déficit Hídrico; **CDH:** Com Déficit Hídrico
 *Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Letras minúsculas comparam os substratos, enquanto letras maiúsculas os regimes hídricos.

Fonte – Dados da pesquisa (2025).

No parâmetro *RPAR*, ocorreu efeito significativo apenas do substrato, destacando-se o S1 (5,14 g), superior estatisticamente aos substratos S2 (2,93 g), S4 (2,38 g) e S3 (1,76 g), equivalendo a decréscimos aproximadamente de 43%, 54% e 66%, respectivamente (Figura 20).

Figura 20 – Razão parte aérea/raiz (*RPAR*) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos.



S1: S (75%) + EB (25%); **S2:** S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3:** S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4:** S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%). *Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

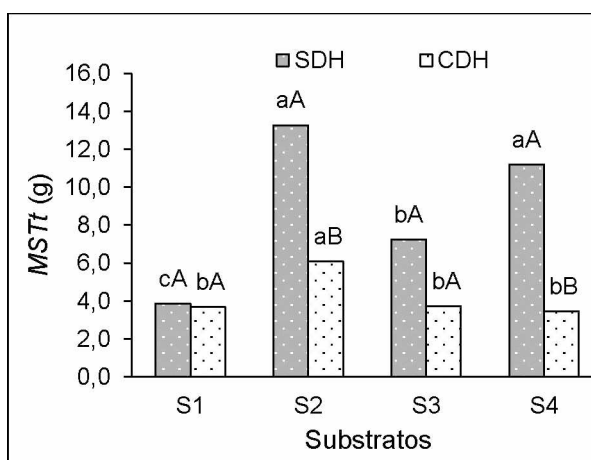
Fonte – Dados da pesquisa (2025).

Assim como verificado na *MSPA* (Figura 18), maior valor de *MSTt* foi obtido nas mudas que cresceram no substrato S2, independente do regime hídrico (Figura 21). Considerando-se os substratos dentro do regime hídrico SDH, o S2 possibilitou a produção de 13,27 g de massa seca total, estatisticamente igual ao S4 (11,20 g), porém 71% e 54,5% superior aos obtidos em S1 (3,85 g) e S3 (7,24 g), respectivamente.

Em relação ao tratamento CDH, o substrato S2 também se destacou, com 6,08 g, sendo cerca de 39% superior aos substratos S1 e S4 e, quando comparado ao S4, o decréscimo na *MSTt* foi de 43% (Figura 21).

Quando se analisa os regimes hídricos, em cada substrato, não foi detectada diferença estatística no substrato S1, porém, nos substratos S2, S3 e S4 ocorreram decréscimos de 54%, 48% e 69% na *MSTt* das mudas sob déficit hídrico, em relação às mantidas sem déficit hídrico.

Figura 21 – Massa seca total (*MSTt*) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função da interação substratos e regimes hídricos.



S1: S (75%) + EB (25%); **S2:** S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3:** S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4:** S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%). **SDH:** Sem Déficit Hídrico; **CDH:** Com Déficit Hídrico
 *Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Letras minúsculas comparam os substratos, enquanto letras maiúsculas os regimes hídricos.

Fonte – Dados da pesquisa (2025).

Esse efeito positivo do rejeito de caulim na produção de massa seca das mudas pode ser devido aos seus teores de cálcio (Ca) e de silício (Si) (Tabela 2). O cálcio é um elemento essencial para o crescimento das plantas, estando envolvido na divisão celular, atuando principalmente como componente de pectatos de cálcio da lamela média na parede celular (Marschner, 2012).

O aumento na taxa de fotossíntese (Figura 11) pode também ser decorrente do Silício (Si), elemento essencial nesse processo fisiológico, conforme afirmam Flores *et al.* (2018), Sandhya, Prakash e Meunier (2018), Camargo *et al.* (2019) e Oliveira *et al.* (2019), com efeitos positivos no crescimento e na produção de biomassa das plantas (Chen *et al.*, 2016 ; Lavinsky *et al.*, 2016 ; Carneiro *et al.*, 2017 ; Viciado *et al.*, 2019), efeito esse também constatado no presente estudo com o uso dos substratos S2, S3 e S4 (Figuras 18, 19 e 21), que receberam o rejeito de caulim.

O rejeito de caulim e o biochar, adicionados ao solo e esterco bovino promoveram maior produção de massa seca por proporcionarem melhoria nas propriedades químicas do substrato, aumentando a matéria orgânica do solo (MOS) e a capacidade de troca catiônica (CTC) (Ali *et al.*, 2017), bem como as físicas, por garantirem maior porosidade no meio radicular.

Quanto a Razão Altura/Diâmetro (*RAD*) e o Índice de Qualidade de Dickson (*IQD*), de acordo com a análise de variância, ocorreu efeito significativo dos tratamentos, mas de forma isolada (Tabela 7). O comportamento da variável *RAD* (Figura 22A) foi semelhante ao verificado nas variáveis altura de mudas (Figura 15A) e diâmetro do caule (Figura 17A), se destacando o substrato S2, 22% superior ao obtido no S3, que apresentou o menor valor de *RAD*. E, em relação ao regime hídrico, as mudas do tratamento SDH apresentaram maior *RAD* do que aquelas mantidas sob déficit hídrico (CDH) (Figura 22B).

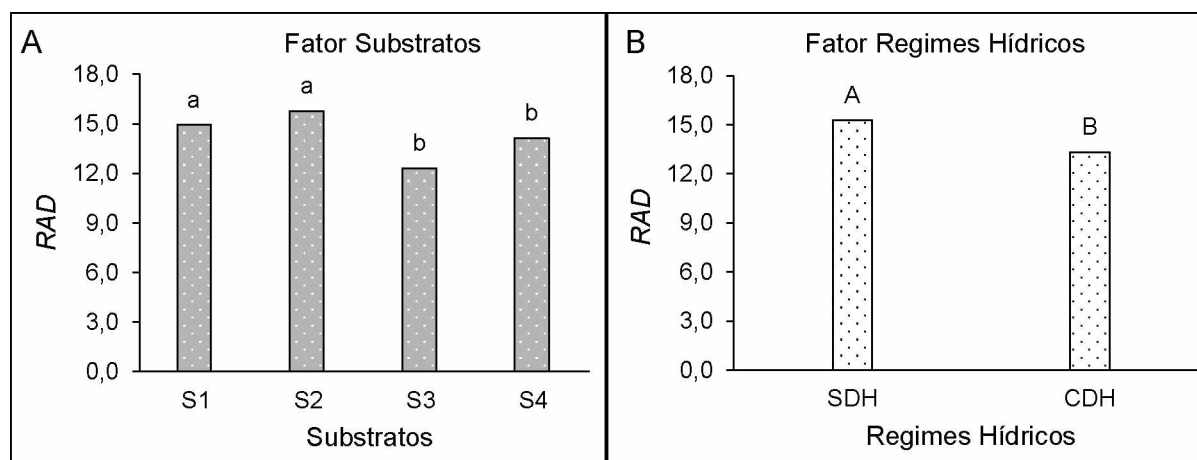
Tabela 7 – Resumo da análise de variância (valores de $F_{\text{calculado}}$) da Razão Altura/Diâmetro (*RAD*) e do Índice de Qualidade de Dickson (*IQD*) das mudas de jurema-preta.

F.V.	<i>RAD</i>	<i>IQD</i>
Substratos	6,6411 *	6,3198 *
Regimes Hídricos	11,3464 *	18,5183 *
Substratos x Regimes Hídricos	0,1845 ^{ns}	3,0086 ^{ns}
Tratamentos	4,5462 *	6,6434 *

FV: Fonte Variação. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Fonte – Dados da pesquisa (2025).

Figura 22 – Razão Altura/Diâmetro (*RAD*) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos (A) e dos regimes hídricos (B).



S1: S (75%) + EB (25%); **S2:** S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3:** S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4:** S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%). *Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$).

Fonte – Dados da pesquisa (2025).

Com isso, percebe-se o efeito positivo da substituição de 15% de S, por 15% de RC, no S2 (S (60%) + RC (15%) + EB (25%)), em comparação com o substrato controle (S1 - S (75%) + EB (25%)) e o S3 (S (60%) + RC (15%) + B (25%)) no parâmetro *RAD*. Possivelmente isso pode ser devido à menor compactação do substrato e melhores condições de aeração e disponibilidade de nutrientes, vantagens do RC destacadas por Leite *et al.* (2023).

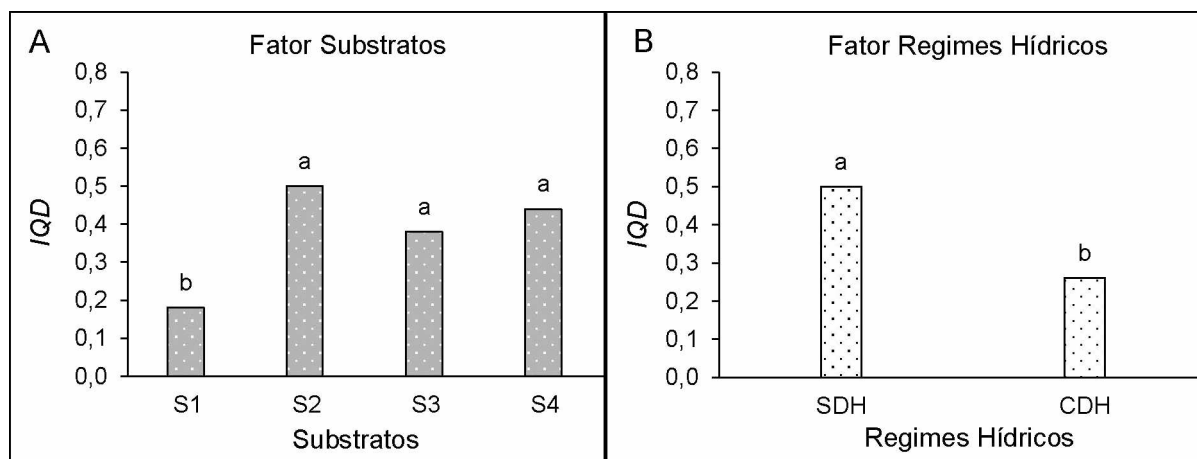
Considerando-se a *RAD* (Figura 22A), o substrato ideal seria o S3 (12,32), pois é o que mais se aproxima do valor 10, esse é valor máximo de *RAD*, segundo Birchler *et al.* (1998), que uma muda deve apresentar, para ser considerada de qualidade superior.

De acordo com Gomes e Paiva (2011) quanto menor valor da *RAD*, melhor é a qualidade das mudas, com maior capacidade de sobrevivência e estabelecimento após o plantio em campo. Carneiro (1995) e Gomes e Paiva (2011) afirmam que a avaliação da *RAD* é importante, pois representa o equilíbrio de desenvolvimento das mudas, sendo conhecido também como quociente de robustez.

De acordo com a Figura 23A, o substrato S2 proporcionou a obtenção de mudas com maior valor de *IQD* (0,50), estatisticamente igual aos substratos S4 (0,44) e S3 (0,38), os quais foram superiores ao verificado nas mudas do substrato S1 (0,18). Nota-se, então, decréscimos de 64%, 52% e 59% no *IQD* quando se comparam os substratos S2, S3 e S4 com o S1.

Quanto ao comportamento do *IQD* em relação aos regimes hídricos, verifica-se que as mudas do tratamento SDH foram superiores (48%) às do tratamento CDH, evidenciado o efeito negativo da deficiência hídrica no crescimento das mudas de jurema-preta e, conseqüentemente, na qualidade das mesmas.

Figura 23— Índice de Qualidade de Dickson (*IQD*) das mudas de jurema-preta aos 120 DAE em função dos substratos (A) e dos regimes hídricos (B).



S1: S (75%) + EB (25%); **S2:** S (60%) + RC (15%) + EB (25%); **S3:** S (60%) + RC (15%) + B (25%); **S4:** S (45%) + RC (30%) + EB (15%) + B (10%). *Médias seguidas de letras iguais não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Letras minúsculas comparam os substratos, enquanto letras maiúsculas os regimes hídricos.

Fonte — Dados da pesquisa (2025).

Apesar das características apresentadas para cada variável analisada, percebemos que nenhuma pode ser avaliada isoladamente, sendo necessário atenção. Gomes e Paiva (2011), destacam que não existe um valor que define o padrão de qualidade de mudas, pois isto depende de diversos fatores, como da espécie em estudo, local de condução, dos métodos e das técnicas de produção.

No entanto, dentre todos os índices e parâmetros empregados nesse estudo para avaliar a qualidade das mudas, o *IQD* é considerado um dos melhores e mais eficientes, pois inclui a robustez e o equilíbrio da distribuição da biomassa da muda no seu cálculo, e quanto maior o valor deste índice, melhor será a qualidade da muda (Almeida *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2018; Fernandes *et al.*, 2019), indicando novamente o efeito positivo do RC e B.

De forma geral, apesar do efeito positivo do rejeito de caulim, é necessário atentar-se a composição dos demais materiais que compõem o substrato. Assim, é possível afirmar que maiores concentrações de rejeito de caulim podem ser utilizadas, a exemplo de 30%, proporcionando resultados satisfatórios, a depender de alguns

fatores, como a combinação dos demais constituintes, da espécie estudado e do regime hídrico utilizado.

Vale destacar que a utilização do RC para produção de mudas é ampla na literatura, como estudo desenvolvidos por (Campos *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2008; Alves *et al.*, 2012; Oliveira *et al.*, 2014; Melo *et al.*, 2020; Alves *et al.*, 2021; França *et al.*, 2024). Assim como os efeitos benéficos da adição do biochar, reportados por (Petter *et al.*, 2012; Rezende *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2017; Du *et al.*, 2019; Ibrahim *et al.*, 2020). No entanto, estudos utilizando a combinação de ambos (RC e B) ainda é ausente, enfatizando a inovação do presente trabalho. Além de que, mesmo diante de expressiva substituição do S pelo RC (30%), quando aplicado 10% de B, somados ao EB, o *IQD* foi semelhante aos demais substratos.

De fato, é verificado o efeito positivo do rejeito de caulim nos substratos S2 e S3 para o parâmetro *IQD*. No entanto, percebe-se também a influência positiva do biochar, quando adicionado ao substrato, possivelmente pela retenção de água e nutrientes, além da liberação dos mesmos, consequentemente aumenta a fertilidade do solo (Kätterer *et al.*, 2019).

Diante dos resultados aqui apresentados, sugere-se a condução de mais estudos para que se possa definir outras proporções de rejeito de caulim e/ou biochar na composição de substrato para mudas de jurema-preta, tanto sem déficit hídrico, como em outras condições de níveis de água.

6 CONCLUSÕES

- Independente do substrato utilizado, o déficit hídrico imposto afetou negativamente as trocas gasosas, crescimento, produção de biomassa e a qualidade das mudas de jurema-preta.

- O substrato contendo solo, rejeito de caulim e biochar favoreceu as trocas gasosas, ao passo que aquele formado por solo, esterco bovino e rejeito de caulim proporcionou maior crescimento e produção de biomassa, independente da condição hídrica imposta.

- A adição de rejeito de caulim ao solo e esterco bovino proporcionou maior produção de biomassa, tanto nas plantas sem déficit hídrico como nas plantas sob déficit hídrico.

- Recomenda-se utilizar o substrato S4, pois contém maior concentração de rejeito de caulim (30%) em substituição ao solo, somado ao esterco bovino e biochar.

REFERÊNCIAS

- ABEL, S.; PETERS, A.; TRINKS, S.; SCHONSKY, H.; FACKLAM, M.; WESSOLEK, G. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. **Geoderma**, v. 202, p. 183-191, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.03.003>. Acesso em: 10 fev. 2025.
- AHANGER, M. A.; TYAGI, S. R.; WANI, M. R.; AHMAD, P. Drought tolerance: role of organic osmolytes, growth regulators, and mineral nutrients. In: AHMAD, P.; WANI, M. F. (Ed.). **Physiological Mechanisms and Adaptation Strategies in Plants under Changing Environment**. Springer New York, p. 25-55, 2014. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4614-8591-9_2. Acesso em: 23 maio. 2023.
- AHANGER, M. A.; TOMAR, N. S.; TITTAL, M.; ARGAL, S.; AGARWAL, R. M. Plant growth under water/salt stress: ROS production; antioxidants and significance of added potassium under such conditions. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 23, n. 4, p. 731-744, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12298-017-0462-7>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- AKHTAR, S. S.; ANDERSEN, M. N.; LIU, F. Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress. **Agricultural Water Management**, v. 158, p. 61-68, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.04.010>. Acesso em: 10 fev. 2025.
- ALGHAMDI, A. G.; ALKHASHA, A.; IBRAHIM, H. M. Effect of biochar particle size on water retention and availability in a sandy loam soil. **Journal of Saudi Chemical Society**, v. 24, n. 12, p. 1042-1050, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2020.11.003>. Acesso em: 25 jan. 2025.
- ALI, S.; RIZWAN, M.; QAYYUM, M. F.; OK, Y. S.; IBRAHIM, M.; RIAZ, M.; ARIF, M. S.; HAFEEZ, F.; AL-WABEL, M.; SHAHZAD, A. N. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: a critical review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 14, p. 1-13, 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-017-8904-x>. Acesso em: 10 jan. 2025.
- ALMEIDA, E. P.; FREIRE, A. L. O.; BAKKE, I. A.; FERREIRA, C. D.; FRANÇA, G. M.; BATISTA, A. W. Effects of potassium in *Myracrodruon urundeuva*, *Libidibia ferrea* and *Mimosa tenuiflora* seedlings under a short-term water deficit. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 5, p. 1-19, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i5.3269>. Acesso em: 4 jun. 2023.
- ALMEIDA, R. S.; MAYRINCK, R.C.; ZANINI, A.M.; DIAS, B. A.S.; BARONI, G.R. Crescimento e qualidade de mudas de *Croton floribundus* Spreng. em diferentes recipientes e substratos. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 19, p. 672-685, 2014. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/2294>. Acesso em: 10 jan. 2025.

ALMEIDA, R. S.; NIERI, E. M.; MONTEIRO, E. C. S.; SILVA, O. M. C.; MELO, L. A. Reaproveitamento de resíduos de café em substratos para produção de mudas de *Joannesia princeps*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 41, p. 1-7, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4336/2021.pfb.41e201902047>. Acesso em: 31 maio. 2023.

ALVES, A. S.; OLIVEIRA, L. S. B.; ANDRADE, L. A.; GONÇALVES, G. S.; SILVA, J. M. Produção de mudas de angico em diferentes tamanhos de recipientes e composições de substratos. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 7, n. 2, p.39-44, 2012. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/1108>. Acesso em: 30 maio. 2023.

ALVES, F. J. B.; FREIRE, A. L. O. Gas exchange of *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poiret under water deficit and rewatering. **Journal of Agricultural Studies**, v. 7, n. 4, p. 297-308, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5296/jas.v7i4.15338>. Acesso em: 2 jun. 2023.

ALVES, J. C.; PÔRTO, M. L. A.; ARRUDA, J. A.; SILVA, M. S. Produção de mudas de paineira em substratos com rejeito da indústria de caulim. **Gaia Scientia**, v. 15, n. 2, P. 123-138, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2021v15n2.55146>. Acesso em: 23 maio. 2023.

ALVES, J. C.; PÔRTO, M. L.; ANDRADE, L. A.; SOUZA, A. P.; SILVA, G. B.; TOMPSON JÚNIOR, U. A. Produção de mudas de moringa (*Moringa oleifera* Lam.) (Moringaceae) em substratos contendo rejeito da indústria de caulim. **Revista Ecosystema**, v. 33, n. 1/2, p. 83-89, 2008. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20103174969>. Acesso em: 12 jan. 2025.

ARAÚJO, E. F.; AGUIAR, A. S.; ARAUCO, A. M. S.; GONÇALVES, E. O.; ALMEIDA, K. N. S. Crescimento e qualidade de mudas de paricá produzidas em substratos à base de resíduos orgânicos. **Nativa**, v. 5, n. 1, p.16-23, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.31413/nativa.v5i1.3701>. Acesso em: 29 maio. 2023.

AZEVEDO, S. M. A.; BAKKE, I. A.; BAKKE, A. O.; FREIRE, A. L. O. Crescimento de plântulas de jurema preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poiret) em solos de áreas degradadas da caatinga. **Engenharia Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 150-160, 2012. Disponível em: <http://ferramentas.unipinhal.edu.br/engenhariaambiental/viewarticle.php?id=745&layout=abstract>. Acesso em: 15 abr. 2023.

BAKKE, I. A.; FREIRE, A. L. O.; BAKKE, O. A.; ANDRADE, A. P.; BRUNO, R. L. A. Water and sodium chloride effects on *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poiret seed germination. **Revista Caatinga**, v. 19, n. 3, p. 261-267, 2006. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/82>. Acesso em: 20 abr. 2023.

BARRETO, M. C.; DIAS, A. L. F.; FIGUEIREDO, M. V. B. FARIAS, C. H. A. BARBOSA, M. R.; SANTOS, A. A.; ANDRADE, A. G. Aclimatização de mudas pré-brotadas de cana-de-açúcar em diferentes substratos. *In*: AMORMINO JÚNIOR, M.

(org.). **Elementos da natureza e propriedades do solo**. Ponta Grossa: Atena, 2018. p. 8-16.

BATTIE-LACLAU, P.; LACLAU, J. O.; BERI, C.; MIETTON, L.; MUNIZ, M. R. A.; ARENQUE, B. C.; PICCOLO, M. C.; JORDAN-MEILLE, L.; BOUILLET, J. P.; NOUVELLON, Y. Photosynthetic and anatomical responses of *Eucalyptus grandis* leaves to potassium and sodium supply in a field experiment. **Plant, Cell & Environment**, v. 37, n. 1, p. 70-81, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/pce.12131>. Acesso em: 13 fev. 2025.

BENADJAUD, A.; DADACH, M.; EL-KEBLAWY, A.; MEHDADI, Z. Impacts of osmopriming on mitigation of the negative effects of salinity and water stress in seed germination of the aromatic plant *Lavandula stoechas* L. **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants**, v. 31, p. 100407, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2022.100407>. Acesso em: 10 jun. 2023.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas**. Jaboticabal: FUNEP, 1988. 42 p.

BENLLOCH-GONZÁLEZ, M.; ARQUERO, O.; FOURNIER, J. M.; BARRANCO, D.; BENLLOCH, M. K⁺ starvation inhibits water-stress-induced stomatal closure. **Journal of Plant Physiology**, v. 165, n. 6, p. 623-630, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2007.05.010>. Acesso em: 13 fev. 2025.

BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; SANTOS, A. O. Potencial da água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 8, p. 1531-1540, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000800005>. Acesso em: 13 jan 2025.

BEZERRA, D. A. C.; RODRIGUES, F. F. G.; COSTA, J. G. M.; PEREIRA, A. V.; SOUSA, E.; ORODRIGUES, O. G. Abordagem fitoquímica, composição bromatológica e atividade antibacteriana de *Mimosa tenuiflora* (Wild) Poiret e *Piptadenia stipulacea* (Benth) Ducke. **Acta Scientiarum. Biological Science**, v. 33, p. 99-106, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actascibiols.v33i1.5366>. Acesso em: 15 abr. 2023.

BIRCHLER, T.; ROSE, R. W.; RAYO, A.; PARDOS, M. La planta ideal: revision del concepto, parametros definitorios e implementacion practica. **Investigacion Agraria, Sistemas y Recursos Forestales**, v. 7, n. 1-2, p. 109-121, 1998. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.scielo.br/j/floram/a/LbD8rmbGnsLvZTcgsXyPzKD/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 5 jan. 2025.

BLANCO-CANQUI, H. Biochar and Soil Physical Properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 4, p. 687-711, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>. Acesso em: 10 fev. 2025.

BUTZKE, A. G.; MIRANDA, E. M.; ANDRADE NETO, R. C.; BIANCHINI, F.; FIUZA, S. S. Produção de mudas de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) em diferentes tipos de substratos, recipientes e níveis de sombreamento em Rio Branco,

Acre. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, n. 27, p. 254-263, 2018. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1096767>. Acesso em: 29 maio. 2023.

CALEGARI, L.; LOPES, P. J. G.; OLIVEIRA, E.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D. M. Quantificação de taninos nas cascas de jurema-preta e acácia-negra. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 85, p. 61-69, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.85.986>. Acesso em: 1 jun. 2023.

CAMARGO, M. S.; BEZERRA, B. K. L.; HOLANDA, L. A.; OLIVEIRA, A. L.; VITTI, A. C.; SILVA, M. A. Silicon fertilization improves physiological responses in sugarcane cultivars grown under water deficit. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 81-91, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42729-019-0012-1>. Acesso em: 13 fev. 2025.

CAMARGO, M. S.; BEZERRA, B. K. L.; VITTI, A. C.; SILVA, M. A.; OLIVEIRA, A. L. Silicon fertilization reduces the deleterious effects of water deficit in sugarcane. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, n. 1, p. 99-111, 2017. Disponível em: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-95162017005000008&lng=en&nrm=iso&tlng=en. Acesso em: 13 fev. 2025.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES, F. J.; LIMA, A. G.; MENDONÇA, R. M. N. Crescimento de porta-enxerto de gravioleira (*Annona muricata* L.) em substratos contendo doses crescentes de rejeitos de caulim. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 8, n. 1, p. 61-66, 2008. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=50080106>. Acesso em: 26 maio. 2023.

CARNEIRO, J. G. A. **Produção e controle de qualidade de mudas florestais**. Curitiba: UFPR/FUPEF; Campos: UENF, 1995. 451p.

CARNEIRO, J. M. T.; CHACÓN-MADRID, K.; GALAZZI, R. M.; CAMPOS, B. K.; ARRUDA, S. C. C.; AZEVEDO, R. A.; ARRUDA, M. A. Z. Evaluation of silicon influence on the mitigation of cadmium-stress in the development of *Arabidopsis thaliana* through total metal content, proteomic and enzymatic approaches. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 44, p. 50-58, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.09.010>. Acesso em: 13 fev. 2025.

CAVALCANTE, Í. H. L.; PETTER, F. A.; ALBANO, F. G.; SILVA, R. R. S.; SILVA JÚNIOR, G. B. Biochar no substrato para produção de mudas de maracujazeiro amarelo. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v. 111, n. 1, p. 41-47, 2012. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5718111>. Acesso em: 15 maio. 2023.

CHEN, D.; CAO, B.; WANG, S.; LIU, P.; DENG, X.; YIN, L.; ZHANG, S. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 22882, 2016. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/srep22882>. Acesso em: 13 fev. 2025.

CHEN, H.; JIANG, J. G. Osmotic adjustment and plant adaptation to environmental changes related to drought and salinity. **Environmental Reviews**, v. 18, p. 309-319, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/A10-014>. Acesso em: 10 jun. 2023.

COSTA, E.; LEAL, P. A.M.; SANTOS, L. C. R.; VIEIRA, L. C. R. Crescimento de mudas de mamoeiro conduzidas em diferentes ambientes protegidos, recipientes e substratos na região de Aquidauana, Estado do Mato Grosso do Sul. **Maringá**, v. 32, n. 3, p. 463-470, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v32i3.4449>. Acesso em: 9 fev. 2025.

COSTA, M. E.; NASCIMENTO, E. K. Á.; MIRANDA, N. O.; PIMENTA, A. S.; RODRIGUES, A. P. M. S; MENDONÇA JÚNIOR, A. F. Efeito do biochar sobre condutividade elétrica e pH de solos irrigados com água salina. **Educamazônia-Educação, Sociedade e Meio Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 189-204, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufam.edu.br/index.php/educamazonia/article/view/6721>. Acesso em 2 maio. 2023.

DELARMELINA, W. M.; CALDEIRA, M. V. W.; FARIA, J. C. T.; GONÇALVES, E. O.; ROCHA, R. L. F. Diferentes substratos para produção de mudas de *Sesbania virgata*. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 224-233, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/floram.2014.027>. Acesso em: 29 maio. 2023.

DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **Forestry Chronicle**, v. 36, p.10-13, 1960. Disponível em: <https://doi.org/10.5558/tfc36010-1>. Acesso em: 5 maio. 2023.

DOMBROSKI, J. L. D.; FREITAS, R. M. O.; TOMCZAK, V. E.; PINTO, J. R. S.; FARIAS, R. M. Ecophysiology of water stressed *Handroanthus impetiginosus* (Mart. Ex. DC) Mattos) seedlings. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 101, p. 155-163, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/287300704_Ecophysiology_of_water_stressed_Handroanthus_impetiginosus_Mart_Ex_DC_Mattos_Seedlings. Acesso em: 4 jun. 2023.

DU, J.; ZHANG, Y.; QU, M.; YIN, Y.; FAN, K.; HU, B.; ZHANG, H.; WEI, M.; MA, C. Effects of biochar on the microbial activity and community structure during sewage sludge composting. **Bioresource Technology**, v. 272, n. 1, p.171-179, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.020>. Acesso em: 5 jun. 2023.

EDEH, I. G.; MASEK, O.; BUSS, W. A meta-analysis on biochar's effects on soil water properties – New insights and future research challenges. **Science of the Total Environment**, v. 714, p. 136857, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136857>. Acesso em: 10 fev. 2025.

EKEBAFE, M. O.; EKEBAFE, L. O.; MALIKI, M. Utilisation of biochar and superabsorbent polymers for soil amendment. **Science Progress**, v. 96, n. 1, p. 85-94, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3184/003685013X13587941096281>. Acesso em: 1 fev. 2025.

FELIPPE, D.; NAVROSKI, M. C.; AGUIAR, N. S.; PEREIRA, M. O.; MORAES, C.; AMARAL, M. Crescimento, sobrevivência e trocas gasosas de mudas de *Eucalyptus dunnii* Maiden submetidas a regimes de irrigação e aplicação de hidrogel. **Revista Florestal Mesoamericana Kurú**, n. 40, v. 17, p. 11-20, 2020. Disponível em: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-25042020000100011. Acesso em: 10 fev. 2025.

FERNANDES, M. C. O. C.; FREITAS, E. C. S.; PAIVA, H. N.; OLIVEIRA NETO, S. N. O. Crescimento e qualidade de mudas de *Citharexylum myrianthum* em resposta à fertilização nitrogenada. **Advances in Floresty Science**, v. 6, n. 1, p. 507-513, 2019. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/afor/article/view/6433>. Acesso em: 10 fev. 2025.

FERNANDES-SILVA, A. A.; LÓPES-BERNAL, A.; FERREIRA, T. C.; VILLABOS, F. J. Leaf water relations and gas exchange response to water deficit of olive (cv. Cobrançosa) in field grown conditions in Portugal. **Plant and Soil**, v. 402, p. 191-209, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-015-2786-9>. Acesso em: 8 fev. 2025.

FERREIRA, M. B.; BAKKE, O. A.; SOUSA, G. G.; BAKKE, I. A.; AZEVEDO, S. R. V.; FERREIRA, W. C. Spatial Distribution, Regeneration, growth and thicket formation of thornless *Mimosa tenuiflora* in a Caatinga site of Northeast Brazil. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 42, n. 3, p.137-149, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.9734/jeai/2020/v42i330491>. Acesso em: 2 jun. 2023.

FLORES R. A., ARRUDA E. M., DAMIN, V., SOUZA JUNIOR J. P., MARANHÃO D. D. C., CORREIA, M. A. R., PRADO, R. M. Physiological quality and dry mass production of Sorghum bicolor following silicon (Si) foliar application. **Australian Journal of Crop Science**, v. 4, p.631-638, 2018. Disponível em: <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/INFORMIT.644861260310506>. Acesso em: 13 fev. 2025.

FRANÇA, G. M.; FREIRE, A. L. O.; FRANÇA, D. R. S. F.; DINIZ, M. E. S.; SILVA, N. V. A.; ALVES, K. L. P.; CANATA, A. L. C.; FERREIRA, C. D.; ARAÚJO, S. O. S. Uso de subprodutos de mineração na produção de mudas de Ipê-de-jardim (*Tecoma stans* (L.) Juss. ex Kunth). **Revista Delos**, v. 17, n. 61, p. 01-12, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/rdelosv17.n61-064>. Acesso em: 16 jan. 2025.

FRANÇA, G. M.; FREIRE, A. L. O.; FERREIRA, C. D.; BAKKE, I. A.; FRANÇA, D. R. S. F. Gas exchange and initial growth of *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. plants under salinity conditions. **Concilium**, v. 22, n. 2, p. 555-569, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.53660/CLM-792-23A47>. Acesso em: 1 jun. 2023.

FRANÇA, G. M.; FREIRE, A. L. O.; BATISTA, A. W.; FERREIRA, C. D.; FERREIRA, D. R. S. O potássio atenua os efeitos do déficit hídrico em mudas de pereiro (*Aspidosperma pyrifolium* Mart. & Zucc.). **Conjecturas**, v. 22, n. 2, p. 266-277, 2022. Disponível em: <https://conjecturas.org/index.php/edicoes/article/view/662>. Acesso em: 30 maio. 2023.

FREIRE, J. L. O.; MOREIRA, G. H. D.; ARAÚJO, N. S.; MEDEIROS, A. K. S. Efeitos do carvão vegetal na produção de mudas de maracujazeiro-amarelo. **Revista Principia**, v. 59, n. 2, p. 527-546, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/4967>. Acesso em: 27 maio. 2023.

GAMA, G. F. V. Silicon in wheat crop under water limitation and seed tolerance to water stress during germination. **Revista Ceres**, v. 68, n. 4, p. 360-367, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-737X202168040014>. Acesso em: 10 fev. 2025.

GOMES, J. M.; COUTO, L.; LEITE, H. G.; XAVIER, A.; GARCIA, S. L. R. Parâmetros morfológicos na avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v. 26, n. 6, p. 655-664, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622002000600002>. Acesso em: 02 jan. 2025.

GOMES, J. M.; PAIVA, H. N. **Viveiros florestais – propagação sexuada**. 3.ed. Viçosa: UFV, 2011. 116 p.

GOMES, S. H. M.; GONÇALVES, F. B.; FERREIRA, R. A.; PEREIRA, F. R. M.; RIBEIRO, M. M. J. Avaliação dos parâmetros morfológicos da qualidade de mudas de *Paubrasilia echinata* (pau-brasil) em viveiro florestal. **Scientia Plena**, v.15, n.1, p. 1-10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2019.011701>. Acesso em: 31 maio. 2023.

HUSSAIN, S.; RAO, M. J.; ANJUM, M. A.; EJAZ, S.; ZAKIR, I.; ALI, M. A.; AHMAD, N.; AHMAD, S. Oxidative stress and antioxidant defense in plants under drought conditions. In: HASANUZZAMAN, M.; HAKEEM, K.; NAHAR, K.; ALHARBY, H. (Ed.). **Plant Abiotic Stress Tolerance**, p. 207-219, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-06118-0_9. Acesso em: 22 maio. 2023.

IBRAHIM, J. F. O. N.; SILVA JUNIOR, I. V.; BARROS, F. C.; PAEZ, D. R. M.; NASCENTES, A. L.; SILVA, L. D. B. Utilização do lodo de esgoto na produção de mudas e no cultivo do eucalipto (*Eucalyptus* spp). **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v.1, n.1, p. 564-579, 2019. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/1442>. Acesso em: 22 maio. 2023.

IBRAHIM, M. E. H.; ALI, A. Y. A.; ELSIDDIG, A. M. I.; ZHOU, G.; NIMIR, N. E. A.; AHMAD, I.; SULIMAN, M. S. E.; ELRADI, S. B. M.; SALIH, E. G. I. Biochar improved sorghum germination and seedling growth under salinity stress. **Journal agronomy**, v. 112, n. 2, p.911-920, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agj2.20026>. Acesso em: 5 jun. 2023.

IBF- INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS. **Bioma Caatinga**. 2020. Disponível em: https://www.ibflorestas.org.br/bioma-caatinga?utm_source=google-ads&utm_medium=cpc&utm_campaign=biomas&keyword=bioma%20caatinga&creative=282044394468&gclid=CjwKCAjwitShBhA6EiwAq3RqA52xZF5agc_S2XtycCCkfDtLMqb_CsWumVXLXwaKM8UH5mQbHUSBIxoCA7QQAvD_BwE. Acesso em 11 abr. 2023.

INSTITUTO DE PESQUISAS JARDIM BOTÂNICO DO RIO DE JANEIRO. **Flora e Funga do Brasil**. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB18874>. Acesso em: 11 abr. 2023.

JESUS, H. I.; MEDEIROS, M. L. S.; LOPES, M. F. Q.; OLIVEIRA, B. S.; SILVA, G. M.; MIELEZRSKI, F. Development and gas exchange of pre-sprouted sugarcane seedlings in three different growing substrate media. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 32, n. 4, p. 1-7, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v32i430114>. Acesso em: 29 maio. 2023.

KATTERER, T.; ROOBROECK, D.; ANDRÉN, O.; KIMUTAI, G.; KARLTUN, E.; KIRCHMANN, H.; NYBERG, G.; VANLAUWE, B.; NOWINA, K. R. Biochar addition persistently increased soil fertility and yields in maize-soybean rotations over 10 years in subhumid of kenya. **Field Crops Research**, v. 235, p. 18-26, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.015>. Acesso em: 10 fev. 2025.

KRATZ, D.; WENDLING, I. Crescimento de mudas de *Eucalyptus camaldulensis* em substratos à base de casca de arroz carbonizada. **Revista Ceres**, v. 63, p. 348-354, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201663030011>. Acesso em: 22 maio. 2023.

KRATZ, D.; WENDLING, I.; NOGUEIRA, A. C.; SOUZA, P. V. D. Substratos renováveis na produção de mudas de *Eucalyptus Bentharii*. **Ciencia Florestal**, v. 23, n. 4, p. 607-621, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509812345>. Acesso em: 7 jun. 2023.

LACERDA, C. F.; ENÉAS, J.; PINHEIRO, C. B. **Fisiologia vegetal**. Fortaleza, 2007. 352 p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia Vegetal**. São Carlos: Editora Rima, 2006. 531 p.

LAURENTINO, L. G. S. **Influência do biocarvão na fertilidade do substrato, emergência e crescimento inicial de mudas de mamão e melão**. 2021. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2021. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/22373>. Acesso em: 3 jun. 2023.

LAVINSKY, A. O.; DETMANN, K. C.; REIS, J. V.; ÁVILA, R. T.; SANGLARD, M. L.; PEREIRA, L. F.; SANGLARD, L. M. V. P.; RODRIGUES, F. A.; ARAÚJO, W. L.; MATTA, F. M. Silicon improves rice grain yield and photosynthesis specifically when supplied during the reproductive growth stage. **Journal of plant physiology**, v. 206, p. 125-132, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.09.010>. Acesso em: 13 fev. 2025.

LEITE, G. V.; MEDEIROS, T. S.; MORAIS, G. V.; BORGES, I. M. S.; SILVA, V. F.; LIRA, D. K. S. Análise a partir do uso dos resíduos de caulim na germinação da *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. **Revista Agropecuária do Semiárido**, v. 19, n. 1, p. 31-34, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v19i1.1379>. Acesso em: 10 jan. 2025.

LIMA, P. R.; HORBACH, M. A.; DRANSKI, J. A. L.; ECCO, M.; MALAVASI, M. M.; MALAVASI, U. C. Avaliação morfofisiológica em mudas de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos durante a rustificação. **Floresta e Ambiente**, v.21, n.3, p.316-326, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.058813>. Acesso em: 4 jan. 2025.

LIMA, S. L.; JUNIOR, B. H. M.; MELO-SANTOS, K. S.; REIS, S. M.; PETTER, F. A.; VILAR, C. C.; MARIMON, B. S. Biochar no manejo de nitrogênio e fósforo para a produção de mudas de angico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 2, p.120-131, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000200004>. Acesso em: 6 jun. 2023.

LIU, N.; ZHOU, J.; HAN, L.; MA, S. H.; SUN, X.; HUANG, G. Role and multi-scale characterization of bamboo biochar during poultry manure aerobic composting. **Bioresource Technology**, v. 241, n. 1, p. 190-199, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.144>. Acesso em: 5 jun. 2023.

MACEDO, T. A.; MONTEIRO, I. M.; BRAGA, R. S. S.; SANTANA, J. A. S.; CANTO, J. L. Estoque e retenção hídrica da serapilheira acumulada em plantios homogêneos de *Mimosa tenuiflora* (Willd) Poiret. **Diversitas Journal**, v. 7, n. 4, p. 2305-2313, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.48017/dj.v7i4.2355>. Acesso em: 2 jun. 2023.

MAIA, C. M. B. F.; GUIOTOKU, M.; PEIXOTO, R. T. G.; VARGAS, L. M. P. Biochar e o eucalipto. In: OLIVEIRA, E. B.; PINTO JÚNIOR, J. E. (Ed.). **O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília: Embrapa Florestas, 2021a. p. 589-610. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1131510/o-eucalipto-e-a-embrapa-quatro-decadas-de-pesquisa-e-desenvolvimento>. Acesso em: 2 jun. 2023.

MAIA, L. S.; SILVA, A. I. C.; CARNEIRO, E. S.; MONTICELLI, F. M.; PINHATI, F. R.; MULINARI, D. R. Activated carbon from palm fibres used as an adsorbent for methylene blue removal. **Journal of Polymers and the environment**, v.29, n.4, p.1162-1175, 2021b. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10924-020-01951-0>. Acesso em: 14 jan. 2025.

MARENCO R. A.; LOPES, N. F. **Fisiologia vegetal: Fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2009. 486 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3 rd edition. London: ed. Elsevier. 2012, 672 p.

MARTINS, J. D.; CARLESSO, R.; KNIES, A. E.; OLIVEIRA, Z. B.; BROETTO, T.; RODRIGUES, G. J. Potencial hídrico foliar em milho submetido ao déficit hídrico. **Irriga**, v. 15, n. 3, p. 324-334, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2010v15n3p324>. Acesso em: 14 jan. 2025.

MATEUS, F. A.; MIRANDA, C. C.; VALCARCEL, R. FIGUEIREDO, P. H. A. Estoque e capacidade de retenção hídrica da serrapilheira acumulada na restauração florestal de áreas perturbadas na Mata Atlântica. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 3, p.

336-343, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/floram.2013.024>. Acesso em: 2 jun. 2023.

MATOS, F. S.; FREITAS, I. A. S.; SOUZA, B. R.; LOPES, V. A.; ROSA, V. R. Crescimento de plantas de *Tectona grandis* sob restrição hídrica. **Agrarian**, v. 11, n. 39, p. 14-21, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.30612/agrarian.v11i39.5284>. Acesso em: 28 maio. 2023.

MELO, E. I.; SILVA, L. F. V. Biocarvão como condicionador de substrato para produção de mudas de alface. **Agropecuária Técnica**, v. 39, n. 2, p.107-111, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.25066/agrotec.v39i2.38692>. Acesso em: 7 jun. 2023.

MELO, F. J. S.; ALVES, J. M.; SEVERO, P. J. S.; SANTOS, L. C.; MESQUITA, E. F.; MARCELINO, R. M. O. S.; SANTOS, E. N.; ROCHA, J. L. A. Uso de resíduos de mineração como substrato na formação de mudas de (*Carica papaya* L.). **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 45579-45596, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-255>. Acesso em: 5 jun. 2023.

MELO, F. J. S. **Uso de resíduos do caulim e da vermiculita como substrato para produção de mudas de mamoeiro**. 2019. 48 f. Dissertação (Mestrado em Horticultura Tropical) – Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal - PB, 2019a. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/4135>. Acesso em: 27 maio. 2023.

MELO, M. R. P. **Biochar como aditivo no processo de compostagem**. 2019. 91f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba - MG, 2019b. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFTM_d4c8cf75aeab5711f7cac3f3eab5da33. Acesso em: 5 jun. 2023.

MOURA, A. R. NOGUEIRA, R. J. M. C.; SILVA, J. A. A.; LIMA, T. V. Relações hídricas e solutos orgânicos em plantas jovens de *Jatropha curcas* L. sob diferentes regimes hídricos. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 6, p. 345-354, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509822735>. Acesso em: 7 jan. 2025.

NASCIMENTO, A. V. S. **Substratos alternativos para produção de mudas de espécies florestais da família Anacardiaceae nativas da caatinga**. 2022. 149 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão - SE, 2022. Disponível em: <https://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/17499>. Acesso em: 26 maio. 2023.

NXELE, X.; KLEIN, A.; NDIMBA, B. K. Drought and salinity stress alters ROS accumulation, water retention, and osmolyte content in sorghum plants. **South African Journal of Botany**, v.108, p. 261-266, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.11.003>. Acesso em: 10 jun. 2023.

OGAWA, M.; OKIMORI, Y.; TAKAHASHI, F. Carbon Sequestration by Carbonization of Biomass and Forestation: Three Case Studies. **Mitigation and Adaptation**

Strategies for Global Change, v. 11, p. 429-444, 2006. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11027-005-9007-4>. Acesso em: 10 fev. 2025.

OLIVEIRA, L. S. B.; ANDRADE, L. A.; ALVES, A. S.; GONÇALES, G. S. Substrato e volume de recipiente na produção de mudas de jatobá (*Hymenaea courbaril* L.). **Nativa**, v. 2, n. 2, p.103-107, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.31413/nativa.v2i2.1303>. Acesso em: 30 maio. 2023.

OLIVEIRA, R. L. L., PRADO, R. M, FELISBERTO, G., CRUZ, F. J. R. Different sources of silicon by foliar spraying on the growth and gas exchange in sorghum. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.19, p.948-953, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42729-019-00092-1>. Acesso em: 13 fev. 2025.

PADILHA, N. S.; SILVA, C. J.; PEREIRA, S. B.; NETO DA SILVA, J. A. HEID, D. B.; BOTTEGA, S. P.; SCALON, S. P. Q. Crescimento inicial do pinhão-mansão submetido a diferentes regimes hídricos em latossolo vermelho distrófico. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 513-521, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509822752>. Acesso em: 1 fev. 2025.

PANDA, D.; RAO, D. N.; SHARMA, S. G.; STRASSER, R. J.; SARKAR, R. K. Subemergence effects on rice genotypes during seedling stage: probing of subemergence driven changes of photosystem 2 by chlorophyll a fluorescence induction O-J-I-P transients. **Photosynthetica**, v. 44, n. 1, p. 69-75, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11099-005-0200-1>. Acesso em: 10 jun. 2023.

PASQUINI, S. C.; SANTIAGO, L. S. Nutrients limit photosynthesis in seedlings of a lowland tropical forest tree species. **Oecologia**, v. 168, p. 311-319, 2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00442-011-2099-5>. Acesso em: 12 fev. 2025.

PEREIRA, W. E.; SOUSA, G. G.; ALENCAR, M. L.; MENDONÇA, R. M. N.; SILVA, G. L. Crescimento de mudas de mamoeiro em substratos contendo caulim. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento**, v. 3, n. 1, p. 27-35, 2008. Disponível em: <https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/91>. Acesso em: 30 maio. 2023.

PESSOA, J. L.; FREIRE, A. L. O.; COSTA, A. S. Trocas gasosas de plantas de *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC) Mattos submetidas ao déficit hídrico e posterior reidratação. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 16, n. 3, p. 269-276, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5965/223811711632017269>. Acesso em: 30 maio. 2023.

PETTER, F. A.; ANDRADE, F. R.; MARIMON JUNIOR, B. H.; GONÇALVES, L. G. V.; SOUZA, T. R. S. Biochar como condicionador de substrato para a produção de mudas de *Eucalipto*. **Revista Caatinga**, v. 25, n. 4, p. 44-51, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/2597>. Acesso em: 29 maio. 2023.

PIMENTA, A. S.; MIRANDA, N. O.; CARVALHO, M. A. B.; SILVA, G. G. C.; OLIVEIRA, E. M. M. Effects of biochar addition on chemical properties of a sandy soil from northeast Brazil. **Arabian Journal of Geosciences**, v.12, n.3, p. 1-6, 2019. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/330504270_Effects_of_biochar_addition_on_chemical_properties_of_a_sandy_soil_from_northeast_Brazil/link/5c54a1ea92851c22a3a14228/download. Acesso em: 6 jun. 2023.

PINHEIRO, C.; CHAVES, M. M. Photosynthesis and drought: can we make metabolic connections from available data? **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 3, p. 869-882, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erq340>. Acesso em: 4 jun. 2023.

QIAN, K.; KUMAR, A.; ZHANG, H.; BELLMER, D.; HUHNKE, R. Recent advances in utilization of biochar. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 1055-1064, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.074>. Acesso em: 5 jun. 2023.

RAMOS, F. R.; FREIRE, A. L. O.; FRANÇA, G. M. Crescimento e acúmulo de biomassa em mudas de craibeira (*Tabebuia aurea* (Manso) Benth. & Hook. F. ex S. Moore) sob estresse hídrico e adubação potássica. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 16, n. 4, p. 213-221, 2021. Disponível em: <http://revistas.ufcg.edu.br/acsa/index.php/ACSA/article/view/1307>. Acesso em: 30 maio. 2023.

RAMOS, F. R.; FREIRE, A. L. O. Physiological responses to drought of *Cnidoscolus quercifolius* Pohl in semi-arid conditions. **Advances in Forestry Science**, v. 6, n. 1, p. 493-499, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.34062/afs.v6i1.5735>. Acesso em: 30 maio. 2023.

RAO, S.; DU, C.; LI, AIJIA.; XIA, X.; YIN, W.; CHEN, J. Salicylic Acid Alleviated Salt Damage of *Populus euphratica*: A Physiological and Transcriptomic Analysis. **Forest**, v. 5, n. 423, p. 1-21, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/f10050423>. Acesso em: 10 fev. 2025.

RAZZAGHI, F.; OBOUR, P. B.; ARTHUR, E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. **Geoderma**, v. 361, p. 114055, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055>. Acesso em: 5 fev. 2025.

REZENDE, F. A.; SANTOS, V. A. H. F.; MAIA, C. M. B. F.; MORALES, M. M. Biochar in substrate composition for production of teak seedlings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p.1449-1456, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900043>. Acesso em: 5 jun. 2023.

RODRIGUES R. D.; FREIRE A. L. O.; NASCIMENTO NETO, J. H. Uso de rejeitos de mineração e materiais orgânicos na composição de substrato para produção de mudas de sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.). **Revista Engenharia Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 16-27, 2014. Disponível em:

<http://ferramentas.unipinhal.edu.br/engenhariaambiental/viewarticle.php?id=914&layout=abstract>. Acesso em: 21 maio. 2023.

RONDON, M.; LEHMANN, J.; RAMÍREZ, J.; HURTADO, M. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions. **Biology and fertility of soils**, v. 43, p. 699-708, 2007. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-006-0152-z>. Acesso em: 13 fev. 2025.

ROQUE, A. A.; LOIOLA, M. I. B. Potencial de uso dos recursos vegetais em uma comunidade rural no Semiárido Potiguar. **Revista Caatinga**, v. 26, n. 4, p. 88-98, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/2583>. Acesso em: 15 abr. 2023.

SÁ, L. C.; LAZAROTTO, M.; AVRELLA, E. D.; HILGERT, M. A.; FIOR, C. S. Estresse hídrico e salino no crescimento inicial de mudas de *Toona ciliata* var. *australis*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 43, p. 1-11, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4336/2023.pfb.43e202002108>. Acesso em: 2 jun. 2023.

SANDHYA, K.; PRAKASH, N. B.; MEUNIER, J. D. Diatomaceous earth as source of silicon on the growth and yield of rice in contrasted soils of Southern India. **Journal of soil science and plant nutrition**, v. 18, n. 2, p. 344-360, 2018. Disponível em: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-95162018005001201&lng=en&nrm=iso&tlng=en. Acesso em: 13 fev. 2025.

SANTISTEBAN, R. M.; CABRERA, S. P.; NETO, J. F.; SILVA, E. M. S.; CORREIA, R. C.; ALVES, R. F.; SANTOS, F. A. R.; CAMARA, C. A.; SILVA, T. M. S. Análises melissopalínológicas, físico-químicas, atividade antirradicalar e perfil químico por uplc-dad-qtof-ms/ms dos méis de *Frieseomelitta doederleini* (abelha branca): comparação com os fenólicos presentes nas flores de *Mimosa tenuiflora* (jurema preta). **Química Nova**, v. 42, n.8, p. 874-884, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170407>. Acesso em: 1 jun. 2023.

SCALON, S. P. Q.; MUSSURY, R. M.; EUZÉBIO, V. L. M.; KODAMA, F. M.; KISSMANN, C. Estresse hídrico no metabolismo e crescimento inicial de mudas de mutambo (*Guazuma ulmifolia* Lam.). **Ciência Florestal**, v. 21, n. 4, p. 655-662, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/198050984510>. Acesso em: 4 jun. 2023.

SCHNEIDER, J. R.; CAVERZAN, A.; CHAVARRIA, G. Water deficit stress, ROS involvement, and plant performance. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, n. 8, p. 1160-1181, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1556789>. Acesso em: 10 jun. 2023.

SILVA, B. R.; JÚNIOR, H. S. M.; SANTOS, A. M. S.; SILVA FILHO, A. J.; OLIVEIRA, H. A. Desenvolvimento de argamassas de reboco com a incorporação de caulim. **Revista Eletrônica Perspectivas da Ciência e Tecnologia**, v. 13, p. 74-83, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.22407/1984-5693.2021.v13.p.74-83>. Acesso em: 7 maio 2023.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 4, n. 1, p. 71-78, 2002. Disponível em: <https://www.scilit.com/publications/1e9a7579e0e7632a318f5cda63e42c3f>. Acesso em: 23 maio 2024.

SILVA, L. G. F.; SALES, R. A.; ROSSINI, F. P.; VITÓRIA, Y. T.; BERILLI, S. S. Emergência e desenvolvimento de plântulas de maracujá-amarelo em diferentes substratos. **Energia na Agricultura**, v. 34, n. 1, p. 18-27, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2019v34n01p18-27>. Acesso em: 23 maio. 2023.

SILVA, M. I.; MACKOWIAK, C.; MINOGUE, P.; REIS, A. F.; MOLINE, E. F. V. Potential impacts of using sewage sludge biochar on the growth of plant forest seedlings. **Ciência Rural**, v. 47, n. 1, p. 1-5, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160064>. Acesso em: 5 jun. 2023.

SILVA, O. M. C.; HERNANDEZ, M. M.; ARAUJO, G. C. R.; CUNHA, F. L.; EVANGELISTA, D. V. P.; LELES, P. S. S.; MELO, L. A. Potencial uso da casca de café como constituinte de substrato para produção de mudas de espécies florestais. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 4, p. 1161-1175, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509842500>. Acesso em: 28 maio. 2023.

SILVA, R. R.; ANJOS, A. B.; FREITAS, G. A.; NOGUEIRA, A. M.; FARIA, A. J. G. Desenvolvimento inicial de mudas de *Plathymenia foliolosa* Benth. sob influência de sombreamento. **Gaia Scientia**, v. 12, n. 2, p. 134-143, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2018v12n2.30813>. Acesso em: 10 fev. 2025.

SIQUEIRA, D. P.; CARVALHO G. C. M. W.; BARROSO D. G.; MARCIANO C. R. Lodo de esgoto tratado na composição de substrato para a produção de mudas de *Lafoensia glyptocarpa*. **Floresta**, v. 48, n. 2, p. 277-284, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v48i2.55795>. Acesso em: 24 maio. 2023.

SIQUEIRA, E. S. **Uso de biochar na composição de substratos para a produção de mudas florestais**. 2022. 64 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Unidade Acadêmica Especializada em Ciências Agrárias, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba - RN, 2022. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFRN_ef59ca48aa081144b50e74f114c6b89a. Acesso em: 5 jun. 2023.

SLAMANI, R. M.; BEJGER, R.; WLODARCZYK, M.; KULPA, D.; SIENKIEWICZ, M.; GOLEBIEWSKA, D.; SKÓRSKA, E.; JARUGA, A. U. Effect of Humic Acids on Soybean Seedling Growth under Polyethylene-Glycol-6000-Induced Drought Stress. **Agronomy**, v. 12, n. 5, p. 11-17, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy12051109>. Acesso em: 5 jun. 2023.

SOUZA, B. V.; SOUTO, J. S.; SOUTO, P. C.; SALES, F. D. C. V.; GUERRINI, I. A. Avaliação da sazonalidade da deposição de serapilheira em área de preservação da Caatinga na Paraíba, Brasil. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 12, n. 3, p. 325-331, 2016. Disponível em:

<http://revistas.ufcg.edu.br/acsa/index.php/ACSA/article/view/865>. Acesso em: 2 ago. 2023.

TABARELLI, M.; LEAL, I. R.; SCARANO, F. R.; SILVA, J. Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade. **Ciência e Cultura, São Paulo**, v. 70, n. 4, p. 25-29, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602018000400009>. Acesso em: 2 ago. 2023.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 719p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed.- Porto Alegre: Artmed, 2017. 479 p.

TAVARES, V. C.; ARRUDA, Í. R. P.; SILVA, D. G. Desertificação, mudanças climáticas e secas no semiárido brasileiro: uma revisão bibliográfica. **Geosul**, v. 34, n. 70, p. 385-405, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2019v34n70p385>. Acesso em: 25 abr. 2023.

TOLEDO, F. H. S. F.; VENTURIN, N.; CARLOS, L.; DIAS, B. A. S.; VENTURIN, R. P.; MACEDO, R. L. G. Composto de resíduos da fabricação de papel e celulose na produção de mudas de eucalipto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.7, p. 711-716, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n7p711-716>. Acesso em: 25 maio. 2023.

TÒTH, S. Z.; SCHANSKER, G.; STRASSER, R. J. A non-invasive assay of the plastoquinone pool redox state based on the OJIP-transient. **Photosynthesis Research**, v. 93, n. 1-3, p.193-203, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11120-007-9179-8>. Acesso em: 10 jun. 2023.

TRAZZI, P. A.; CALDEIRA, M. V. W.; PASSOS, R. R.; GONÇALVES, E. O. Substratos de origem orgânica para produção de mudas de teca (*Tectona grandis* Linn. F.). **Ciência Florestal**, v. 23, n. 3, p. 401-409, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509810551>. Acesso em: 26 maio. 2023.

TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R.; DIECKOW, J.; MANGRICH, A. S.; HIGA, R. C. V. Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 875-887, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509832128>. Acesso em: 5 jun. 2023.

TSOLIS, V.; BAROUCHAS, P. Biochar as Soil Amendment: The Effect of Biochar on Soil Properties Using VIS-NIR Diffuse Reflectance Spectroscopy, Biochar Aging and Soil Microbiology—A Review. **Land**, v. 12, n. 8, p. 1-42, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land12081580>. Acesso em: 2 jan. 2025.

TURNER, N. C. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. **Plant and soil**, v. 58, p. 339-366, 1981. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02180062>. Acesso em: 23 dez. 2024.

VALADARES, J.; PAULA, N. F.; PAULA, R. C. Physiological changes in eucalyptus

hybrids under different irrigation regimes. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 4, p. 805-814, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000400019>. Acesso em: 1 fev. 2025.

VICIEDO, D. O.; PRADO, R. M.; TOLEDO, R. L.; SANTOS, L. C. N.; HURTADO, A. C.; NEDD, L. L. T.; GONZALEZ, L. C. Silicon supplementation alleviates ammonium toxicity in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, p. 413-419, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42729-019-00043-w>. Acesso em: 13 fev. 2025.

VIEIRA, A. C. C.; TERRA, D. L. C. V.; FONSECA, E. F.; SOUZA, P. B. Utilização de resíduos agroindustriais na produção de mudas de aroeira (*Myracrodruon urundeuva* Fr. Allemão). **Magistra**, v. 30, p. 86-93, 2019. Disponível em: <https://www3.ufrb.edu.br/magistra/index.php/magistra/article/view/648>. Acesso em: 31 maio. 2023.

VOLKWEIS, C. R.; DRANSKI, J. A. L.; ORO, P.; MALAVASI, U. C.; MALAVASI, M. M. Efeito da tigmomorfogênese na morfometria de mudas de *Maytenus ilicifolia* (Schrad.) Planch. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 2, p. 339-346, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509814571>. Acesso em: 7 de fev. 2025.

WANG, J.; WANG, S. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p.1002-1022, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>. Acesso em: 6 jun. 2023.

WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, p. 240-261, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>. Acesso em: 5 jun. 2023.

ZAHOOR, R.; DONG, H.; ABID, M.; ZHAO, W.; WANG, Y.; ZHOU, Z. Potassium fertilizer improves drought stress alleviation potential in cotton by enhancing photosynthesis and carbohydrate metabolism. **Environmental and Experimental Botany**, v. 137, p. 73-83, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.02.002>. Acesso em: 12 fev. 2025.

APÊNDICES

Tabela 3A – Resumo da análise de variância do Teor Relativo de Água (*TRA*) das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	128,09701	42,69900	2,5345 ^{ns}
Regimes Hídricos	1	9,26651	9,26651	0,5500 ^{ns}
Substratos x Regimes Hídricos	3	11,30171	3,76724	0,2236 ^{ns}
Tratamentos	7	148,66524	21,23789	1,2606 ^{ns}
Resíduo	24	404,33615	16,84734	
Total	31	553,00139		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 3B – Resumo da análise de variância do potencial hídrico foliar (ψ_w) das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	0,85961	0,28654	4,4141 *
Regimes Hídricos	1	0,11281	0,11281	1,7379 ^{ns}
Substratos x Regimes Hídricos	3	0,74511	0,24837	3,8261 *
Tratamentos	7	1,71754	0,24536	3,7798 *
Resíduo	24	1,55795	0,06491	
Total	31	3,27549		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 4A – Resumo da análise de variância da Condutância Estomática (gs) das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	2,55386	0,85129	8,3437 *
Regimes Hídricos	1	0,04351	0,04351	0,4265 ^{ns}
Substratos x Regimes Hídricos	3	0,49996	0,16665	1,6334 ^{ns}
Tratamentos	7	3,09734	0,44248	4,3369 *
Resíduo	24	2,44865	0,10203	
Total	31	5,54599		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 4B – Resumo da análise de variância da Taxa de transpiração (E) das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	82,28281	7,42760	32,9142 *
Regimes Hídricos	1	2,46975	2,46975	2,9638 ^{ns}
Substratos x Regimes Hídricos	3	1,52646	0,50882	0,6106 ^{ns}
Tratamentos	7	86,27902	12,32557	14,7912 *
Resíduo	24	19,99932	0,83331	
Total	31	106,27835		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 4C – Resumo da análise de variância da Taxa de fotossíntese (A) das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	272,22043	24,07348	5,7118 *
Regimes Hídricos	1	5,42851	5,42851	0,1384 ^{ns}
Substratos x Regimes Hídricos	3	49,09831	6,36610	0,4172 ^{ns}
Tratamentos	7	726,74725	3,82104	2,6465 *
Resíduo	24	941,51810	39,22992	
Total	31	1668,26535		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 4D – Resumo da análise de variância da Concentração Interna de CO₂ (Ci) das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	7072,26111	2357,42047	7,3250 *
Regimes Hídricos	1	882,00000	882,00000	2,7405 ^{ns}
Substratos x Regimes Hídricos	3	173,53112	57,84371	0,1797 ^{ns}
Tratamentos	7	8127,79224	1161,11318	3,6078 *
Resíduo	24	7724,00005	321,83341	
Total	31	15851,79229		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 4E – Resumo da análise de variância da Eficiência no Uso da água (*EUA*) das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	7,98468	2,66156	11,2313 *
Regimes Hídricos	1	1,21290	1,21290	5,1182 *
Substratos x Regimes Hídricos	3	3,72668	1,24223	5,2420 *
Tratamentos	7	12,92427	1,84632	7,7911 *
Resíduo	24	5,68747	0,23698	
Total	31	18,61175		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 4F – Resumo da análise de variância da Eficiência de Carboxilação (*A/Ci*) das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	0,02745	0,00915	4,1729 *
Regimes Hídricos	1	0,00080	0,00080	0,3649 ^{ns}
Substratos x Regimes Hídricos	3	0,00267	0,00089	0,4054 ^{ns}
Tratamentos	7	0,03091	0,00442	2,0143 *
Resíduo	24	0,05262	0,00219	
Total	31	0,08353		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 5A – Resumo da análise de variância da altura das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	4552,34250	517,44750	6,9870 *
Regimes Hídricos	1	4371,12500	371,12500	20,1266 *
Substratos x Regimes Hídricos	3	760,08250	53,36083	1,1666 ^{ns}
Tratamentos	7	9683,55000	383,36429	6,3696 *
Resíduo	24	5212,34500	217,18104	
Total	31	14895,89500		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 5B – Resumo da análise de variância da Taxa de Crescimento Absoluto (TCA) das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	0,48641	0,16214	6,3147 *
Regimes Hídricos	1	0,51765	0,51765	20,1609 *
Substratos x Regimes Hídricos	3	0,09791	0,03264	1,2711 ^{ns}
Tratamentos	7	1,10197	0,15742	6,1312 *
Resíduo	24	0,61623	0,02568	
Total	31	1,71820		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 5C – Resumo da análise de variância do diâmetro das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	8,12500	2,70833	5,4122 *
Regimes Hídricos	1	9,24500	9,24500	18,4746 *
Substratos x Regimes Hídricos	3	2,41500	0,80500	1,6087 ^{ns}
Tratamentos	7	19,78500	2,82643	5,6482 *
Resíduo	24	12,01000	0,50042	
Total	31	31,79500		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 6A – Resumo da análise de variância do Massa Seca da Parte Aérea (*MSPA*) das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	84,50118	28,16706	7,9850 *
Regimes Hídricos	1	85,81810	85,81810	24,3283 *
Substratos x Regimes Hídricos	3	40,12664	13,37555	3,7918 *
Tratamentos	7	210,44592	30,06370	9,5227 *
Resíduo	24	84,66000	3,52750	
Total	31	295,10592		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 6B – Resumo da análise de variância do Massa Seca das Raízes (*MSR*) das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	17,39978	5,79993	6,2922 *
Regimes Hídricos	1	15,18832	15,18832	16,4773 *
Substratos x Regimes Hídricos	3	9,23525	3,07842	3,3397 *
Tratamentos	7	41,82335	5,97476	6,4818 *
Resíduo	24	22,12248	0,92177	
Total	31	63,94583		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 6C – Resumo da análise de variância da Razão Parte Aérea/Raiz (*RPAR*) das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	51,98468	17,32823	13,7159 *
Regimes Hídricos	1	0,05120	0,05120	0,0405 ^{ns}
Substratos x Regimes Hídricos	3	2,09907	0,69969	0,5538 ^{ns}
Tratamentos	7	54,13495	7,73356	6,1214 *
Resíduo	24	30,32080	1,26337	
Total	31	84,45575		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 6D – Resumo da análise de variância da Massa Seca Total (*MSTt*) das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	153,55597	51,18532	6,8998 *
Regimes Hídricos	1	173,21258	173,21258	23,3492 *
Substratos x Regimes Hídricos	3	75,22617	25,07539	3,3802 *
Tratamentos	7	401,99471	57,42782	7,7413 *
Resíduo	24	178,04050	7,41835	
Total	31	580,03521		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 7A – Resumo da análise de variância da Razão Altura/Diâmetro (*RAD*) das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	52,46044	17,48681	6,6411 *
Regimes Hídricos	1	29,87645	29,87645	11,3464 *
Substratos x Regimes Hídricos	3	1,45765	0,48588	0,1845 ^{ns}
Tratamentos	7	83,79454	11,97065	4,5462 *
Resíduo	24	63,19515	2,63313	
Total	31	146,98969		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 7B – Resumo da análise de variância do Índice de Qualidade de Dickson (*IQD*) das mudas de jurema-preta.

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado
Substratos	3	0,46688	0,15563	6,3198 *
Regimes Hídricos	1	0,45601	0,45601	18,5183 *
Substratos x Regimes Hídricos	3	0,22226	0,07409	3,0086 ^{ns}
Tratamentos	7	1,14515	0,16359	6,6434 *
Resíduo	24	0,59100	0,02463	
Total	31	1,73615		

FV: Fonte Variação; GL: Graus de Liberdade; SQ: Soma dos Quadrados; QM: Quadrado Médio e F: Estatística do Teste F. * Significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. ^{ns} Não significativo pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância.