

UFRRJ

INSTITUTO DE AGRONOMIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

TESE

**Otimização do Uso da Água em Mudas de Espécies
Arbóreas Produzidas com Níveis de Sombreamento e
Água Residuária de Bovinocultura**

Laiz de Oliveira Silva

2023



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**OTIMIZAÇÃO DO USO DA ÁGUA EM MUDAS DE ESPÉCIES
ARBÓREAS PRODUZIDAS COM NÍVEIS DE SOMBREAMENTO E
ÁGUA RESIDUÁRIA DE BOVINOCULTURA**

LAIZ DE OLIVEIRA SILVA

*Sob a Orientação do Professor
Daniel Fonseca de Carvalho*

*e Coorientação dos Professores
Henrique Vieira de Mendonça
Paulo Sergio dos Santos Leles*

Tese submetida como requisito parcial
para obtenção do grau de **Doutora**, no
Programa de Pós-Graduação em
Agronomia – Ciência do Solo, Área de
Concentração em Manejo do Solo e
Qualidade Ambiental.

Seropédica, RJ
Maio de 2023

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S5860	<p>Silva, Laiz de Oliveira, 1994-</p> <p>Otimização do uso da água em mudas de espécies arbóreas produzidas com níveis de sombreamento e água resíduária de bovinocultura / Laiz de Oliveira Silva. – Seropédica, RJ, 2023.</p> <p>68 f.</p> <p>Orientador: Daniel Fonseca de Carvalho. Coorientador: Henrique Vieira de Mendonça. Coorientador: Paulo Sérgio dos Santos Leles.</p> <p>Tese (Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Agronomia - Ciência do Solo, 2023.</p> <p>1. Produção de mudas arbóreas. 2. Mata Atlântica. 3. Uso da água. 4. Destinação de resíduos. 5. Biossólido. I. Carvalho, Daniel Fonseca de, 1968-, orient. II. Mendonça, Henrique Vieira de , -, coorient. III. Leles, Paulo Sérgio dos Santos , -, coorient. IV Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em Agronomia - Ciência do Solo. V. Título.</p>
-------	--

É permitida a cópia parcial ou total desta Tese, desde que seja citada a fonte.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA (CIÊNCIAS DO SOLO)**



HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO Nº 7 / 2023 - CPGACS (12.28.01.00.00.00.27)

Nº do Protocolo: 23083.031926/2023-74

Seropédica-RJ, 19 de maio de 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE AGRONOMIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

LAIZ DE OLIVEIRA SILVA

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo, Área de Concentração em Manejo do Solo e Qualidade Ambiental.

TESE APROVADA EM 18/05/2023.

Daniel Fonseca de Carvalho. Dr. UFRRJ

(Orientador)

José Carlos Arthur Junior. Dr. UFRRJ

Leonardo Duarte Batista da Silva. Dr. UFRRJ

Jonathas Batista Gonçalves Silva. Dr. UFJF

Magali Ribeiro da Silva. Dr. UNESP

(Assinado digitalmente em 19/05/2023 10:07)

DANIEL FONSECA DE CARVALHO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.00.44)
Matrícula: 1224578

(Assinado digitalmente em 19/05/2023 11:13)

JOSE CARLOS ARTHUR JUNIOR
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptSil (12.28.01.00.00.00.00.31)
Matrícula: 2270076

(Assinado digitalmente em 19/05/2023 13:14)

LEONARDO DUARTE BATISTA DA SILVA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.44)
Matrícula: 2353141

(Assinado digitalmente em 19/05/2023 13:16)

JONATHAS BATISTA GONÇALVES SILVA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 066.505.066-64

(Assinado digitalmente em 19/05/2023 10:44)

MAGALI RIBEIRO DA SILVA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 103.927.998-80

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **7**, ano: **2023**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO**, data de emissão: **19/05/2023** e o código de verificação: **f34c07aad8**

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho às instituições de ensino que me trouxeram até aqui: Escola Municipal Maria Catarina de Freitas, Colégio Estadual Silvio de Castro Ribeiro, Instituto Federal Goiano - Campus Ceres e minha amada Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, assim como a todos os profissionais envolvidos.

Dedico também a minha família e em especial ao meu sobrinho Pedro Silva Latorre Arrais.

AGRADECIMENTO

Jornadas... Jornada significa “trajeto que se percorre num dia”. Quantas jornadas me trouxeram até aqui! Ao pensar nisso, eu penso em quantas pessoas estiveram presentes e influenciaram em minhas jornadas. Muitas, incontáveis. A elas agradeço do fundo do meu coração.

Percorro minhas jornadas com minhas próprias pernas, mas a força de cada passo eu tiro de outros. Primeiro, minha base: Gilmar, Jailda, Lara, minha amada e sempre lembrada Vó “Licinha”, avôs, tios e tias, primos. Perdi tanto da vida de vocês por escolher jornadas que trilhavam caminhos cada vez mais distantes. Peço desculpas por cada casamento e nascimento perdido, pela ausência nos almoços de domingo, pelos aniversários esquecidos. A força que tirei de vocês veio com um preço muito caro: a ausência.

Nesse novo mundo, precisei me adaptar, precisei esconder a dor da saudade, precisei seguir minha jornada. Então, encontrei Afonso, meu companheiro, minha segurança. Agradeço a você, sua família e seus amigos por me acolherem. Por me incluírem. Ah, Chico! Aqui você merece ser citado, obrigada por tanto amor.

Quando digo "novo mundo", refiro-me à minha chegada na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, meu lar da última década. Aqui, me fiz adulta, aprendi a amar, chorei, caí e me levantei. Agradeço por cada segundo vivido e cada aprendizado aqui adquirido.

Na jornada final, meu doutoramento, não foi fácil, por assim dizer. Tivemos uma pandemia, tivemos que nos adaptar, sofri e sofro, são muitos sentimentos. Nessa última grande jornada, eu tive agentes que facilitaram meus passos. A eles agradeço: Grupo de Pesquisa Água e Solo em Sistemas Agrícolas, Laboratório de Pesquisas e Estudos em Reflorestamento, Grupo de Pesquisa em Engenharia e Monitoramento em Biossistemas, que viabilizaram a pesquisa e foram fonte de respostas.

Agradeço a todo o corpo docente e, em especial, aos professores Daniel Fonseca de Carvalho, Henrique Vieira de Mendonça e Paulo Sergio dos Santos Leles, pela orientação, amizade e paciência.

Citarei nomes aqui, provavelmente faltarei esquecendo de vários. São muitos passos que são dados juntos, alguns muito próximos e outros mais distantes, todos na mesma direção. Bruno, Maria Clara, João, Juliane e Gabriel, mãos doadas para dividir meus calos. Agradeço a colaboração em nossos trabalhos. Melania, Luiz Alberto, Stéfanny, Carlos, Amanda, Michel, Mateus, Marco Aurelio e tantos outros colegas da pós-graduação. Dividir esse fardo com vocês tornou o peso e a responsabilidade mais leves.

Por último e talvez mais importante, importante por permitir e colaborar para que eu trilhasse esse caminho: Programa de Pós-graduação em Agronomia – Ciência do Solo e todas as pessoas envolvidas: secretários, professores, coordenadores, técnicos e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelos financiamentos.

“Que as dificuldades que eu experimentar ao longo da jornada não me roubem a capacidade de encanto” (Ana Jácomo).

BIOGRAFIA

Nascida em Anápolis/GO, em 1994, filha da Sra. Jailda Ferreira da Silva Gonzaga e do Sr. Gilmar Gonzaga de Oliveira, iniciou a alfabetização em 1998, na Escola Municipal Maria Catarina de Freitas, em Jaraguá/GO. Concluiu o ensino fundamental em 2008, no Colégio Estadual Silvio de Castro Ribeiro, no mesmo município da alfabetização. Em 2009 mudou-se para o município de Ceres/GO onde iniciou o Curso Técnico em Agropecuária integrado ao Ensino Médio, no Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, tendo concluído em 2011. Ao final do curso prestou o ENEM e por intermédio da nota alcançada ingressou em 2012 no curso de Agronomia, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ. Em 2017 colou grau e ingressou no Curso de Pós-Graduação em Fitotecnia/UFRRJ, em nível de Mestrado. Em 2019 concluiu Mestrado e iniciou Residência em Agronomia/UFRRJ no Projeto: Mapeamento Digital de Solos em Áreas de Exploração e Produção de Óleo e Gás - Estudos de caso dos campos do Norte e do Nordeste brasileiro. Em 2020 foi aprovada e ingressou no curso de Pós-graduação em Agronomia - Ciência do Solo, na mesma casa, nível de Doutorado.

RESUMO GERAL

SILVA, Laiz de Oliveira. **Otimização do Uso da Água em Mudas de Espécies Arbóreas Produzidas com Níveis de Sombreamento e Água Residuária de Bovinocultura**, 2023. 68f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

A preservação e recuperação do meio ambiente associadas ao uso racional dos recursos hídricos são ações cruciais para a busca da sustentabilidade do planeta. Torna-se assim cada vez mais importante o emprego de soluções alternativas na cadeia de produção de mudas de espécies arbóreas, visando, sobretudo a restauração florestal de biomas desmatados. O manejo automatizado da irrigação em viveiros associado ao uso de águas residuárias e lodo de esgoto podem minimizar impactos ambientais, além do uso de recursos hídricos e dos custos energéticos na produção de mudas. De junho de 2021 a março de 2022 foram conduzidos experimentos com o objetivo de avaliar a produção de mudas de espécies arbóreas nativas da Mata Atlântica com diferentes lâminas e fontes de água de irrigação, e níveis de sombreamento. No primeiro experimento, água de abastecimento (T_1) e água residuária de bovinocultura (ARB) tratada com ozonização por 1 (T_2) e 2 h (T_3) foram aplicadas nas doses de 100; 83,3; 66,7 e 56,7% de reposição hídrica em mudas de *Dalbergia nigra*, cultivadas com biossólido, utilizando níveis de sombreamento de 37,6 (C_2); 49,4 (C_3) e 75,8% (C_4), e a pleno sol (C_1). Com a ozonização da ARB, houve aumento do pH e redução da condutividade elétrica, sólidos totais e turbidez, permitindo seu uso para irrigação de mudas florestais. Os maiores volumes de água aplicados variaram de 1,556 (T_3C_1) a 2,342 L planta⁻¹ (T_2C_1). A ARB tratada proporcionou crescimento satisfatório das mudas, principalmente com o tratamento de 1 h, proporcionando índice de qualidade de Dickson (IQD) de 0,47 a pleno sol, e melhor produtividade de água (3,8 g L⁻¹), com reposição total da necessidade hídrica das mudas (100%). Quando plantadas em área de restauração florestal, o crescimento vegetativo inicial das mudas foi beneficiado pelos nutrientes fornecidos pela ARB. No segundo experimento, mudas de *Cariniana estrellensis* e *Gallesia integrifolia* foram produzidas com níveis de sombreamento e água de abastecimento como fonte para irrigação suplementar. As mudas receberam, em média, de 2,97 a 3,94 L planta⁻¹ (*C. estrellensis*) e de 3,31 a 3,83 L planta⁻¹ (*G. integrifolia*). As mudas de *C. estrellensis* cultivadas com maiores níveis de sombreamento (49,4% e 75,8%) apresentaram maior crescimento tanto na fase de viveiro como em campo, após 12 meses de monitoramento, alcançando altura de até 76 cm, em média. As mudas de *G. integrifolia* produzidas com sombreamento de 49,4% apresentaram melhor desempenho em altura e diâmetro durante a fase de viveiro e melhor adaptação após o transplantio. Esses resultados podem ser utilizados como ferramentas de apoio à decisão para populações rurais, empresas madeireiras e estruturas estaduais de manejo florestal para silvicultura.

Palavras-chave: Irrigação automatizada. Mata Atlântica. Biossólido. Recuperação de recursos. Gerenciamento de resíduos. Viveiro florestal. Restauração florestal.

GENERAL ABSTRACT

SILVA, Laiz de Oliveira. **Optimization of Water Use in Tree Species Seedlings Produced with Shading Levels and Cattle Wastewater**, 2023. 68p. Thesis (Doctorate in Agronomy, Soil Science). Institute of Agronomy, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2023.

The preservation and recovery of the environment associated with the rational use of water resources are crucial actions in the quest for sustainability of the planet. Thus, the use of alternative solutions in the production chain of seedlings of tree species becomes increasingly important, changing, above all, the forest restoration of deforested biomes. The automated management of supervision in nurseries associated with the use of wastewater and sewage sludge can minimize environmental impacts, in addition to the use of water resources and energy costs in the production of seedlings. From June 2021 to March 2022, experiments were carried out with the objective of evaluating the production of seedlings of tree species native to the Atlantic Forest with different depths and sources of irrigation water, and shading levels. In the first experiment, supply water (T_1) and cattle wastewater (CWW) treated with ozonation for 1 (T_2) and 2 h (T_3) were applied at doses of 100; 83.3; 66.7 and 56.7% of water replacement in *Dalbergia nigra* seedlings, cultivated with biosolid, using shading levels of 37.6 (C_2); 49.4 (C_3) and 75.8% (C_4), and in full sun (C_1). With the ozonation of CWW, there was an increase in pH and a reduction in electrical conductivity, total solids and turbidity, allowing its use for irrigation of forest seedlings. The largest volumes of water applied ranged from 1.556 (T_3C_1) to 2.342 L plant⁻¹ (T_2C_1). The treated CWW provided satisfactory seedling growth, especially with the 1 h treatment, providing a Dickson quality index (DQI) of 0.47 in full sun, and better water productivity (3.8 g L⁻¹), with total replacement of the seedlings' water requirement (100%). When planted in a forest restoration area, the initial vegetative growth of the seedlings benefited from the nutrients supplied by the CWW. In the second experiment, *Cariniana estrellensis* and *Gallesia integrifolia* seedlings were produced with shading levels and supply water as a source for supplemental irrigation. The seedlings received, on average, from 2.97 to 3.94 L plant⁻¹ (*C. estrellensis*) and from 3.31 to 3.83 L plant⁻¹ (*G. integrifolia*). *C. estrellensis* seedlings cultivated with higher levels of shading (49.4% and 75.8%) showed greater growth both in the nursery and in the field, after 12 months of monitoring, reaching a height of up to 76 cm, on average. The *G. integrifolia* seedlings produced with 49.4% shading showed better performance in height and diameter during the nursery phase and better adaptation after transplanting. These results can be used as decision support tools for rural populations, logging companies and state forest management structures for silviculture.

Keywords: Automated irrigation. Atlantic forest. Biosolids. Resource recovery. Waste management. Forest nursery. Forest restoration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema experimental com duas coberturas (parcela) e três tipos de água para irrigação (subparcela).	8
Figura 2. Reator de leito fixo construído com material de PVC, conectado ao gerador de O ₃ por mangueiras, e aspecto visual das amostras de efluentes brutos (1) e amostras de efluentes após tratamento por ozonização por 1 h (2) e 2 h (3).	9
Figura 3. Volumes de precipitação (Ppt) e evapotranspiração de referência (ET ₀) ao longo do período experimental.	13
Figura 4. Volume de água aplicado por planta em condições de pleno sol (A) e com cobertura (B), para os diferentes tratamentos. T ₁ – água de controle; T ₂ - água resíduária de bovinocultura ozonizada por 1 h; T ₃ – água resíduária de bovinocultura ozonizada por 2 h.	15
Figura 5. Biofilme formado na superfície do tubo preenchido com biossólido.	16
Figura 6. Crescimento de mudas de <i>D. nigra</i> em altura e diâmetro em função dos dias após a emergência (DAE), produzidas a pleno sol (A e B) e 50% de cobertura (C e D). (*p<0.05).	17
Figura 7. Crescimento de mudas de <i>D. nigra</i> em altura e diâmetro em função do volume irrigado por planta, produzidas a pleno sol (A) e sob sombreamento (B) (*p<0,05).	19
Figura 8. Crescimento em altura e diâmetro de mudas de <i>D. nigra</i> , plantadas em área de restauração florestal da Mata Atlântica, sob coberturas C ₁ (A e B) e C ₂ (C e D). C ₁ :pleno sol; C ₂ : 49,4% de sombreamento; T ₁ : água controle; T ₂ : ARB tratada por 1h; T ₃ : ARB tratada por 2h. As médias seguidas na coluna pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade; (n = 6).	20
Figura 9. Disposição das bandejas na bancada metálica (A), malha emissores (B), seção lateral indicando o posicionamento do AAI no tubo (C) e vista do sistema de bombeamento acoplado às válvulas solenoides (D).	31
Figura 10. Volumes aplicados nos períodos de avaliação das mudas de <i>D. nigra</i> nas diferentes coberturas e no tratamento com 100% de reposição hídrica, para T ₁ (A), T ₂ (B) e T ₃ (C). T ₁ - água de controle; T ₂ - efluente bovino ozonizado por 1 h; T ₃ - efluente bovino ozonizado por 2 h; C ₁ - pleno sol; C ₂ - 37,6%; C ₃ - 49,4 %; e C ₄ - 75,8% de atenuação.	35
Figura 11. Crescimento em altura (esquerda) e diâmetro (direita) das mudas de <i>D. nigra</i> nas condições de pleno sol (C1) e com cobertura (C2, C3 e C4), no tratamento com 100% de reposição hídrica, nos tipos de água A e B (T1: água controle), C e D (T2: ARB tratada 1h) e E e F (T3 ARB tratada 2h).	36
Figura 12. Crescimento de mudas de <i>D. nigra</i> em altura (esquerda) e diâmetro (direita) em relação ao volume irrigado. Os pontos representam as quatro lâminas aplicadas, ajustes foram feitos com valores médios alcançados em cada regime hídrico. A e B (T1: água controle), C e D (T2: ARB tratada 1h) e E e F (T3 ARB tratada 2h).	37
Figura 13. Índice de Qualidade de Dickson em relação ao volume total recebido por planta. Os pontos representam as quatro lâminas aplicadas, ajustes foram feitos com valores médios alcançados em cada regime hídrico. A (T1: água controle), B (T2: ARB tratada 1h) e C (T3 ARB tratada 2h).	39
Figura 14. Produtividade da água (g L ⁻¹). Análise realizada comparando os valores alcançados em cada lâmina entre as coberturas (a esquerda) e comparando as lâminas	

dentro de cada cobertura (a direita), nos tipos de água A e B (T1: água controle), C e D (T2: ARB tratada 1h) e E e F (T3 ARB tratada 2h). *p < 0,05.	40
Figura 15. Disposição dos tubetes na bandeja (A) e disposição das bandejas na bancada (B), sendo uma bandeja por espécie.....	52
Figura 16. Número de acionamentos e volumes de água aplicados (chuva + irrigação) em mudas de <i>C. estrellensis</i> (A) e <i>G. integrifolia</i> (B) nas diferentes coberturas de sombreamento C1 - pleno sol; C2 - 37,6%; C3 - 49,4 %; e C4 - 75,8% de atenuação.	56
Figura 17. Crescimento em altura e diâmetro, respectivamente, de mudas de <i>C. estrellensis</i> (A e C) e <i>G. integrifolia</i> (B e D) ao longo do período experimental produzidas a pleno sol (C ₁) e nos sombreamentos 37,6% (C ₂), 49,4% (C ₃) e 75,8% (C ₄) aos 130 dias após a emergência (DAE). Significativo a 95% de probabilidade pelo teste t, em cada período.	57
Figura 18. Variação na altura das mudas (A), diâmetro do caule (B), área foliar (C), clorofila a (D), índice de qualidade de Dickson - IQD (E) e produtividade da água de irrigação (F), para <i>C. estrellensis</i> e <i>G. integrifolia</i> em níveis de sombreamento (NS).....	58
Figura 19. Crescimento em altura e diâmetro de mudas de <i>C. estrellensis</i> (A) e <i>G. integrifolia</i> (B) plantadas em área de restauração florestal da Mata Atlântica, produzidas em viveiro em pleno sol (C1) e nos sombreamentos 37,6% (C2), 49,4% (C3) e 75,8% (C4). Médias seguidas na coluna pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização físico-química de efluentes em diferentes cenários de tratamento e para a fonte de controle.....	12
Tabela 2. Acionamento do sistema de irrigação para produção de mudas de <i>D. nigra</i> sob diferentes condições de cobertura e tipos de água.....	14
Tabela 3. Atributos morfológicos de mudas de <i>D. nigra</i> a pleno sol (C_1) e sob cobertura com 50% de sombreamento (C_2) aos 122 dias após a emergência (DAE).....	18
Tabela 4. Temperaturas e umidades relativas máximas e mínimas, radiação solar e ETo médias diárias nos períodos entre avaliações dos experimentos	34
Tabela 5. Temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, ETo média diária e precipitação acumulada nos períodos entre avaliações dos experimentos	54
Tabela 6. Médias da temperatura do ar, umidade relativa e precipitação acumulada dos períodos entre avaliações das mudas em campo.....	55

LISTA DE ABREVIASÕES

AAI	Acionador automático de irrigação
ANOVA	Análise de variância
ARB	Água resíduária de bovinocultura
ARF	Área de restauração florestal
C	Cobertura (nível de sombreamento)
CE	Condutividade elétrica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total
CUD	Coeficiente de Uniformidade de distribuição
DAE	Dias após a emergência
DAP	Dias após o plantio
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DC	Diâmetro do coleto
DQO	Demanda química de oxigênio
ET₀	Evapotranspiração de referência
H	Altura
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IQD	Índice de Qualidade de Dickson
MSPA	Massa seca de parte área
MSR	Massa seca de raiz
NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
PA_i	Produtividade da água de irrigação
PPT	Precipitação
RAS	Razão de adsorção de sódio
ST	Sólidos totais
SST	Sólidos solúveis totais
T	Tratamento (Tipo de água)
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket (reator anaeróbio de fluxo ascendente)
V_a	Volume total de água aplicado por irrigação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. CAPÍTULO I PRODUÇÃO DE MUDAS FLORESTAIS UTILIZANDO LODO DE ESGOTO E IRRIGAÇÃO AUTOMATIZADA COM EFLUENTE BOVINO OZONIZADO 2	
2.1 RESUMO.....	3
2.2 ABSTRACT.....	4
2.3 INTRODUÇÃO	5
2.4 MATERIAL E MÉTODOS	7
2.4.1 Área Experimental e Plantio de Mudas.....	7
2.4.2 Coleta e Tratamento de Água Residuária de Bovinocultura (ARB).....	8
2.4.3 Sistema de Irrigação.....	9
2.4.4 Monitoramento Agroclimático.....	10
2.4.5 Biometria das Mudas.....	10
2.4.6 Plantio de Mudas em uma Área de Restauração Florestal.....	11
2.4.7 Análise Estatística	11
2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	12
2.5.1 Qualidade de Resíduos Tratados Utilizados em Irrigação em Viveiros	12
2.5.2 Aspectos Meteorológicos e Volume Aplicados por Irrigação	13
2.5.3 Crescimento e Qualidade de Mudas Florestais em Viveiros	16
2.5.4 Crescimento e Qualidade Inicial de Mudas em ARF.....	19
2.6 CONCLUSÕES	21
2.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
3. CAPÍTULO II EFLUENTE BOVINO TRATADO AFETA O CRESCIMENTO, A QUALIDADE E A PRODUTIVIDADE DA ÁGUA DE MUDAS DE DALBERGIA NIGRA PRODUZIDAS COM NÍVEIS DE SOMBREAMENTO E IRRIGAÇÃO	26
3.1 RESUMO.....	27
3.2 ABSTRACT.....	28
3.3 INTRODUÇÃO	29
3.4 MATERIAL E MÉTODOS	30
3.5 RESULTADOS	34
3.6 DISCUSSÃO	41
3.7 CONCLUSÕES	43
3.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
4. CAPÍTULO III CRESCIMENTO INICIAL EM VIVEIRO E EM CAMPO DE MUDAS DE ESPÉCIES ARBÓREAS DA MATA ATLÂNTICA SOB DIFERENTES NÍVEIS DE SOMBREAMENTO E MANEJO AUTOMÁTICO DE IRRIGAÇÃO	47
4.1 RESUMO.....	48
4.2 ABSTRACT.....	49
4.3 INTRODUÇÃO	50
4.4 MATERIAL E MÉTODOS	52
4.5 RESULTADOS	56
4.6 DISCUSSÃO	61
4.7 CONCLUSÕES	63
4.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
5. CONCLUSÕES GERAIS	67
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	68

1. INTRODUÇÃO GERAL

A água é um recurso vital e sua importância se estende além da necessidade de consumo humano, alcançando setores como a agricultura, a indústria e a geração de energia, dentre outros. Muitas regiões do mundo enfrentam crises de disponibilidade e de qualidade da água, consequência do uso mal planejado desse recurso e da crescente degradação ambiental. Por isso, torna-se fundamental a adoção de técnicas de uso sustentável desse recurso, visando sua disponibilidade para as gerações futuras.

A busca pela sustentabilidade do planeta é dependente de ações de preservação e de recuperação do meio ambiente, incluindo-se aqui a restauração florestal dos biomas desmatados. Além de contribuir para a produção de oxigênio e sequestro de carbono, essencial para a regulação do clima, a restauração florestal também promove a conservação da biodiversidade e dos recursos hídricos. Com a degradação contínua das áreas florestais, a restauração torna-se ainda mais necessária para a garantia da continuidade da vida no planeta, e se mostra uma alternativa sustentável e eficaz para a recuperação desses biomas. Para isso, é fundamental a adoção de práticas de uso eficiente da água, a fim de garantir a preservação dos recursos naturais para as gerações presentes e futuras.

A busca por soluções alternativas para a cadeia de produção de mudas é uma questão cada vez mais relevante para a sustentabilidade ambiental. É sabido que a produção convencional de mudas pode gerar impactos significativos no meio ambiente, com o uso excessivo de água e de fertilizantes químicos, contaminação do solo e do lençol freático e a geração de resíduos sólidos e líquidos. Nesse contexto, o uso de águas residuárias e lodos de esgoto surge como uma opção eficaz para a redução de impactos ambientais e economia de recursos hídricos.

Além dos benefícios mencionados, o uso desses resíduos na produção de mudas arbóreas pode trazer outros ganhos para o meio ambiente, por não haver o propósito de consumo humano, esse grupo de espécies são mais rústicas e podem se beneficiar com as altas cargas de nutrientes presentes nesses resíduos. Dessa forma, a utilização desses recursos pode contribuir para a recuperação de áreas degradadas, a redução do desmatamento e a promoção da biodiversidade, além de fornecer mudas mais resistentes e saudáveis para a arborização urbana e reflorestamento de áreas naturais.

Nesse estudo foram assumidas as hipóteses de que mudas de espécies arbóreas nativas da Mata Atlântica são responsivas à lâminas de irrigação e níveis de sombreamento quando produzidas em viveiros; o uso do biossólido de lodo de esgoto associado à água residuária de bovinocultura tratada por ozonização usada na irrigação afetam o desenvolvimento e a qualidade das mudas a serem transplantadas em áreas de restauração do bioma Mata Atlântica.

Os resultados do trabalho são apresentados em três capítulos: o primeiro aborda a qualidade da água residuária de bovinocultura tratada por ozonização e aplicada com diferentes lâminas em mudas de *Dalbergia nigra* cultivadas em tubetes com substratos compostos por biossólido em fase de viveiro e o acompanhamento das mudas após o plantio em área de restauração florestal. No segundo capítulo avaliou-se a evolução do crescimento inicial e a qualidade das mudas da *Dalbergia nigra* com níveis de sombreamento e lâminas de irrigação, aplicadas de forma automatizada. Os objetivos do capítulo III foram avaliar a influência das lâminas de irrigação e dos níveis de sombreamento no desenvolvimento e qualidade de mudas de *Cariniana estrelensis* e *Gallesia integrifolia* e o desempenho inicial no campo.

2. CAPÍTULO I

PRODUÇÃO DE MUDAS FLORESTAIS UTILIZANDO LODO DE ESGOTO E IRRIGAÇÃO AUTOMATIZADA COM EFLUENTE BOVINO OZONIZADO

Capítulo publicado como artigo na PLOS ONE, em 31/10/2022: SILVA, L. O.; MENDONÇA, H.V.; CONFORTO, B.A.A.F.; PINTO, M.F.; CARVALHO, D.F. Production of forest seedlings using sewage sludge and automated irrigation with ozonated cattle wastewater. PLOS ONE. 2022;17:e0276633.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0276633>

2.1 RESUMO

O grande volume de efluentes gerados pela pecuária intensiva pode se tornar um problema ambiental, exigindo soluções que combinem tratamento e destinação final. A qualidade da água residuária de bovinos (ARB) tratada por ozonização, a necessidade hídrica e seu efeito no crescimento de mudas de *Dalbergia nigra* cultivadas com lodo de esgoto foram determinadas sob diferentes condições de luminosidade. O estudo foi realizado em esquema de parcelas subdivididas com 2 níveis de sombreamento (0% - C₁ e 49,4% de atenuação - C₂) e 3 tipos de água de irrigação (controle - T₁, 1 h de ozonização - T₂ e 2 h - T₃), com 4 repetições. A semeadura direta foi realizada em tubetes de 280 cm³ que foram irrigados por gotejamento com manejo automático. A altura e o diâmetro do colo foram medidos a cada 21 dias, e ao final da fase de viveiro, e foram determinados o índice de qualidade de Dickson (IQD) e a produtividade da água de irrigação (PAi). Além disso, as mudas foram transplantadas em uma área de restauração florestal (ARF) de Mata Atlântica, com monitoramento de altura e diâmetro por 200 dias. Com a ozonização, houve aumento do pH e redução da condutividade elétrica, sólidos totais e turbidez na ARB, permitindo seu uso para irrigação de mudas florestais. Os volumes máximos de água aplicados foram 2,096 e 1,921 L planta⁻¹, com abastecimento de água T₂ e T₁, respectivamente, e coberturas C₁ e C₂. Nestas condições, as mudas atingiram IQD de 0,47 e 0,17, e PAi de 2,35 e 1,48 g L⁻¹, respectivamente. O crescimento vegetativo inicial das mudas plantadas na ARF foi beneficiado pelos nutrientes fornecidos pela ARB tratada. Portanto, o uso de lodo de esgoto e da água residuária tratada tem potencial para produzir mudas florestais, reduzindo o lançamento de resíduos e efluentes no meio ambiente.

Palavras-chave: Recuperação de recursos. Economia circular. Processos de oxidação avançados. *Dalbergia nigra*. Restauração de bioma.

2.2 ABSTRACT

The large volume of effluents generated by intensive cattle production can become an environmental problem, requiring solutions that combine treatment and disposal of reuse water. The quality of cattle wastewater (CWW) treated by ozonation, the water requirement and its effect on the growth of seedlings of *Dalbergia nigra* cultivated with sewage sludge were determined under different light conditions (coordinates: 22°45'21"S, 43°40'28"W). The study was carried out in a split plot scheme with 2 shading levels (0% - C₁, and 49.4% attenuation - C₂) and 3 types of irrigation water (control – T₁, 1 h ozonation – T₂, and 2 h – T₃), with 4 repetitions. Direct sowing was realized into 280 cm³ tubes which were irrigated by drip irrigation with automatic management. The height and collar diameter were measured every 21 days, and at the end of the nursery phase, and the Dickson quality index (DQI) were determined. In addition, seedlings were transplanted in a forest restauration area (FRA) of Atlantic Forest, with height and diameter monitoring for 200 days. With ozonation, there was an increase in pH and a reduction in electrical conductivity, total solids and turbidity in the CWW, allowing its use for irrigation of forest seedlings. The maximum volumes of water applied were 2.096 and 1.921 L plant⁻¹, with water supply T₂ and T₁, respectively, and coverages C₁ and C₂. In these conditions, the seedlings reached better quality with DQI of 0.47 and 0.17. Irrigation with CWW treated by ozonation did not compromise the development of *D. nigra* seedlings. The initial vegetative growth of the seedlings planted in the FRA was benefited by the nutrients provided by the CWW treated. Therefore, the use of sewage sludge and CWW treated has the potential to produce forest seedlings, reducing the release of waste and effluents into the environment.

Keywords: Resource recovery. Circular economy. Advanced oxidation processes. *Dalbergia nigra*. Biome restoration.

2.3 INTRODUÇÃO

O Brasil possui o segundo maior rebanho bovino do mundo, com aproximadamente 264 milhões de cabeças (USDA, 2021). Apesar dos benefícios econômicos para o país, contribuindo com 8,6% do PIB, a pecuária intensiva gera grandes volumes de efluentes, que podem chegar a 130 L animal⁻¹ dia⁻¹ (MENDONÇA et al., 2017a), considerando o volume de fezes, urina e água utilizada para a limpeza dos currais.

A água residuária de bovinocultura (ARB) é composta por uma mistura de dejetos animais, água que foi desperdiçada e água utilizada para limpeza do ambiente de confinamento e seus anexos. A ARB tem DBO₅ entre 2.000 e 30.000 mg L⁻¹ e nitrogênio total variando de 200 a 2.055 mg L⁻¹ (CHENG et al., 2019), concentrações alarmantes com alto potencial poluidor que podem causar esgotamento de oxigênio e eutrofização em recursos hídricos superficiais (SOUZA et al., 2021). Assim, a destinação do efluente gerado, desde sua coleta, transporte, armazenamento, tratamento e uso, constitui um desafio ambiental, social e econômico. No Brasil, a disposição final de efluentes é regulamentada pelas Resoluções 357/05 e 430/11 (BRASIL, 2005, 2011) do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

Além de ações de gestão que minimizem o consumo de água e a produção de efluentes na cadeia leiteira (WILLERS et al., 2014), é necessário tratar os resíduos gerados para seu uso ou mesmo descarte em corpos d'água. No entanto, o custo do tratamento de efluentes é um fator restritivo (ABOURACHED et al., 2016), fazendo com que a busca por tecnologias e processos mais econômicos e eficientes se torne um interesse crescente entre os pesquisadores (AMORI et al., 2022).

O processo de digestão anaeróbia tem sido uma alternativa como tratamento primário da água residuária de bovinocultura. Mendonça et al. (2017b) avaliaram a eficiência do reator UASB (Manta de lodo anaeróbio de fluxo ascendente) na remoção de poluentes orgânicos (DBO_{5.20}, DQO), sólidos totais, sólidos voláteis e nutrientes da ARB, indicando seu potencial uso como biofertilizante na agricultura. No entanto, as altas concentrações de nutrientes, especialmente compostos de nitrogênio e fosfato, não permitem seu uso contínuo na irrigação. Assim, processos avançados de oxidação, como reagente de Fenton, peróxido de hidrogênio, ozônio e fotocatalisador, podem ser empregados como tratamento adicional para esse fim, pois são capazes de remover compostos orgânicos recalcitrantes em águas residuárias (REKHATE e SRIVASTAVA, 2020).

Considerada uma tecnologia verde (SOUZA et al., 2020), o uso de ozônio (O₃) no tratamento secundário de águas residuárias de bovinocultura tornou-se popular nos últimos anos devido à redução no custo de produção na última década (REKHATE e SRIVASTAVA, 2020). Além disso, o ozônio não permanece solubilizado por muito tempo na água, não forma subprodutos tóxicos na maioria dos casos e é gerado *in situ*, eliminando a necessidade de armazenamento ou uso de deprodutos químicos (MOHSEN, 2013). A geração de O₃ é baseada no processo de descarga de corona (SIVARANJANI et al., 2021), que pode melhorar a biodegradabilidade de águas residuárias (SHI et al., 2022), removendo cor e compostos orgânicos e permitindo a quebra e oxidação de frações orgânicas que são difíceis de degradar por mecanismos biológicos (PÁZDZIOR et al., 2017; TANG, 2021; CLEM et al., 2022).

A reação com compostos orgânicos pode ocorrer diretamente (ozônio molecular) ou indiretamente por meio da formação de oxidantes secundários, como radicais hidroxila (ZHANG et al., 2020), de acordo com as Equações 1 e 2 (GOTTSCHALK et al., 2000; BOURIOUG et al., 2015):





Além das águas residuárias tratadas, a aplicação de lodo de esgoto tem sido realizada em áreas florestais com o objetivo de melhorar o crescimento das árvores, a produção de madeira e melhorar várias características do solo (BOURIOUG et al., 2015). Chamado de bioassólido, após processo de estabilização, este resíduo sólido proveniente de estações de tratamento de esgoto tornou-se popular no Brasil (ABREU et al., 2017; BUENO et al., 2020, 2021), e é utilizado na composição de substratos orgânicos para a produção de mudas (NÓBREGA et al., 2007; ABREU et al., 2017; BUENO et al., 2020, 2021; CARVALHO et al., 2021a). Esta é uma iniciativa promissora para o setor florestal no país (MANCA et al., 2020), que tem capacidade de viveiro de cerca de 150 milhões de mudas de espécies florestais nativas (SILVA, 2015).

O uso de águas residuárias e bioassólidos na agricultura é uma alternativa para o desenvolvimento vegetal, minimizando a retirada de água dos corpos naturais e reduzindo o lançamento de efluentes no meio ambiente (MOLINOS-SEANTE et al., 2011), além de evitar o descarte de um resíduo com altas concentrações de matéria orgânica e metais pesados (quando proveniente de esgotos industriais). Associado ao uso do bioassólido como substrato, o efluente deve ser avaliado em sistemas de produção de mudas de espécies florestais, que se caracterizam como etapa determinante na regeneração de áreas degradadas, principalmente no Brasil, que possui milhões de hectares nesta condição. No entanto, independente da qualidade, o abastecimento de água deve ser feito com critério, principalmente em viveiros florestais, que tradicionalmente não utilizam manejo de irrigação, comprometendo a eficiência do sistema e a qualidade das mudas (BUENO et al., 2021).

Entre as espécies nativas da Mata Atlântica, um dos biomas mais degradados do Brasil (BUENO et al., 2020), destaca-se a *Dalbergia nigra* (Jacarandá-da-bahia), que tem sido alvo de exploração inadequada devido à sua durabilidade natural e alto valor de mercado (ATAÍDE et al., 2016), sendo considerada uma espécie ameaçada de extinção (vulnerável segundo a lista vermelha (MARTINELLI e MORAES, 2013). A espécie pertence ao grupo sucessional de espécies secundárias tardias (CARVALHO, 2006), o que lhe confere melhor crescimento em níveis intermediários de sombreamento.

Este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade da ARB tratada por ozonização e seu efeito na necessidade hídrica e no crescimento de mudas de *Dalbergia nigra*, usando substrato composto de lodo de esgoto tratado. O crescimento das plantas na fase de viveiro foi avaliado a pleno sol e em condição de sombreamento, medindo-se as principais características morfológicas selecionados nas raízes e parte aérea. Além disso, foram realizadas medições de altura e diâmetro de mudas plantadas em área de restauração florestal.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 Área Experimental e Plantio de Mudas

O experimento em fase de viveiro foi conduzido de junho a setembro de 2021 em uma área experimental localizada no Instituto de Tecnologia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (coordenadas: 22°45'021" S, 43°40'028" W), Brasil. O clima da região é do tipo Aw, de acordo com a classificação de Köppen, com precipitação média anual e temperatura variando de 1.300 a 1.600 mm e de 22 a 24 °C, respectivamente (ALVARES et al., 2013).

As sementes de *Dalbergia nigra* (Jacarandá-da-bahia) foram adquiridas no Instituto Florestal Brasileiro (IBF, Curitiba-PR), com garantias de viabilidade e boas condições fitossanitárias. O plantio foi realizado em 26/04/2021, com duas sementes por tubete (280 cm³), preenchidos com biossólido puro (lodo de esgoto estabilizado). Este material é proveniente de uma estação de tratamento de esgoto da Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro - CEDAE (Alegria), de áreas urbanas domésticas e comerciais, não contendo resíduos industriais. A caracterização química realizada de acordo com os procedimentos oficiais contidos na Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006) indicando os valores de macronutrientes totais de 1,5% N, 0,61% P, 0,16% K, 0,89% S, 1,57% Ca e 0,32% Mg, além disso, 9,41% de carbono orgânico. Para micronutrientes, os valores foram de 722,7 mg kg⁻¹ Zn, 20773,3 mg kg⁻¹ Fe, 184,5 mg kg⁻¹ Mn, 164,3 mg kg⁻¹ Cu e 12,1 mg kg⁻¹ B. Carvalho et al. (2021) avaliaram o mesmo biossólido e determinaram porosidade total de 0,70 cm cm⁻³, massa específica média de partículas de 1,71 g cm⁻³ e massa específica aparente de 0,74 g cm⁻³, compatível com as características físicas dos solos húmicos.

Após a emergência das plântulas, foi realizado a repicagem, deixando-se sempre a planta mais alta e centralizada. Aos trinta e cinco dias e com altura média das mudas em torno de 7,5 cm, os tubetes foram colocados em bandejas plásticas (capacidade máxima de 54 tubetes) espaçadas com mudas alternadas, totalizando 24 plantas por bandeja (3 fileiras com 8 plantas por fileira).

As bancadas foram cobertas na parte superior e nas laterais por telas agrícolas comerciais de polietileno de cor preta (Sombrite®), com sombreamento nominal de 50%, exceto as bancadas que permaneceram em pleno sol. Para melhor caracterizar os tratamentos, avaliou-se a iluminância das coberturas durante 5 dias, em intervalos de 1 hora, utilizando-se um luxímetro digital (LD-400 model, Instrutherm®), bem como radiação solar e radiação fotossinteticamente ativa, respectivamente usando um piranômetro (MP-200 model, Apogee®) e um medidor quântico (MQ-200 model, Apogee®). Os valores médios diários de iluminância foram de 67,74 Lux (C₁) e 34,28 Lux (C₂), caracterizando os tratamentos como 0 (pleno sol) e 49,4% atenuação, respectivamente.

O estudo foi conduzido em esquema de parcelas subdivididas com 2 níveis de cobertura (parcela) e 3 tipos de água para irrigação (subparcela), com 4 repetições (**Figura 1**). Os tratamentos consistiram em água de abastecimento local (T₁), considerada como controle, e ARB tratada por ozonização por 1 h (T₂) e 2 h (T₃), com sistemas de bombeamento independentes. Cada parcela experimental foi composta por 6 plantas, totalizando 48 plantas por tipo de água aplicada.

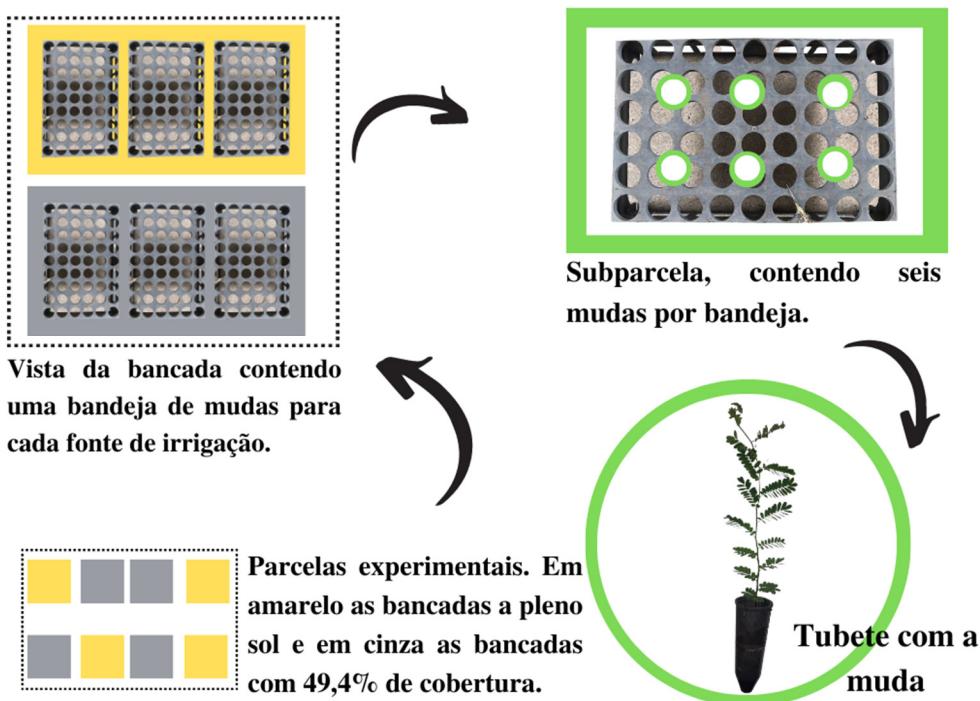


Figura 1. Esquema experimental com duas coberturas (parcela) e três tipos de água para irrigação (subparcela).

2.4.2 Coleta e Tratamento de Água Residuária de Bovinocultura (ARB)

A ARB foi coletada na unidade experimental denominada Sistema Integrado de Produção Agroecológica (Fazendinha Agroecológica km 47) após tratamento preliminar para remoção de sólidos grosseiros (decantador) e tratamento biológico anaeróbio (reator UASB), conforme descrito por Souza et al. (2021). O efluente bovino proveniente da criação de vacas criadas em manejo orgânico e com limpeza hidráulica sem recirculação, após reator UASB apresentou as seguintes características físico-químicas: pH – 7,4, condutividade elétrica – 2,49 dS m⁻¹, sólidos totais – 969,8 mg L⁻¹, turbidez - 231 NTU, carbono orgânico total – 30,9 mg L⁻¹, cálcio – 17,8 mg L⁻¹, fósforo total – 17,4 mg L⁻¹, magnésio – 13,2 mg L⁻¹, nitrogênio amoniacal – 48,36 mg L⁻¹ e sódio – 33,6 mg L⁻¹.

O tratamento da ARB por ozonização foi realizado de acordo com metodologia adaptada de Souza et al. (2020), em escala de bancada, utilizando reatores de leito fixo construídos com tubo de PVC para esgoto de 3 polegadas de diâmetro e 0,7 m de comprimento, preenchido com meio plástico poroso (bio-anéis), em 60% do seu volume (Figura 2). O processo de oxidação foi realizado por um difusor (20 µm de tamanho de poro) disposto na parte inferior do reator e conectado por uma mangueira a um gerador de O₃ (Ozone Generation, GL-3189A, China), com vazão de 1.3 L min⁻¹, pureza de 92% (\pm 2) e concentração média de 7.8 mg L⁻¹ (\pm 1). Um pedaço de algodão ou estopa é inserido na extremidade superior do reator para gerar uma atmosfera interna de maior concentração de ozônio, evitando o contato direto do ar atmosférico com a superfície do gás/líquido, e para absorver partículas mobilizadas pela força de arrasto do gás (processo de flotação).

Após o tratamento por ozonização, foram avaliados os seguintes parâmetros: pH, condutividade elétrica (CE), sólidos totais (TS), turbidez (NTU), carbono orgânico total (COT), nitrogênio amoniacal (NH₄⁺), fósforo total (P_t) e concentrações totais de sódio, cálcio

e magnésio (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}). As análises foram realizadas de acordo com métodos padrão (APHA, 2019).

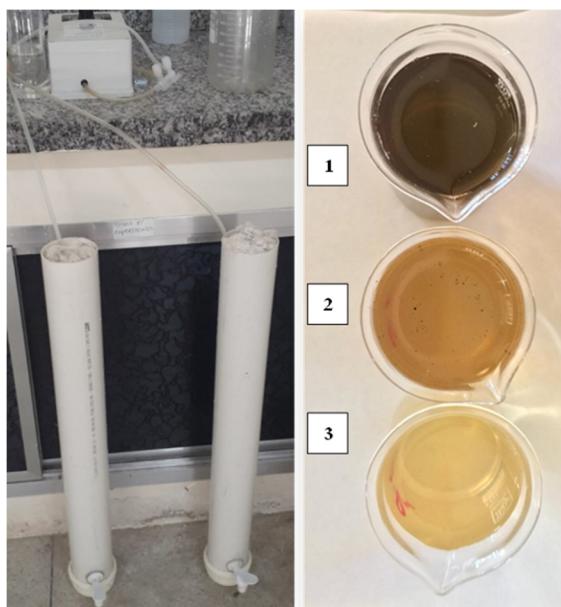


Figura 2. Reator de leito fixo construído com material de PVC, conectado ao gerador de O_3 por mangueiras, e aspecto visual das amostras de efluentes brutos (1) e amostras de efluentes após tratamento por ozonização por 1 h (2) e 2 h (3).

A razão de adsorção de sódio (RAS) foi calculada usando Equação 3:

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}} \quad (3)$$

Para Na^+ , Ca^{++} e Mg^{++} em millimoles L^{-1} .

2.4.3 Sistema de Irrigação

As mudas foram irrigadas por sistema de gotejamento, utilizando-se emissores (Netafim, modelo PCJ-HCNL) com vazão de $3,0 \text{ L h}^{-1}$. Testes de uniformidade foram realizados para cada tipo de água, resultando em coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) superior a 95%. A reposição hídrica foi realizada automaticamente, em resposta à necessidade hídrica das plantas. Isso foi conseguido usando o acionador automático de irrigação (AAI), proposto por Medici et al. (2010), que atua em resposta à tensão da água do solo/substrato e é regulado pela diferença de nível entre uma cápsula cerâmica (sensor) e um pressostato. Este dispositivo tem sido usado no manejo de irrigação de diferentes culturas (GOMES et al., 2017; MELLO et al., 2018) e na produção de mudas de espécies florestais (BUENO et al., 2020, 2021).

Foram utilizados seis controladores independentes, um para cada tratamento, cujos sensores foram instalados verticalmente no tubete preenchido com biossólido a 5 cm de profundidade, com diferença de altura de 0,40 m em relação ao pressostato, responsável por acionar cada um dos sistemas de irrigação.

Em cada tratamento, os eventos de irrigação foram monitorados e os tempos de ativação do AAI foram registrados automaticamente em um sistema de coleta e armazenamento de dados composto por uma placa Arduino Mega e um cartão SD (adaptado de BUENO et al., 2021). Para cada evento de irrigação o sistema foi programado para interromper o fornecimento de água por um minuto a cada 30 segundos acionado, evitando a percolação nos tubetes. Se a alimentação do pressostato permanecesse ativa, o sistema de irrigação era ativado novamente. Este procedimento foi repetido até que o pressostato fosse desligado pelo AAI, em resposta ao aumento da tensão da água no substrato. O sistema de irrigação foi alimentado por motobombas de 12 V (NeoSolar SingFlo DP-160), alimentado por dois módulos fotovoltaicos de 130 W (YL140p-17b model, Ying Solar) conectado a uma bateria.

2.4.4 Monitoramento Agroclimático

Termohigrômetros digitais (modelo HT-4010, Icel) foram instalados dentro dos ambientes de bancada para determinação da umidade relativa e temperatura, com intervalo de armazenamento dos dados de 30 minutos. O monitoramento meteorológico a pleno sol foi realizado por uma estação meteorológica automática, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e localizada próxima ao local experimental. Além disso, foram instalados coletores de chuva nas condições de pleno sol e no interior da cobertura. Com dados meteorológicos, a evapotranspiração de referência (ET₀) foi estimada diariamente pelo método Penman-Monteith FAO-56 (ALLEN et al., 1998).

2.4.5 Biometria das Mudas

As mudas foram avaliadas de 01/06 a 10/09. A cada 21 dias, os valores de altura (H) e diâmetro do coleto (DC) das mudas foram medidos com régua graduada e paquímetro digital, respectivamente. Quando cerca de 50% das mudas adquiriram padrão comercial de 30 cm de H e 3,0 mm de DC (DAVIDE e BOTELHO, 2015; SOUZA JUNIOR e BRANCALION, 2016) três mudas mais próximas da média de cada repetição foram selecionadas para determinar a matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca do sistema radicular (MSR) e matéria seca total (MST). As mudas selecionadas foram cortadas, separadas em parte aérea e sistema radicular, colocadas em sacos de papel e, em seguida, levadas à estufa a 65 °C e mantidas até atingirem massa constante.

Os dados coletados foram usados para calcular a relação entre a altura e o diâmetro do coleto (DAVIDE e BOTELHO, 2015), também comumente conhecido como H/D, e o Índice de Qualidade Dickson (IQD) (DICKSON et al., 1960), Equação 4:

$$IQD = \frac{MST}{\left(\frac{H}{DC} + \frac{MSPA}{MSR} \right)} \quad (4)$$

Em que:

MST é a matéria seca total, em g;
 H é altura, em cm;
 DC é o diâmetro do coleto, em mm;
 MSPA, é a matéria seca da parte aérea, em g; e
 MSR é a matéria seca da raiz, em g.

Produtividade da água de irrigação (PAi) (Equação 4) foi calculada usando MSPA, MSR e MST como produtividade (P), em relação ao volume de água aplicado por irrigação (Va), Equação 5:

$$PAi = \frac{P}{Va} \quad (5)$$

Em que:

P é produtividade em matéria seca total, em g; e
Va é o volume total de água aplicado por irrigação, em L.

2.4.6 Plantio de Mudas em uma Área de Restauração Florestal

As mudas não utilizadas para a análise anterior foram rustificadas por duas semanas e plantadas na Reserva Ecológica Guapiaçu, inserida no bioma Mata Atlântica ($22^{\circ}27'32.26"S$, $43^{\circ}45'53.72"W$), que é uma área experimental com 50 anos de implantação, e onde a restauração florestal está em estágio avançado, com copas formadas e uma camada de serapilheira acumulada. A classificação do clima é do tipo Af, segundo Köppen, caracterizado como tropical com verões chuvosos e invernos secos, sem estação marcadamente seca, e precipitação média anual de 2050 mm. O solo é classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico cambissólico. O pluviômetro automático do INMET localizado próximo ao local registrou precipitação acumulada de 1730 mm, de novembro de 2021 a abril de 2022.

As covas de plantio foram cavadas nas entrelinhas, manualmente, com dimensões de 30 cm x 30 cm x 30 cm (comprimento x largura x profundidade), com espaçamento de 2,5 m x 3,2 m entre as mudas. As mudas foram plantadas em 22/10/2021, com seis repetições por tratamento e seus dados biométricos iniciais foram registrados. O monitoramento do desenvolvimento dessas plantas foi realizado aos 150, 200 e 250 dias após o plantio (DAP) para altura e aos 150 e 200 DAP para diâmetro.

2.4.7 Análise Estatística

Foi realizada análise de variância (ANOVA) e para isso a normalidade e homogeneidade dos resíduos foram verificadas pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente, a 5% de probabilidade. A significância do ajuste dos modelos linear e quadrático, dos dados biométricos altura e diâmetro (H e D) foi avaliada pelo teste F da ANOVA, e seus coeficientes pelo teste t, ambos com nível de probabilidade de 95%. A possível presença de tendências nas estimativas foi validada por análise gráfica de resíduos relativos em função de H e D. Após avaliar as estatísticas de ajuste dos modelos, foi selecionado aquele que apresentou os valores mais satisfatórios em relação aos critérios de seleção descritos (BAPTISTA et al., 2019). Com o modelo de regressão selecionado, foi realizado o ajuste geral para cada variável biométrica, gerando a soma dos quadrados da regressão, a soma dos quadrados dos resíduos e a soma dos quadrados total. Em cada estratificação, foram geradas as respectivas somas de quadrados para compor o teste de identidade entre os modelos (GRAYBILL, 2000). Quando não houve identidade entre os modelos pela estatística F ao nível de probabilidade de 95%, concluiu-se que não era possível utilizar a mesma equação para tratamentos diferentes, ou seja, eles não possuem identidade (QUEIROZ et al., 2008). Para produtividade da água de irrigação, índice de qualidade de Dickson em fase de viveiro e altura e diâmetro de mudas em área de restauração florestal, foi realizado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, para fontes de irrigação e dentro de cada cobertura. Todas as análises foram realizadas com auxílio dos programas computacionais R (3.6.0) e Sisvar (5.6).

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.5.1 Qualidade de Resíduos Tratados Utilizados em Irrigação em Viveiros

Após o tratamento por ozonização, o pH da solução aumentou com o aumento do tempo de exposição ao gás, sendo 7,7 no tratamento de 1 h (T_2) e 7,8 no tratamento de 2 h (T_3) (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização físico-química de efluentes em diferentes cenários de tratamento e para a fonte de controle.

Parâmetro	T_1^*	T_2^{**}	T_3^{**}
	concentrações		
pH	6,4	7,6 _(0,23)	7,8 _(0,30)
C.E (dS m ⁻¹)	0,96	1,76 _(0,96)	1,64 _(1,18)
ST (mg L ⁻¹)	9,8	360 _(91,49)	246,50 _(94,22)
Turbidez (NTU)	1,83	105,80 _(38,25)	75 _(48,14)
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	2,03	18,23 _(7,29) ***	17,84 _(6,74) ***
COT (mg L ⁻¹)	<1,0	4,27 _(2,18)	3,07 _(1,93)
P _t (mg L ⁻¹)	0,24	15,47 _(11,57)	11,64 _(6,81)
Mg ²⁺ Total (mg L ⁻¹)	0,71	12,66 _(3,57) ***	13,08 _(3,46) ***
NH ₄ ⁺ (mg L ⁻¹)	0,1	26,76 _(10,48)	18,82 _(2,35)
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	2,36	29,10 _(5,15) ***	32,84 _(6,48) ***
RAS	2,02	7,48 _(0,15) ***	8,41 _(0,47) ***

T₁: água de controle; T₂: efluente bovino ozonizado por 1 h; T₃: efluente bovino ozonizado por 2 h; *valores fornecidos pela empresa fornecedora; **média das concentrações, n = 5 e *** n = 3; SD entre parênteses ao lado dos meios.

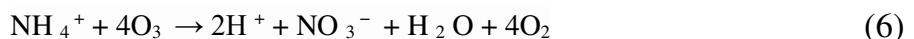
O processo oxidativo de ozonização ocorre de duas formas distintas: ataque eletrolítico direto por ozônio molecular e ataque indireto por radicais OH• produzidos pela decomposição de O₃ (M'ARIMI et al., 2020; REKHATE e SRIVASTAVA, 2020). A reação que ocorre a partir do contato do gás ozônio com os compostos orgânicos do efluente liberando íons hidróxido, tornando-os dominantes sobre os íons H⁺ e consequentemente resultando em um meio mais básico. Utilizada para irrigação, nos diferentes tempos a ARB tratada não apresenta risco de acidificação do solo, mantendo-se acima da neutralidade. Houve uma diminuição de 30 a 35% na condutividade elétrica após a ozonização. De acordo com os valores de Ca⁺ e Mg²⁺, é possível notar que a menor exposição à ozonização (T₂) preservou esses cátions, levando a maiores concentrações em relação ao tratamento de maior exposição ao O₃ (T₃). Por outro lado, o Na⁺ foi favorecido pelo maior tempo de ozonização, ao observar a relação desses cátions trocáveis por meio da razão de adsorção de sódio (RAS), foram encontrados valores de 7,4 e 8,35 para T₂ e T₃, respectivamente. Com base nos valores CE e RAS recomendados por Ayers e Westcot (1985), os tratamentos de ozonização por 1 h e 2 h têm potencial para uso na irrigação, não causando redução na capacidade de infiltração do substrato.

A ARB continha em média 969,8 mg L⁻¹ de sólidos totais em sua composição, e a exposição ao ozônio reduziu drasticamente esse valor, chegando a 360,0 e 246,5 mg L⁻¹ em T₂

e T₃, respectivamente. Além do arrasto ascendente de partículas pelo gás, que ficaram presas no maço de algodão que fechava o sistema superficialmente, houve destruição de partículas sólidas de matéria orgânica, principalmente no início da reação (MARCELINO et al., 2017). Este fato esclarece que não há grandes diferenças entre os resultados dos tratamentos de ozonização.

A turbidez diminuiu mais de 50% com ozonização por 1 h e mais de 65% com ozonização por 2 h. As concentrações são semelhantes às encontradas por Souza et al. (2020), que recomendaram o uso de tratamentos para irrigação por gotejamento, uma vez que os valores de SST estavam próximos de 50 mg L⁻¹ (NAKAYAMA, 1982), não causando entupimento dos emissores. De fato, durante todo o período experimental, nenhum emissor completamente entupido foi identificado.

A menor exposição à ozonização promoveu maiores concentrações de P, N e MO, o que constitui resultados interessantes para o uso agrícola do O₃ como potencializador da fertilidade do substrato. O uso de O₃ também é um método bem conhecido para oxidação de amônia (SOUZA et al., 2020), e a reação de O₃ com amônia pode ser expressa como na Equação 6. Isso explica a redução da amônia em aproximadamente 45 e 62% em T₂ e T₃, respectivamente.



2.5.2 Aspectos Meteorológicos e Volume Aplicados por Irrigação

A evapotranspiração de referência acumulada (ETo Ac) foi de 300,4 mm (Figura 3), com valor máximo de 34,5 mm na 12^a semana. Como o experimento foi conduzido no período de inverno, a estação menos chuvosa da região, houve apenas 24 dias com precipitação, que totalizou 95,8 mm (Ppt Ac). Nos 110 dias de experimento, a precipitação foi superior à ETo em apenas 13 dias, superando a evapotranspiração de referência apenas na segunda semana do experimento.

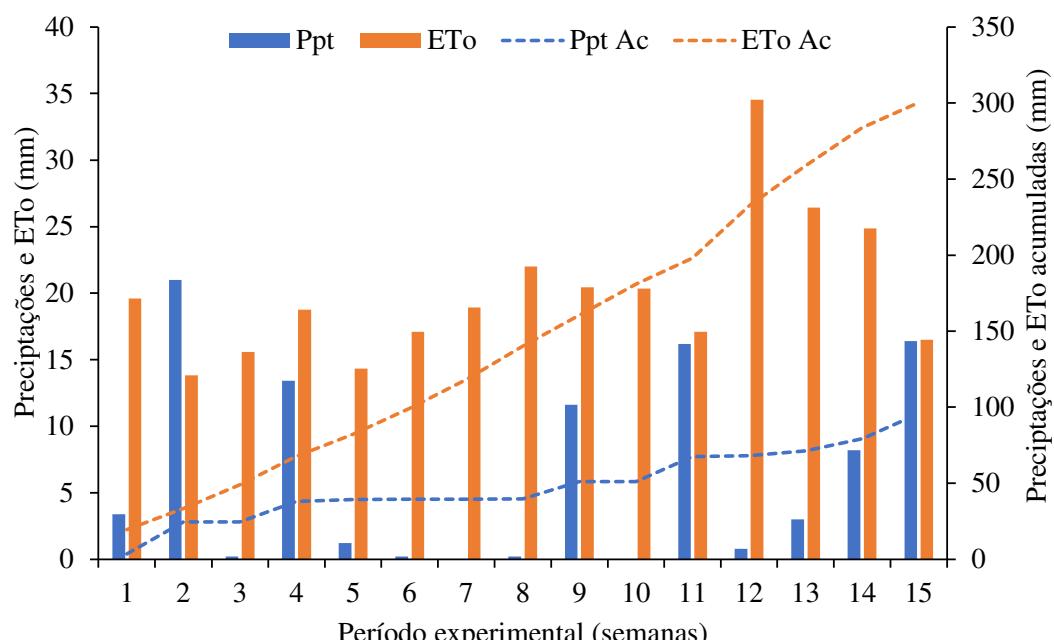


Figura 3. Volumes de precipitação (Ppt) e evapotranspiração de referência (ETo) ao longo do período experimental.

Em geral, houve maior frequência de acionamento do sistema de irrigação sob a condição de pleno sol (C_1) (Tabela 2), onde as condições climáticas favorecem maior evaporação da água da superfície do tubete. Como a cápsula porosa do acionador reflete as condições de umidade do substrato, ela fica mais seca e, consequentemente, o sinal é enviado ao pressostato com mais frequência. No entanto, o tempo médio de irrigação foi menor, exceto para o tratamento T_3 .

Tabela 2. Acionamento do sistema de irrigação para produção de mudas de *D. nigra* sob diferentes condições de cobertura e tipos de água.

Cobertura	Tipo de água	Dias de acionamentos	Número de acionamentos	Tempo médio de irrigação (s)
C_1	T_1	50	61	38
	T_2	57	72	41
	T_3	38	41	39
C_2	T_1	43	61	50
	T_2	27	40	46
	T_3	35	38	36

T_1 – água controle; T_2 - ARB tratada por 1 h; T_3 - ARB tratada por 2 h.

A taxa de crescimento da planta também influencia na necessidade hídrica, fazendo com que o número de acionamentos do sistema para plantas irrigadas com água de abastecimento municipal (T_1) e cultivadas sob sombreamento (C_2) seja igual ao da condição de pleno sol. Nesta condição, houve uma maior exigência hídrica pelas plantas, em comparação ao volume aplicado às plantas irrigadas com ARB tratada (Figura 4B).

Em todos os tratamentos, houve dias com mais de um acionamento em resposta à necessidade hídrica das plantas, o que ocorreu, em média, a partir da 7^a semana experimental. Quando foi utilizada água de abastecimento municipal (T_1), ocorreram até 3 acionamentos por dia na 13^a e 14^a semanas (Figura 4, Figura 3), e o mesmo ocorreu com a água do tratamento T_2 , sob condição de pleno sol. Para o tratamento T_3 , o número de acionamentos foi menor e os tempos de irrigação foram menores.

Os volumes médios de água aplicados pelo sistema variaram de acordo com a necessidade hídrica das plantas e a característica da água de irrigação. Na condição de pleno sol (C_1), os volumes acumulados foram de 1,653, 2,096 e 1,348 L planta⁻¹, para os tratamentos T_1 , T_2 e T_3 , respectivamente (Figura 4A) enquanto sob a cobertura C_2 , os volumes foram de 1,921, 1,142 e 1,171 L planta⁻¹ (Figura 4B). As plantas irrigadas com água de abastecimento municipal (T_1) receberam maior volume de água quando cultivadas sob a cobertura C_2 , mas quando irrigadas com ARB tratada houve maior exigência sob a condição de pleno sol.

A quantidade de água exigida pelas plantas depende tanto das condições climáticas locais quanto do estágio de crescimento. Sob a cobertura C_2 , os sistemas de irrigação não foram acionados durante as três primeiras semanas do experimento (Figura 4B). Além da precipitação (24,6 mm), as plantas estavam no início da fase de crescimento e o microclima formado pela cobertura promoveu menor evaporação, favorecendo maior retenção de água no substrato.

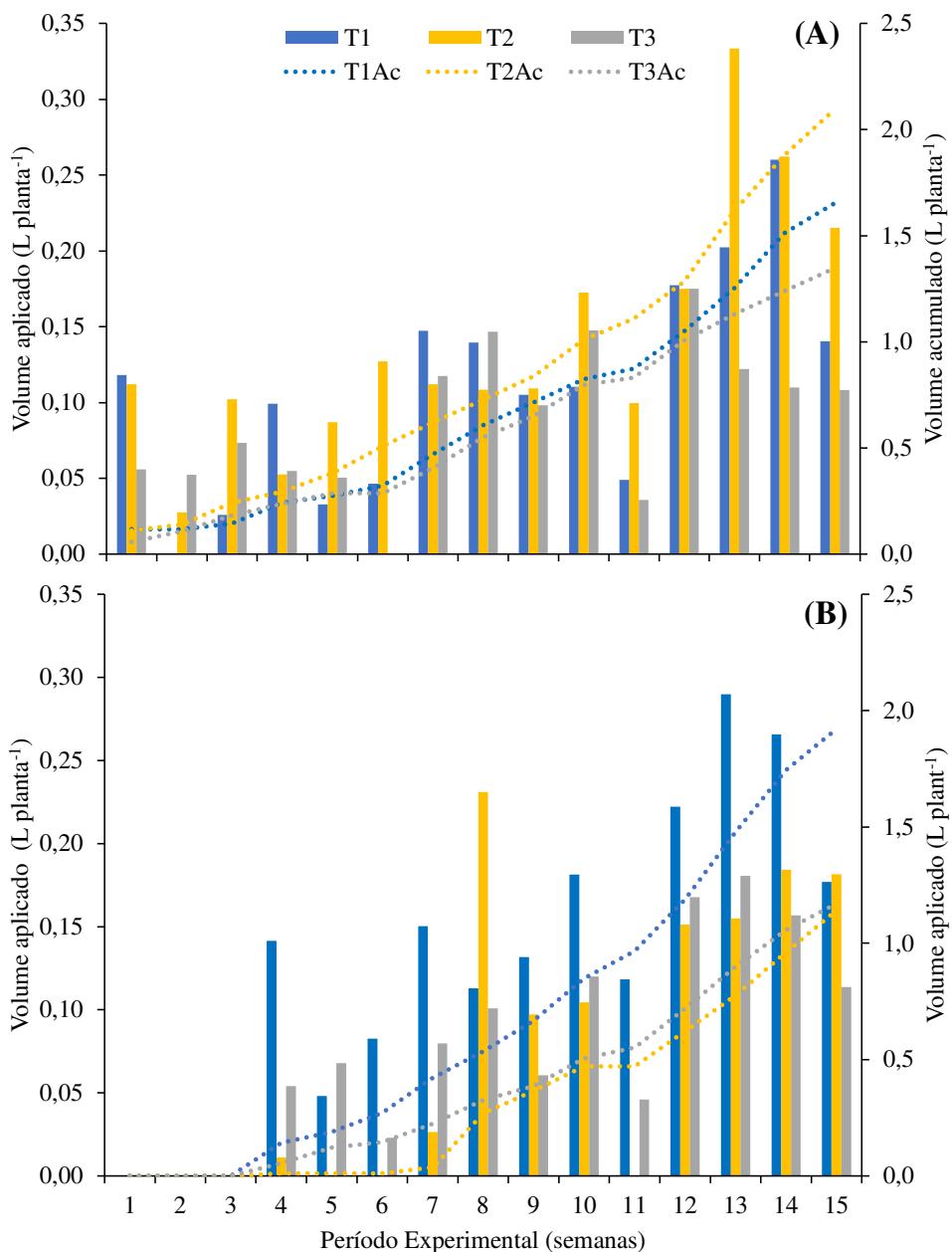


Figura 4. Volume de água aplicado por planta em condições de pleno sol (A) e com cobertura (B), para os diferentes tratamentos. T₁ – água de controle; T₂ - água residuária de bovinocultura ozonizada por 1 h; T₃ – água residuária de bovinocultura ozonizada por 2 h.

No cultivo a pleno sol (Figura 4A), as necessidades hídricas das plantas irrigadas com água dos tratamentos T₁ e T₃ foram semelhantes até a 12^a semana, enquanto sob a cobertura C₂ a exigência foi semelhante a partir da 8^a semana para as plantas irrigadas com ARB tratadas e, em média, 40% inferior à necessidade de plantas irrigadas com água de abastecimento municipal. Este fato pode ser explicado pela formação de um biofilme na superfície do tubo (Figura 5), causado pela maior carga orgânica do efluente aplicado na irrigação associada ao microclima criado pela cobertura.



Figura 5. Biofilme formado na superfície do tubo preenchido com biossólido.

Em uma revisão sobre o uso de microalgas em atividades agrícolas, Alvarez et al. (2021) explicam os benefícios que esses microrganismos primariamente fotossintéticos podem proporcionar ao substrato, como a melhoria da estrutura do solo. Os autores afirmam que, quando formada no solo, a biomassa de algas pode melhorar propriedades físicas como a retenção de água, atuando como um potencial condicionador do solo.

A cimentação ocorre a partir de detritos celulares e excreções de polissacarídeos extracelulares de origem microbiana. Tal cimentação provoca a formação de um biofilme evidente na superfície do solo, afetando a infiltração, percolação, retenção de água etc. (ROSSI et al., 2017). Em geral, o biofilme atua como um tampão do sistema, retardando a ação dos agentes meteorológicos na seção vertical do tubo e aumentando a eficiência do uso da água.

2.5.3 Crescimento e Qualidade de Mudas Florestais em Viveiros

As mudas de *D. nigra* foram coletadas aos 110 dias após a emergência (DAE), quando a maioria apresentava altura da parte aérea e diâmetro do coleto de acordo com o padrão para serem levadas a campo, conforme (DAVIDE e BOTELHO, 2015). As taxas de mortalidade foram inferiores a 10% e não estão associadas a um tratamento específico. A pleno sol, as mudas de *D. nigra* apresentaram variação crescente de altura, seguindo uma tendência linear (Figura 6A), independentemente do tipo de água de irrigação. Na condição de cobertura, o resultado foi semelhante para T₁, mas para T₂ e T₃ o crescimento seguiu uma tendência polinomial de segunda ordem (Figura 6C). Para o diâmetro do coleto, houve uma tendência polinomial de segunda ordem (Figura 6B) em todos os tratamentos, exceto T₂ na cobertura C₁ (Figura 6D), que apresentou um ajuste linear. O crescimento em altura e diâmetro para ambas as coberturas não apresentou identidade entre tratamentos ($p < 0.05$).

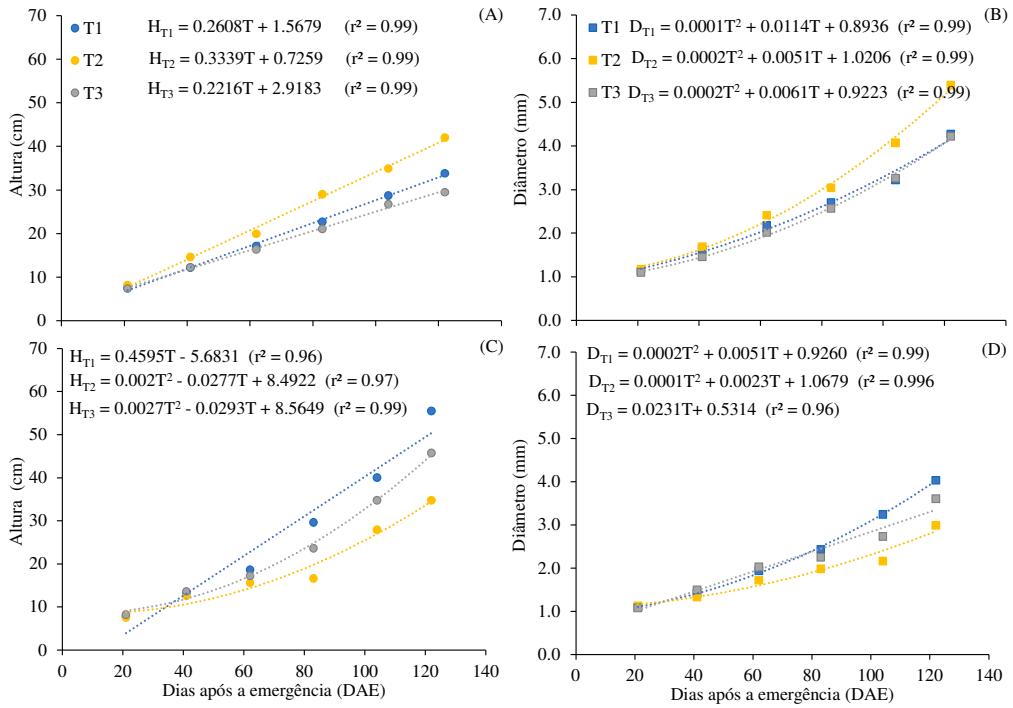


Figura 6. Crescimento de mudas de *D. nigra* em altura e diâmetro em função dos dias após a emergência (DAE), produzidas a pleno sol (A e B) e 50% de cobertura (C e D). (*p<0.05).

As mudas da cobertura C₂ atingiram a altura mínima para plantio no campo (30 cm) por volta dos 75 DAE para T₁, 110 DAE para T₂ e 92 DAE para T₃, enquanto a pleno sol essa altura foi atingida aos 108 DAE (T₁), 88 DAE (T₂) e 120 DAE (T₃). O diâmetro recomendado para plantio (3,0 mm) foi atingido primeiramente a pleno sol, aos 92, 80 e 96 DAE, para T₁, T₂ e T₃, respectivamente, e mais tarde sob cobertura com Sombrite®, aos 96, 120 e 105 DAE, respectivamente. O padrão comercial foi atingido mais rapidamente em T₂ sob pleno sol e em T₁ e T₃ sob condição de cobertura. Bueno et al. (2021) destacam a importância de produzir mudas de qualidade em menor tempo para maximizar a utilização do viveiro.

Apesar das diferenças entre os modelos apresentados na Figura 6, a altura e o diâmetro final diferiram entre os tratamentos avaliados (Tabela 3). As plantas irrigadas com T₂ apresentaram maiores valores (42,03 cm e 5,40 mm) a pleno sol. Com o sombreamento, as plantas irrigadas com T₁ apresentaram maiores valores de altura e diâmetro. Seguindo a mesma tendência, plantas irrigadas com T₁ e T₂ apresentaram maior IQD nas condições C₂ e C₁, respectivamente. Índices como o IQD, que combinam as variáveis alométricas da planta, são utilizados e comprovadamente servem como preditores para o estabelecimento do desenvolvimento das mudas (REYES MORENO et al., 2021), quanto maior o valor desse índice, melhor a qualidade da muda produzida.

Tabela 3. Atributos morfológicos de mudas de *D. nigra* a pleno sol (C₁) e sob cobertura com 50% de sombreamento (C₂) aos 122 dias após a emergência (DAE).

Cobertura	Tipos de água	H _{final} (cm)	D _{final} (mm)	IQD	PAi (g L ⁻¹)
C ₁	T ₁	33,85b	4,28b	0,26b	1,57b
	T ₂	42,03a	5,40a	0,47a	2,35a
	T ₃	29,03b	4,22b	0,25b	1,71b
C ₂	T ₁	55,84a	3,95a	0,17a	1,48b
	T ₂	34,75c	2,99b	0,10b	1,24b
	T ₃	45,73b	3,60a	0,15ab	2,01a

T₁: água controle; T₂: ARB tratada por 1 h; T₃: ARB tratada por 2 h; H_{final}: altura final; D_{final}: diâmetro final; IQD: índice de qualidade Dickson; PAi: produtividade da água de irrigação em relação à matéria seca total. As médias seguidas da mesma letra na coluna, para cada capa, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. (n = 12).

Sob a cobertura C₂, formou-se biofilme na superfície dos tubos, o que contribuiu para a menor aplicação de água às plantas, resultando no menor aporte de nutrientes presentes no ARB tratada. Quando foi utilizada água do tratamento T₂, as plantas apresentaram os menores valores médios de altura (34,75 cm) e diâmetro (2,99 mm) (Tabela 3). Os padrões alcançados sob sombreamento pelas mudas dos tratamentos T₁ e T₃ não diferiram significativamente, mas o tratamento com efluente ozonizado mais uma vez se destacou quanto à economia de água e eficiência no uso da água (Tabela 3).

O crescimento das mudas de *D. nigra* nos diferentes tratamentos e coberturas apresentou identidade em seus modelos, ou seja, o comportamento é semelhante entre os tratamentos hídricos, para cada cobertura (Figura 7). Esta é mais uma forma de destacar a eficiência produtiva do T₂ a pleno sol, aproveitando os recursos hídricos e nutrientes, de forma a atingir maior altura e diâmetro em menor tempo.

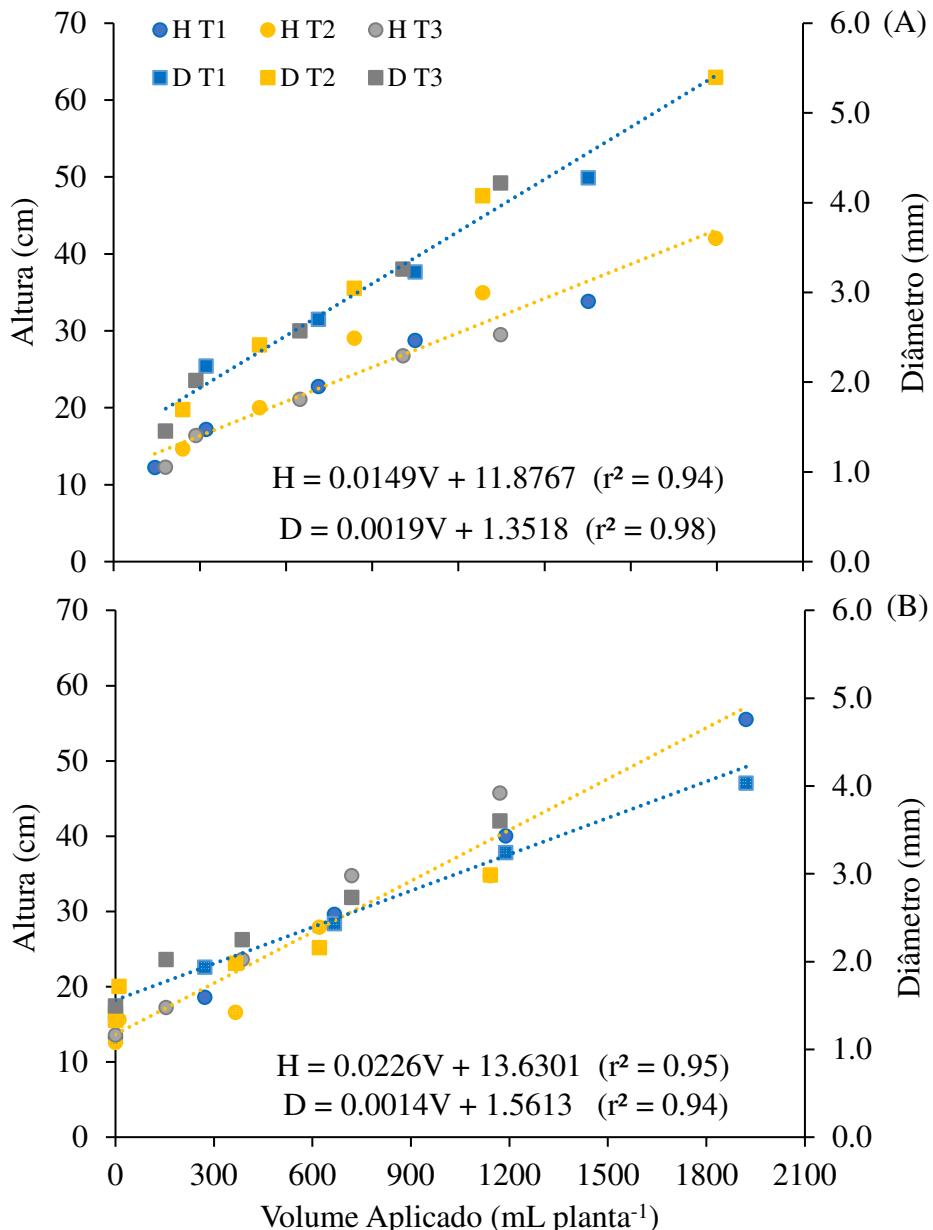


Figura 7. Crescimento de mudas de *D. nigra* em altura e diâmetro em função do volume irrigado por planta, produzidas a pleno sol (A) e sob sombreamento (B) (*p<0,05).

Sob a cobertura C₂, fica evidente que os padrões de plantio das mudas foram alcançados com o fornecimento de aproximadamente 1200 mL por planta, independente da água utilizada na irrigação. A pleno sol e com a mesma quantidade de água, apenas as mudas produzidas com T₁ e T₂ atingiram esse padrão.

2.5.4 Crescimento e Qualidade Inicial de Mudas em ARF

O crescimento das mudas de *D. nigra* em altura e diâmetro até 200 DAP é mostrado na Figura 8. Após o período de rustificação, as mudas produzidas a pleno sol (C₁) foram plantadas com alturas estatisticamente semelhantes (Figura 8A), mas as mudas produzidas com controle água (T₁) apresentou menor crescimento após 150 DAP. Para diâmetro (Figura 8B), as mudas produzidas em T₁ já apresentaram inferioridade no plantio, não atingindo o mesmo nível de T₂ e T₃ em nenhuma das avaliações.

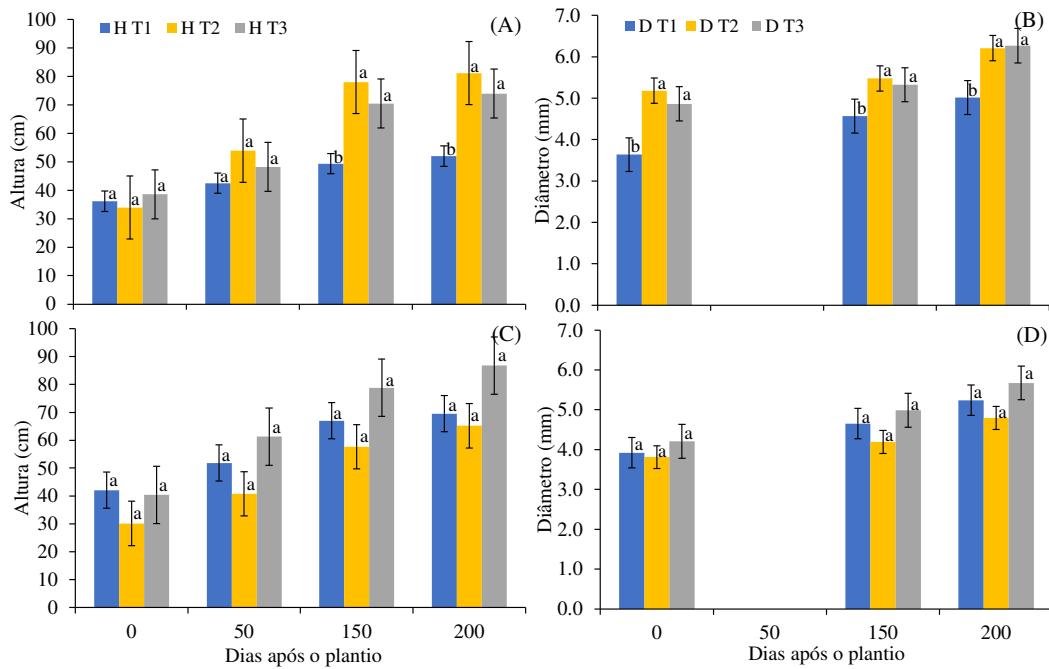


Figura 8. Crescimento em altura e diâmetro de mudas de *D. nigra*, plantadas em área de restauração florestal da Mata Atlântica, sob coberturas C₁ (A e B) e C₂ (C e D). C₁: pleno sol; C₂: 49,4% de sombreamento; T₁: água controle; T₂: ARB tratada por 1h; T₃: ARB tratada por 2h. As médias seguidas na coluna pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade; (n = 6).

As mudas produzidas na condição de sombreamento (C₂) não apresentaram diferenças estatísticas nos parâmetros avaliados durante o período amostrado (Figura 8A e Figura 8B), entretanto as mudas produzidas com ARB tratada (T₂ e T₃) tiveram um aumento em altura da ordem de 116,1% e 114,8%, respectivamente, indicando uma futura diferenciação em relação às mudas produzidas com água controle (T₁).

Embora o período de avaliação seja curto para o monitoramento de espécies florestais, os resultados obtidos aos 200 DAP indicam benefícios na produção de mudas irrigadas com ARB tratada, uma vez que houve maior oferta de nutrientes na fase de viveiro e absorção gradual dos nutrientes remanescentes no substrato. Esses resultados corroboram com (PERULLI et al., 2019), que avaliaram o efeito da irrigação com águas residuárias na fisiologia da nectarina. Os autores concluíram que as águas residuárias tratadas afetaram positivamente o crescimento vegetativo, especialmente em termos de comprimento de parte aérea. Para espécies florestais, não foram encontrados estudos de acompanhamento de mudas produzidas com água residuária.

2.6 CONCLUSÕES

Neste estudo, avaliou-se a qualidade da água residuária de bovinocultura (ARB) tratada por ozonização, a necessidade hídrica e seu efeito no crescimento de mudas de *Dalbergia nigra* cultivadas com lodo de esgoto sob diferentes condições de luminosidade. A altura e o diâmetro de mudas transplantadas em uma área de restauração florestal (ARF) de Mata Atlântica foram avaliados durante 200 dias. A irrigação com água residuária de bovinocultura (ARB) tratada por ozonização não comprometeu o desenvolvimento das mudas de *D. nigra*. Sob condições de pleno sol, o ARB ozonizado por 1 h promoveu um melhor padrão de expedição de mudas de *D. nigra*, reduzindo o tempo de produção em 20 dias considerando o mesmo microclima. Quando cultivadas sob sombreamento de aproximadamente 50%, as mudas de *D. nigra* atingem menor tempo de viveiro quando irrigadas com água de abastecimento municipal. Esse resultado foi observado no tratamento com água de abastecimento municipal de ARB ozonizada por 2 h, sendo que a maior produtividade de água foi alcançada pelo tratamento com água de reuso (T_3). O crescimento vegetativo inicial das mudas plantadas em ARF foi beneficiado pelos nutrientes fornecidos pelo ARB tratado. É possível produzir mudas florestais com lodo de esgoto e efluentes bovinos, que representam ações voltadas à conversão de resíduos em nutrientes e destinação de subprodutos, ações que se enquadram no conceito de economia circular.

2.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOURACHED, C.; ENGLISH, M. J.; LIU, H. Wastewater treatment by Microbial Fuel Cell (MFC) prior irrigation water reuse. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 144-149. 2016.
- ABREU, A. H. M. CARACTERIZAÇÃO E POTENCIAL DE SUBSTRATOS FORMULADOS COM BIOSSÓLIDO NA PRODUÇÃO DE MUDAS DE *Schinus terebinthifolius* Raddi. e *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 4, p. 1179. 2017.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements – **FAO Irrigation and drainage** paper 56. 1998.
- ALVARES, C. A. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 1. 2013.
- ALVAREZ, A. L. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. **Algal Research**, v. 54, p. 102200. 2021.
- AMORI, P. N. Germination and growth of horticultural crops irrigated with reclaimed water after biological treatment and ozonation. **Journal of Cleaner Production**, v. 336, p. 130173. 2022.
- APHA - American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22nd ed. Washington DC; Available: http://srjcstaff.santarosa.edu/~oraola/Assets/APHA_SM_20.pdf. 2019.
- ATAÍDE, G. DA M. Alterações fisiológicas durante a hidratação de sementes de *Dalbergia nigra* ((VELL.) FR. ALL. EX BENTH.). **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 615-625. 2016.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D.W. Water quality for agriculture. Rome: **Food and Agriculture Organization of the United Nations**; 1985.
- BAPTISTA, F. R. C. B; ATAÍDE, D. H. S; ROCHA, P.V.; SILVA, L. C.; ARAÚJO, E. J. G; CURTO, R.A. Stratification in the adjustment of hypsometric relationship models in forest fragment. **Scientific Electronic Archives**. v. 12, n. 6, p. 52-61, 2 dez. 2019.
- BOURIoug, M.; ALAOUI-SEHMER, L.; LAFFRAY, X.; BENBRAHIM, M.; ALEYA, L.; ALAOUI-SOSSÉ, B. Sewage sludge fertilization in larch seedlings: Effects on trace metal accumulation and growth performance. **Ecological Engineering**. 77: 216-224. 2015.
- BRASIL. Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005. **Conselho Nacional de Meio Ambiente**. Available at: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Accessed May. 2021.
- BRASIL. Resolução CONAMA 430, de 13 de maio de 2011. **Conselho Nacional de Meio Ambiente**. Available at: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Accessed May. 2021.
- BUENO, M. M.; LELES, P. S. S.; ABREU, J. F. G.; SANTOS, J. J. S.; CARVALHO, D. F. Water requirement and growth indicators of forest tree species seedlings produced with automated irrigation management. **PLOS ONE**, v. 15, n. 11, p. e0238677, 2 nov. 2020.

- BUENO, M. M.; LELES, P. S. S; PINTO, M. F. RESENDE, A. S.; COUTO, B. R. M.; CARVALHO, D. F. Water use in the growth of atlantic forest tree species seedlings under different shading levels. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 45, p. e025220, 2021.
- CARVALHO, D. F.; BUENO, M. M.; LELES, P. S. S.; ABREU, J. F. G.; MARTINS, R. C. F.; MEDICI, L.O.; Production and initial growth of forest species seedlings using sewage sludge and automated irrigation. **Ciência e Agrotecnologia**. 45: e017321. 2021.
- CARVALHO, P. E. R. Espécies arbóreas brasileiras. **Embrapa Informação Tecnológica**; 2006.
- CHENG, D. L.; NGO, H. H.; GUO, W. S.; CHANG, S. W.; NGUYEN, D. D.; KUMAR, S. M. Microalgae biomass from swine wastewater and its conversion to bioenergy. **Bioresource Technology**. 275: 109-122. 2019.
- CLEM, V.; MENDONÇA, H. V. Ozone reactor combined with ultrafiltration membrane: A new tertiary wastewater treatment system for reuse purpose. **Journal Environmental Management**.315: 115166. 2022.
- DAVIDE, A. C.; BOTELHO, S. A. Fundamentos e métodos de restauração de ecossistemas florestais: 25 anos de experiência em matas ciliares. Lavras, **Editora UFLA**, 636p. 2015.
- DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forestry Chronicle**. 36: 10-13. 1960.
- GOMES, D. P.; CARVALHO, D. F.; PINTO, M. F.; VALENÇA, D. D. C.; MEDICI, L. O. Growth and production of tomato fertilized with ash and castor cake and under varying water depths, cultivated in organic potponics. **Acta Scientiarum Agronomy**. 39: 201. 2017.
- GOTTSCHALK, C.; LIBRA, J.; SAUPE, A. Ozonation of Water and WasteWater: A Practical Guide to Understanding Ozone and Its Application. 2000.
- GRAYBILL, F. A. Theory and Application of the Linear Model. **Duxbury**. 2000.
- M'ARIMI, M. M.; MECHA, C. A.; KIPROP, A. K.; RAMKAT, R. Recent trends in applications of advanced oxidation processes (AOPs) in bioenergy production: Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 2020.
- MANCA, A.; SILVA, M. R.; GUERRINI, I. A.; FERNANDES, D. M.; VILLAS BÔAS, R. L.; SILVA, L. C.; FONSECA, A. C.; RUGGIU, M. C.; CRUZ, C. V.; SIVISACA, D. C. L.; MATEUS, C. M. D.; MURGIA ,I.; GRILLI, E.; GANGA, A.; CAPRA, G. F. Composted sewage sludge with sugarcane bagasse as a commercial substrate for Eucalyptus urograndis seedling production. **Journal of Cleaner Production**. 269:122145. 2020.
- MARCELINO, R. B. P.; LEÃO, M. M. D.; LAGO, R. M.; AMORIM, C. C. Multistage ozone and biological treatment system for real wastewater containing antibiotics. **Journal Environmental Management**. 195: 110-116. 2017.
- MARTINELLI, G.; MORAES, M. A.; Livro vermelho da flora do Brasil. - 1. ed. - Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 1100 p. 2013.
- MEDICI, L. O.; ROCHA, H. S.;CARVALHO, D. F.; PIMENTEL, C.; AZEVEDO, R. A. Automatic controller to water plants. **Scientia Agricola**. 67: 727-730. 2010

MELLO, G. A. B.; CARVALHO, D. F.; MEDICI, L. O.; SILVA, A. C.; GOMES, D. P.; PINTO, M. F. Organic cultivation of onion under castor cake fertilization and irrigation depths. **Scientiarum Agronomy**. 40: 34993. 2018

MENDONÇA, H. V.; OMETTO, J. P. H. B.; OTENIO, M. H.; REIS, A. J. D.; MARQUES, I. P. R. Bioenergy recovery from cattle wastewater in an UASB-AF hybrid reactor. **Water Science and Technology**. 76: 2268-2279. 2017.

MENDONÇA, H. V.; OMETTO, J. P. H. B.; OTENIO, M. H. Production of Energy and Biofertilizer from Cattle Wastewater in Farms with Intensive Cattle Breeding. **Water Air Soil Pollution**. 228: 72. 2017.

MOHSEN, M. S. Treatment and reuse of industrial effluents: case study of a thermal power plant. **Desalination**. 167: 75-86. 2004.

MOLINOS-SEANTE M.; HERNÁNDEZ-SANCHO, F.; SALA-GARRIDO, R. Cost-benefit analysis of water-reuse projects for environmental purposes: A case study for Spanish wastewater treatment plants. **Journal Environmental Management**. 92: 3091-3097.2011.

NAKAYAMA, F.S. Water analysis and treatment techniques to control emitter plugging. Tech Conf Proc - **Irrig Assoc.** 1982.

NÓBREGA, R. S. A.; BOAS, R. C. V.; NÓBREGA, J. C. A.; PAULA, A. M.; MOREIRA, F. M. S. Utilização de biossólido no crescimento inicial de mudas de aroeira (*Schinus terebinthifolius* Raddi). **Revista Árvore**. 31: 239-246. 2007.

PAŽDZIOR, K.; WRĘBIAK, J.; KLEPACZ-SMÓŁKA, A; GMUREK, M; BILIŃSKA, L.; KOS, L. Influence of ozonation and biodegradation on toxicity of industrial textile wastewater. **Journal Environmental Management**.195: 166-173. 2017.

PERULLI, G. D.; BRESILLA, K.; MANFRINI, L.; BOINI, A.; SORRENTI, G; GRAPPADELLI, L. C. Beneficial effect of secondary treated wastewater irrigation on nectarine tree physiology. **Agricultural Water Management**. 221: 120-130. 2019.

QUEIROZ, D.; ARCE, J. E.; KOEHLER, H. S. Identidade de modelos em funções de afilamento para mimosa *Scabrella bentham* em povoamentos nativos da região metropolitana de Curitiba/PR. **Revista Floreta ISSN Eletrônico** 1982-4688.

REKHATE, C. V.; SRIVASTAVA, J. K. Recent advances in ozone-based advanced oxidation processes for treatment of wastewater- A review. **Chemical Engineering Journal Advances**. 3:100031. 2020.

REYES MORENO, G.; FERNÁNDEZ, M. E.; CONTRERAS, E. D. Balanced mixture of biochar and synthetic fertilizer increases seedling quality of *Acacia mangium*. **Journal of Saudi Society Agricultural Sciences**. 20: 371-378. 2021.

ROSSI, F.; LI, H.; LIU, Y.; PHILIPPIS, R. Cyanobacterial inoculation (cyanobacterisation): Perspectives for the development of a standardized multifunctional technology for soil fertilization and desertification reversal. **Earth-Science Reviews**. 171: 28-43. 2017.

SHI, J.; WAN, N.; LI, L.; LI, Z.; HAN, H. Review on treatment technologies of coal gasification wastewater in China. **Journal of Cleanear Production**. 333: 130166. 2022.

SILVA, APM. Diagnóstico da Produção de Mudas Florestais Nativas no Brasil. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **IPEA**. Brasilia, 58p. Available:

http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7515/1/RP_Diagn%C3%B3stico_2015.pdf .
2015

SIVARANJANI, S.; PRASATH, V. A.; PANDISELVAM, R.; KOTHAKOTA, A.; KHANEHGAH, A. M. Recent advances in applications of ozone in the cereal industry. **LWT**. 146: 111412. 2021.

SOUZA, D. S.; MACIEL, A. M.; OTENIO, M. H.; MENDONÇA, H. V. Optimization of Ozone Application in Post-Treatment of Cattle Wastewater from Organic Farms. **Water Air Soil Pollution**. 231: 362. 2020.

SOUZA, D. S.; VALADÃO, R. C.; SOUZA, E. R. P.; BARBOSA, M. I. M. J.; MENDONÇA, H. V. ENHANCED Arthrospira platensis Biomass Production Combined with Anaerobic Cattle Wastewater Bioremediation. **BioEnergy Researc**. 2021.

SOUZA JUNIOR C. N.; BRANCALION PHS. Sementes & mudas: guia para propagação de árvores brasileiras. São Paulo SP: **Oficina de Textos**; 2016.

TANG, P. Organics removal from shale gas wastewater by pre-oxidation combined with biologically active filtration. **Water Research**. 2021.

USDA. **Livestock and Products Annual Brazil**. In: United States Department of Agriculture [Internet]. Available:

https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Livestock%20and%20Products%20Annual_Brasilia_Brazil_08-15-2021.pdf. 2021

WILLERS, C. D.; FERRAZ, S. P.; CARVALHO, L. S.; RODRIGUES, L. B. Determination of indirect water consumption and suggestions for cleaner production initiatives for the milk-producing sector in a Brazilian middle-sized dairy farming. **Journal of Cleanear Production**. 72: 146-152. 2014.

ZHANG, T.; TAO, Y. Z.; YANG, H. W.; CHEN, Z.; WANG, X. M.; XIE, Y. F. STUDY on the removal of aesthetic indicators by ozone during advanced treatment of water reuse. **Journal of Water Process Engineering**. 36: 101381. 2020.

3. CAPÍTULO II

EFLUENTE BOVINO TRATADO AFETA O CRESCIMENTO, A QUALIDADE E A PRODUTIVIDADE DA ÁGUA DE MUDAS DE DALBERGIA NIGRA PRODUZIDAS COM NÍVEIS DE SOMBREAMENTO E IRRIGAÇÃO

Capítulo publicado como artigo na Scientia Agricola, em 06/04/2023: SILVA, L. O.; MENDONÇA, H. V.; CONFORTO, B. A. A. F.; LELES, P. S. S.; CARVALHO, D. F. Treated cattle wastewater affects the growth, quality and water productivity of *Dalbergia nigra* seedlings produced with shading and irrigation levels. Scientia Agricola (ID SA-2023-0058.).

3.1 RESUMO

A contínua demanda por água no setor agrícola tem incentivado pesquisadores de todo o mundo a buscarem alternativas para otimizar o recurso e a utilização de águas resíduárias na irrigação é promissora neste cenário, principalmente para a produção de mudas de árvores. O crescimento, a qualidade e a produtividade hídrica de mudas de *Dalbergia nigra* cultivadas com lodo de esgoto foram determinadas quando irrigadas com água de abastecimento (T_1) e água resíduária de bovinocultura (ARB) tratadas por 1 h (T_2) e 2 h (T_3) de ozonização, considerando quatro lâminas de irrigação e níveis de sombreamento (0% (C_1), 37,6% (C_2), 49,4% (C_3), 75,8% (C_4)). Avaliaram-se altura, diâmetro do caule e biomassa, bem como o Índice de Qualidade de Dickson (IQD). Os maiores volumes de água aplicados em cada experimento foram $2,342\text{ L planta}^{-1}$ em T_2C_1 , $2,114\text{ L planta}^{-1}$ em T_1C_3 e $1,556\text{ L planta}^{-1}$ em T_3C_1 . A ARB tratada proporcionou crescimento satisfatório das mudas, principalmente T_2 , destacando-se o IQD de 2,34 obtido em C_1 , e melhor produtividade de água ($3,8\text{ g L}^{-1}$) em T_2C_1 , com suprimento total (lâmina 100%). A utilização de insumos alternativos na produção de mudas de espécies arbóreas é promissora e indica benefícios na destinação de resíduos, como lodo de esgoto e efluentes.

Palavras-chave: Lodo de esgoto. Ozonização Mata Atlântica Restauração. Irrigação automatizada. Parâmetros biométricos.

3.2 ABSTRACT

The continuous demand for water in the agricultural sector has encouraged researchers around the world to find alternatives to optimize the resource and using wastewater in irrigation is promising in this scenario, especially for the tree seedling production. The growth, quality and water productivity of *Dalbergia nigra* seedlings cultivated with sewage sludge were determined when irrigated with urban supply water (W_1), and cattle wastewater (CWW) treated for 1 h (W_2) and 2 h (W_3) of ozonation, considering four irrigation depths and shading levels (0% (C_1), 37.6% (C_2), 49.4% (C_3), 75.8% (C_4)). The height, stem diameter and biomass, as well as the Dickson Quality Index (DQI) were evaluated. The largest volumes of water applied in each experiment were $2.342 \text{ L plant}^{-1}$ in W_2C_1 , $2.114 \text{ L plant}^{-1}$ in W_1C_3 and $1.556 \text{ L plant}^{-1}$ in W_3C_1 . The CWW provided satisfactory seedling growth, especially W_2 , highlighting the DQI of 0.47 obtained in C_1 , and better water productivity (3.8 g L^{-1}) in W_2C_1 , with full depth. Using alternative inputs in the seedling production of tree species is promising and indicates benefits in waste disposal, such as sewage sludge and wastewater.

Keywords: Sewage sludge. Ozonation. Atlantic Forest. Restoring. Automated irrigation. Biometric parameters.

3.3 INTRODUÇÃO

A exploração inadequada dos recursos hídricos associada ao aumento da demanda está se tornando um sério desafio global, no qual têm surgido conflitos entre os setores produtivos dependentes da água (LI et al., 2022). Os setores ligados à agricultura, pecuária, produção florestal, pesca e aquicultura já demandam 983,0 m³ s⁻¹ no Brasil (IBGE, 2020), com previsão de aumento em torno de 60% nos próximos 20 anos (ANA, 2022).

A aplicação de água resíduária se mostra promissora, principalmente no setor florestal, pois não envolve a produção de alimentos para consumo humano e, se bem manejada, não traz prejuízos à saúde (SALGOT e FOLCH, 2018), além de fornecer nutrientes às mudas (LUBELLO et al., 2004). A água resíduária de bovinocultura (ARB) precisa de atenção principalmente porque não podem ser descartados sem tratamento em corpos d'água ou usada diretamente na agricultura (SILVA et al., 2022). Nesse sentido, a utilização de ARB tratada como água de irrigação em viveiros apresenta potencial como uma alternativa sustentável, embora ainda não existam resultados disponíveis na literatura que sustentem a recomendação dessa prática.

A água é essencial para a produção de mudas de espécies arbóreas (GABIRA et al., 2021), pois afeta aspectos morfofisiológicos relacionados ao crescimento e sua rusticidade (SIPPEL et al., 2018). No entanto, a falta de técnica e manejo adequados prejudica a eficiência dos sistemas de irrigação e a qualidade das mudas (CARVALHO et al., 2021), justificando a importância de determinar a necessidade hídrica das espécies arbóreas (BUENO et al., 2020).

Dalbergia nigra (Vell.) Allemão ex Benth (Jacarandá-da-bahia) é uma espécie nativa da Mata Atlântica e devido a sua durabilidade natural e alto valor no mercado tem sido alvo de exploração inadequada (SANTOS et al., 2021), sendo considerada uma espécie ameaçada de extinção (vulnerável segundo a lista vermelha (MARTINELLI e MORAES, 2013). Lima et al., (2021) destacam a importância do entendimento fisiológico e silvicultural das espécies, como sua adaptação a diferentes níveis de sombreamento, pois espécies nativas podem apresentar diferentes respostas no crescimento de acordo com o nível de luminosidade (BALLESTRERI et al., 2021) e lâminas de irrigação (BUENO et al., 2021).

Este trabalho teve como objetivo avaliar o crescimento de mudas de *Dalbergia nigra* quando produzidas com níveis de sombreamento e irrigação com ARB tratada por ozonização e água de abastecimento local.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil ($22^{\circ}45'21"S$, $43^{\circ}40'28"W$, 33,0 m de altitude), com clima Aw, segundo a classificação de Köppen com médias anuais de precipitação e temperatura variando de 1.300 a 1.600 mm e de 22 a 24°C, respectivamente (ALVARES et al., 2013). Três experimentos fatoriais 4x4, foram conduzidos simultaneamente e, se diferenciaram pelo tipo de água utilizada para irrigação: água de abastecimento (testemunha) (T_1) e ARB tratada por 1 h (T_2) e 2 h (T_3) de ozonização (SOUZA et al., 2020). Adotou-se o delineamento em blocos casualizados, as mudas de *Dalbergia nigra* foram avaliadas em quatro níveis de sombreamento (parcelas) e quatro lâminas de irrigação (subparcelas) e quatro repetições.

A *Dalbergia nigra* foi semeada no dia 26/04/2021, colocando-se duas sementes em cada tubete (280 cm³) preenchido com biossólido puro (lodo de esgoto estabilizado). Este material foi originado de uma estação de tratamento de esgoto pertencente à CEDAE - Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (ETE - Alegria), de áreas urbanas residenciais e comerciais, e não continha resíduos industriais. A caracterização química do biossólido realizada de acordo com os procedimentos oficiais contidos na Resolução CONAMA 498 (BRASIL, 2020) indicaram valores totais de macronutrientes de 1,5% N, 0,61% P, 0,16% K, 0,89% S, 1,57% Ca e 0,32% Mg, mais 9,41% de carbono orgânico. Para os micronutrientes 722,7 mg kg⁻¹ Zn, 20773,3 mg kg⁻¹ Fe, 184,5 mg kg⁻¹ Mn, 164,3 mg kg⁻¹ Cu, 12,1 mg kg⁻¹ B. O substrato apresentou densidade aparente de 0,74 g cm⁻³, porosidade total de 0,70 cm³ cm⁻³ e conteúdo de água de 0,37 cm³ cm⁻³ a 10 kPa, de acordo com a curva de retenção de água, mostrada na Equação 7.

$$\theta = 4 \cdot 3^{-6} + \frac{0.72}{[1 + (0.27 * h)^{1.24}]^{0.44}} \quad (7)$$

Em que θ é a umidade do substrato (cm cm⁻³) e h é o potencial mátrico (kPa).

Após a emergência das plântulas foi realizado desbaste, deixando sempre a planta de maior tamanho e mais centralizada. Aos 35 dias após emergência (DAE) e com altura média das mudas em torno de 7,5 cm, 24 tubetes foram acondicionados em cada bandeja plástica, sendo utilizadas 3 linhas com 8 plantas por linha (Figura 9A). As bandejas foram dispostas individualmente em bancadas metálicas revestidas por telas agrícolas poliolefinas comerciais na cor preta, com exceção daquelas que permaneceram a pleno sol. Utilizando um luxímetro digital (mod. LD-400, Instrutherm), a iluminância da cobertura foi avaliada durante 5 dias, em intervalos de 1 hora, indicando 67,74 Lux (C_1), 41,43 Lux (C_2), 34,28 Lux (C_3) e 12,26 Lux (C_4), caracterizando, respectivamente, os tratamentos com 0 (pleno sol), 37,6%, 49,4 % e 75,8% de atenuação.

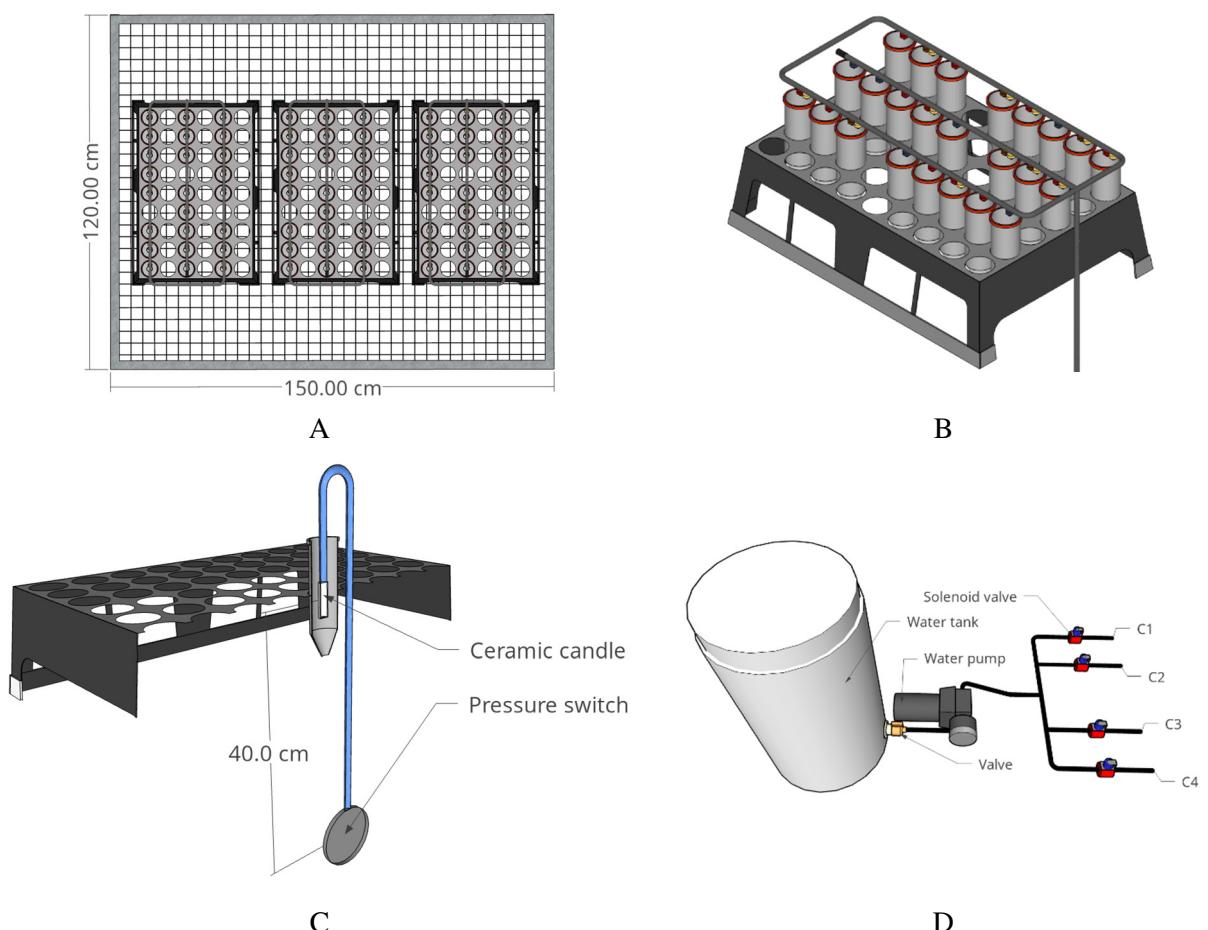


Figura 9. Disposição das bandejas na bancada metálica (A), malha emissores (B), seção lateral indicando o posicionamento do AAI no tubo (C) e vista do sistema de bombeamento acoplado às válvulas solenoides (D).

Termohigrômetros digitais (mod. HT-4010, Icel) foram instalados no interior das bancadas com coberturas para determinação da umidade relativa e da temperatura do ar, com intervalo de armazenamento de dados de 30 minutos. Para a caracterização meteorológica na condição pleno sol, além dos dados registrados pelo HT, foram utilizados os dados registrados em uma estação meteorológica do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), localizada próxima ao experimento. Com os dados meteorológicos, a evapotranspiração de referência (ET₀) foi estimada diariamente pelo método de Penman-Montheith FAO-56 (ALLEN et al., 1998). Além disso, pluviômetros foram instalados na condição de pleno sol e dentro de cada cobertura.

A ARB foi coletada na unidade experimental denominada “Fazendinha Agroecológica km 47” (SIPA, Seropédica-RJ) após tratamento preliminar para a remoção de sólidos grosseiros (decantador) e tratamento biológico anaeróbio (reator UASB), com tempo de retenção hidráulica de 7 dias, conforme Souza et al. (2021). O tratamento da ARB por ozonização foi realizado conforme metodologia adaptada por Souza et al. (2020), em escala de bancada, utilizando reatores de leito fixo construídos com tubo de PVC de 3” de diâmetro e 0,7 m de comprimento, preenchidos com meio plástico poroso (bio-aneis), em 60% do seu volume. O processo de oxidação foi realizado por um difusor (tamanho do poro de 20 µm) disposto no fundo do reator e conectado por uma mangueira a um gerador de O₃ (Ozone Generation, GL-3189A, China), com uma taxa de fluxo de 1,3 L min⁻¹, pureza de 92% (\pm 2) e concentração média de 7,8 mg L⁻¹ (\pm 1). Na parte superior do reator foi inserido um maço de

estopa ou algodão a fim de gerar uma atmosfera interna de maior concentração de ozônio, evitando o contato direto do ar atmosférico com a superfície do gás/líquido, e absorver partículas mobilizadas pela força de arrasto do gás (processo de flotação).

Os valores médios dos parâmetros físico químicos da ARB após UASB (bruta), tratada por 1h (T_2) e 2h (T_3) foram respectivamente: pH – 7,4, 7,6 e 7,8, condutividade elétrica – 2,5, 1,8 e 1,6 dS m⁻¹, sólidos totais – 970, 360 e 247 mg L⁻¹, turbidez – 231, 106 e 75 NTU, carbono orgânico total – 30,9, 4,3 e 3,1 mg L⁻¹, cálcio – 17,8, 18,2 e 17,8 mg L⁻¹, fósforo total – 17,4, 15,5 e 11,6 mg L⁻¹, magnésio – 13,2, 12,7 e 13,1 mg L⁻¹, nitrogênio amoniacal – 48,4, 26,8 e 18,8 mg L⁻¹, sódio 33,6, 29,1 e 32,8 e razão de adsorção de sódio – 8,5, 7,5 e 8,4.

Sistemas de irrigação por gotejamento, constituídos por mangueiras de polietileno de 16 mm e emissores (Netafim, mod. PCJ-HCNL) com vazões nominais de 3,0, 2,5, 2,0 e 1,7 L h⁻¹ foram instalados em cada bandeja de mudas (Figura 9B) e apresentaram uma distribuição uniformidade (DU) maior que 95%, segundo (KELLER e KARMELO, 1974). A reposição de água foi realizada automaticamente em resposta à necessidade hídrica das plantas. Isso foi possível com o uso do acionador automático de irrigação (AAI), proposto por Medici et al. (2010), que opera em resposta à tensão de água do solo/substrato e é regulado pela diferença de nível (DN) entre uma cápsula porosa (sensor) e um pressostato, interligados por um tubo de polietileno de 9,5 mm. Os sensores, com aproximadamente 5 cm de comprimento, foram confeccionados a partir de velas filtrantes comerciais e instalados no tubete preenchido com biossólido, no mesmo espaço físico das raízes de crescimento (Figura 9C). Foram utilizados doze acionadores, um para cada tratamento, permitindo que o sistema de irrigação fosse acionado de forma independente em resposta ao desenvolvimento das mudas em diferentes sombreamentos e níveis de água utilizados.

Quando o potencial matricial do substrato (PMS) atingiu um valor correspondente a DN, fixado em 40 cm, o pressostato foi acionado, permitindo que a corrente elétrica fluísse para a bomba e válvula solenoide correspondentes, iniciando a irrigação das mudas (Figura 9D). Após molhar o substrato, a tensão no tubo de polietileno é aliviada pelo acionamento do pressostato, momento em que a energia elétrica é cortada e a irrigação é interrompida. As tensões de água no substrato de ativação e desativação correspondentes à diferença de nível adotada no presente estudo foram monitoradas por Gomes et al. (2017) e Sousa et al. (2020) e confirmam a eficiência do AAI, que foi utilizado na irrigação de diferentes culturas (BEZERRA et al., 2019; CRUZ et al., 2022; SANTOS et al., 2020) e na produção de mudas de espécies arbóreas (BUENO et al., 2021, 2020; CARVALHO et al., 2021). Além disso, não houve drenagem nos tubetes, indicando que a água aplicada pelo AAI foi efetivamente utilizada para o desenvolvimento das mudas.

Em cada experimento e para cada nível de sombreamento, foram instalados AAI em tubetes irrigados com o emissor de 3,0 L h⁻¹, permitindo a reposição de 100% (D₄) da necessidade hídrica das plantas. Consequentemente, as mudas irrigadas com emissores de 2,5, 2,0 e 1,7 L h⁻¹ receberam, proporcionalmente, 83 (D₃), 67 (D₂) e 57% (D₁) da demanda hídrica, respectivamente.

O sistema de irrigação foi alimentado por motobombas independentes de 12 V (NeoSolar SingFlo DP-160) com base na qualidade da água, alimentadas por dois módulos fotovoltaicos de 130 W (mod. YL140p-17b, Yingli Solar) conectados a uma bateria (BUENO et al., 2021). Para monitorar o momento e o horário em que os tratamentos receberam água de irrigação, foi instalado um sistema eletrônico de coleta e armazenamento de dados, composto por uma placa Arduino Mega programada para realizar leituras a cada segundo, um cartão de memória SD e divisores de tensão (adaptados de BUENO et al., 2021).

Aos 21 (01/06), 41 (21/06), 62 (12/07), 83 (02/08), 104 (23/08) e 122 (10/09) dias após a emergência (DAE), as mudas foram avaliadas em altura (H) e diâmetro do coletor (D). Após a última avaliação, quando cerca de 50% delas adquiriram uma expedição padrão de 30

cm de altura e 3,0 mm de diâmetro do caule (BUENO et al., 2021), três mudas foram selecionadas para análise destrutiva. As plantas foram cortadas, separadas do sistema radicular aéreo e colocadas em sacos de papel, sendo então colocadas em estufa a 65 °C até atingir massa constante. Foram determinadas a massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR) e massa seca total (MST). A partir dos dados obtidos, foram determinados o Índice de Qualidade de Dickson (IQD) (DICKSON et al., 1960) e a produtividade da água de irrigação (PAi), calculada pela razão entre o MST e o volume de água aplicado para irrigação.

Para todos os conjuntos de dados coletados, os pressupostos de normalidade e homoscedasticidade foram testados para realizar a análise de variância, usando os testes Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente, a 5% de probabilidade, usando o software R (R CORE, 2022). Ao longo do período de avaliação, foram comparadas as variáveis H e D das mudas em cada nível de sombreamento (C_1 , C_2 , C_3 e C_4), enquanto ao final dos experimentos foi avaliada a produtividade de água para cada cobertura e para cada nível de irrigação. As comparações estatísticas em cada situação descrita e para análise da extração de nutrientes foram realizadas adotando-se o teste de Tukey ($p \leq 0,05$), utilizando o software Sisvar (versão 5.8, Build 92).

Ao final dos experimentos e para cada cobertura e tipo de água utilizada, foi realizada uma análise de regressão, ajustando modelos entre as variáveis H, D e IQD, e volume total recebido por muda, a 5% de probabilidade de significância, por meio do mesmo software.

3.5 RESULTADOS

Os volumes aplicados por irrigação foram influenciados pelas condições meteorológicas, dependendo do nível de sombreamento (Tabela 4). A radiação solar média diária aumentou ao longo dos períodos de avaliação, proporcionando um aumento na ETo, que atingiu 3,9 mm dia⁻¹ no período 104-122 DAE. Rs variou de 2,10 (78 DAE) a 20,92 MJ m⁻² dia⁻¹ (114 DAE), enquanto o ETo variou de 1,1 (94 DAE) a 6,8 mm dia⁻¹ (107 DAE), totalizando 299,9 mm.

Tabela 4. Temperaturas e umidades relativas máximas e mínimas, radiação solar e ETo médias diárias nos períodos entre avaliações dos experimentos.

Parâmetro	Cobertura	Períodos em dias após a emergência (DAE)				
		21-40	41-61	62-82	83-103	104-122
$T_{\text{máx}}$ (°C)	C ₁	31,4	29,6	30,9	32,1	34,4
	C ₂	30,1	28,2	29,7	31,3	33,3
	C ₃	30,6	28,9	30,2	31,2	33,3
	C ₄	30,1	28,6	29,8	30,5	33,0
$T_{\text{mín}}$ (°C)	C ₁	17,3	14,3	12,9	16,0	19,5
	C ₂	17,2	14,4	13,0	15,8	19,2
	C ₃	17,2	14,5	13,1	15,8	19,3
	C ₄	17,2	14,5	13,1	15,8	19,2
$UR_{\text{máx}}$ (%)	C ₁	96,9	98,3	97,1	96,2	95,0
	C ₂	96,5	96,9	94,7	95,2	94,8
	C ₃	95,7	95,2	92,6	94,5	95,8
	C ₄	97,6	97,6	94,2	95,6	94,9
$UR_{\text{mín}}$ (%)	C ₁	54,1	50,9	42,6	47,0	48,2
	C ₂	56,2	52,4	44,0	47,2	49,5
	C ₃	55,4	52,8	43,8	48,5	51,2
	C ₄	57,3	53,6	44,1	51,2	50,6
Rs (MJ m ⁻² dia ⁻¹)	-	11,24	11,98	13,25	13,70	14,42
ETo (mm dia ⁻¹)	-	2,36	2,36	2,95	3,36	3,88

* Dias após a emergência das plântulas; T_{max} – temperatura máxima; $T_{\text{mín}}$ – temperatura mínima; $UR_{\text{máx}}$ – umidade relativa máxima; $UR_{\text{mín}}$ – umidade relativa mínima; Rs – radiação solar; ETo: evapotranspiração. C₁ - pleno sol; C₂ - 37,6%; C₃ - 49,4 %; e C₄ - 75,8% de atenuação.

Os volumes aplicados na condição de 100% de reposição hídrica (D₄) e os correspondentes à precipitação, em cada nível de sombreamento e períodos entre avaliações também são apresentados na Figura 10. Ocorreram chuvas durante todo o período de avaliação, o que foi suficiente para atender a demanda de mudas irrigadas com T₁ e T₂, em condição de sombreamento, e com T₃ nas coberturas C₃ e C₄, dos 21 aos 40 DAE. Em geral, as plantas irrigadas com T₃ demandaram menos água, sendo que em C₁ as plantas demandaram 17,4 e 33,6% menos quando irrigadas com T₁ e T₂, respectivamente, e 22,3 e 24,9% menos quando cultivadas em C₄.

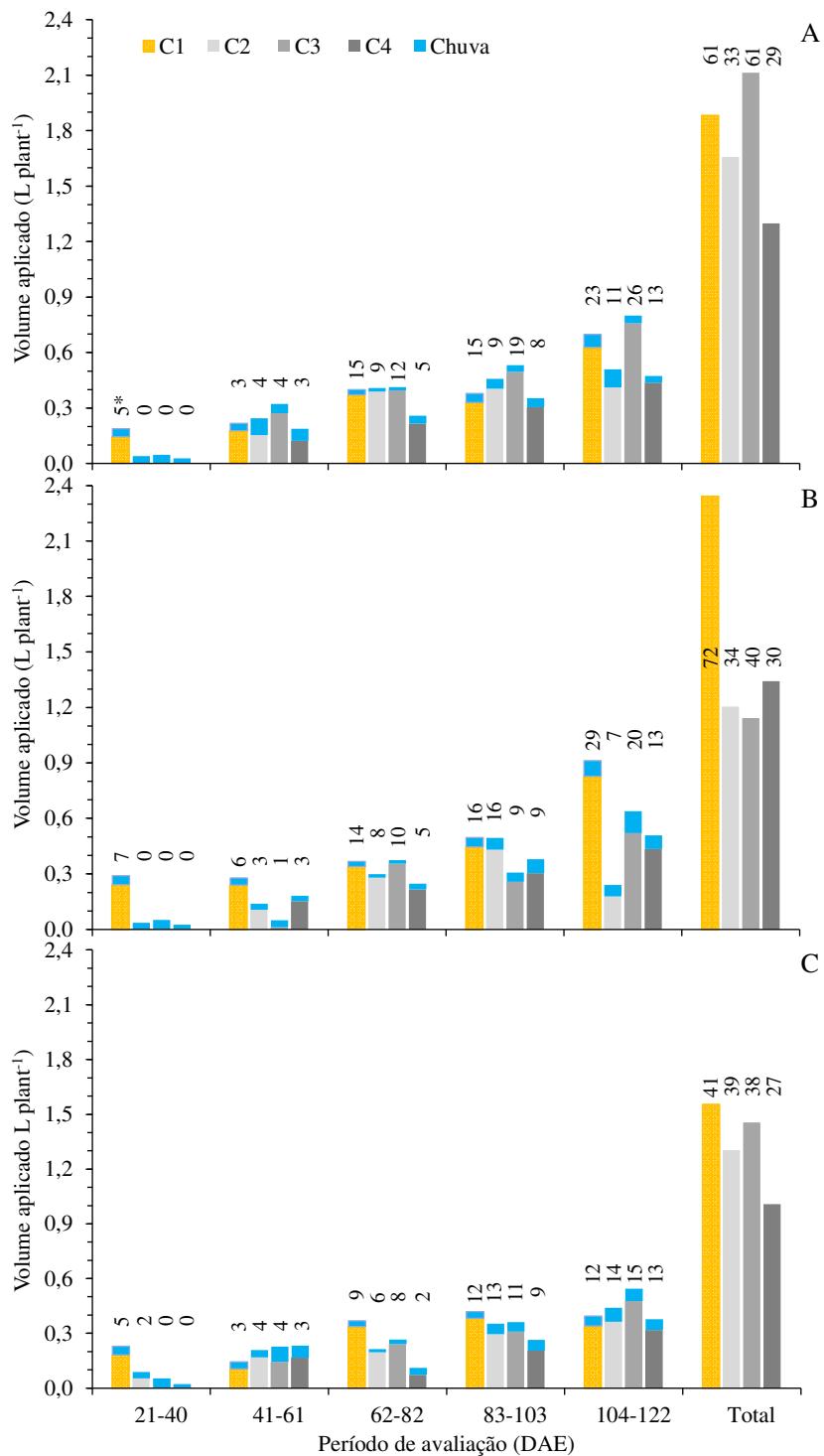


Figura 10. Volumes aplicados nos períodos de avaliação das mudas de *D. nigra* nas diferentes coberturas e no tratamento com 100% de reposição hídrica, para T₁ (A), T₂ (B) e T₃ (C). T₁ - água de controle; T₂ - efluente bovino ozonizado por 1 h; T₃ - efluente bovino ozonizado por 2 h; C₁ - pleno sol; C₂ - 37,6%; C₃ - 49,4%; e C₄ - 75,8% de atenuação.

A Figura 11 está apresentando as diferenças de altura e diâmetro de mudas de *Dalbergia nigra* entre as épocas de avaliação, nos diferentes níveis de sombreamento e tipos de água de irrigação na condição de 100% de reposição hídrica (D₄). O sombreamento artificial teve efeito significativo no crescimento em altura das mudas, principalmente nas

duas últimas épocas de avaliação em C₃ e C₄, independentemente do tipo de água utilizada para irrigação. Esse resultado pode ser explicado pela “síndrome de evitação da sombra (SAS)”, que se refere a um conjunto de alterações ontogênicas causadas por alterações no espectro da luz, por meio de sinais a moléculas fotorreceptoras dedicadas que promovem uma série de respostas de crescimento das plantas (PIERIK e BALLARÉ, 2021).

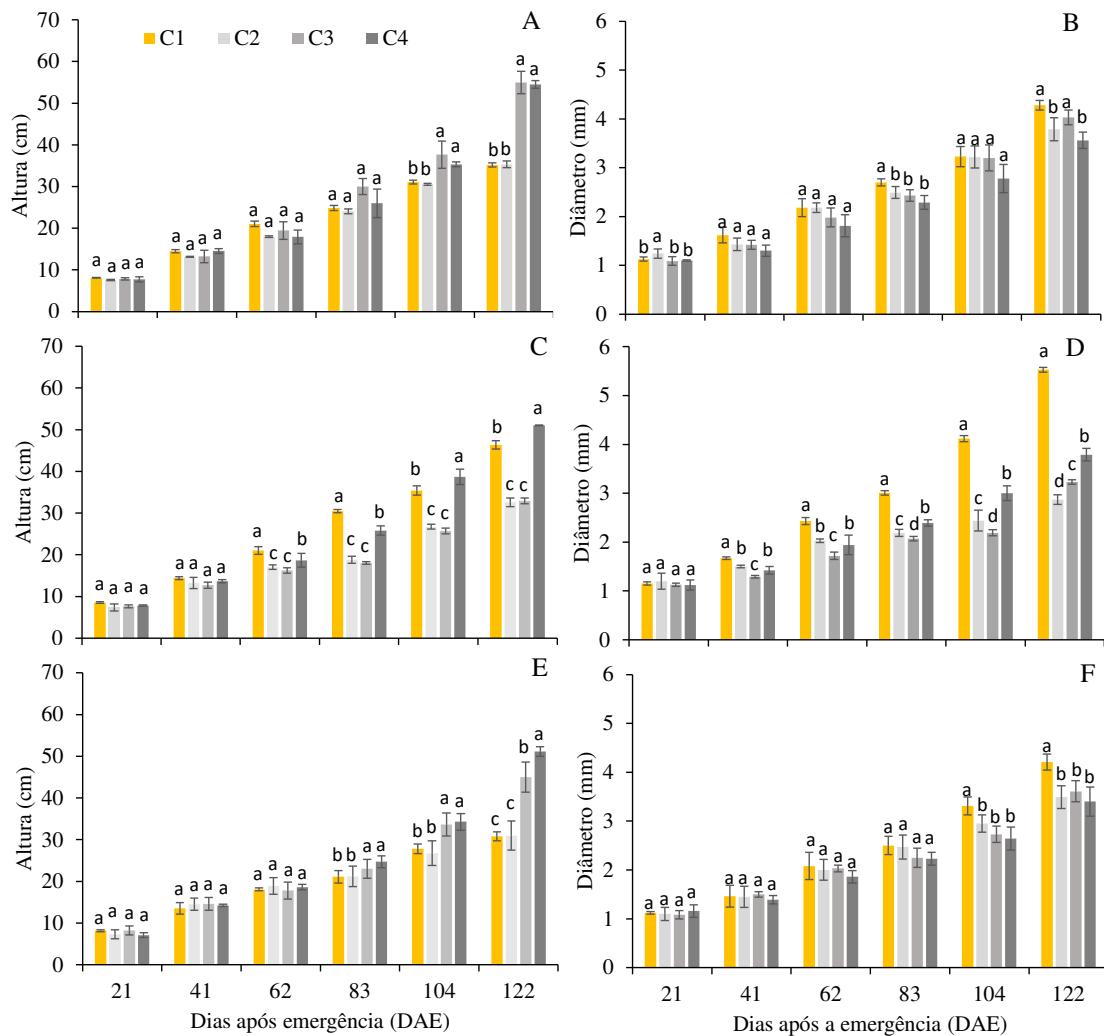


Figura 11. Crescimento em altura (esquerda) e diâmetro (direita) das mudas de *D. nigra* nas condições de pleno sol (C1) e com cobertura (C2, C3 e C4), no tratamento com 100% de reposição hídrica, nos tipos de água A e B (T1: água controle), C e D (T2: ARB tratada 1h) e E e F (T3 ARB tratada 2h).

Os valores de H e D relativos ao volume aplicado por planta ao final do período de avaliação (122 DAE) para todos os níveis de sombreamento, tipos de água e emissores são apresentados na Figura 12.

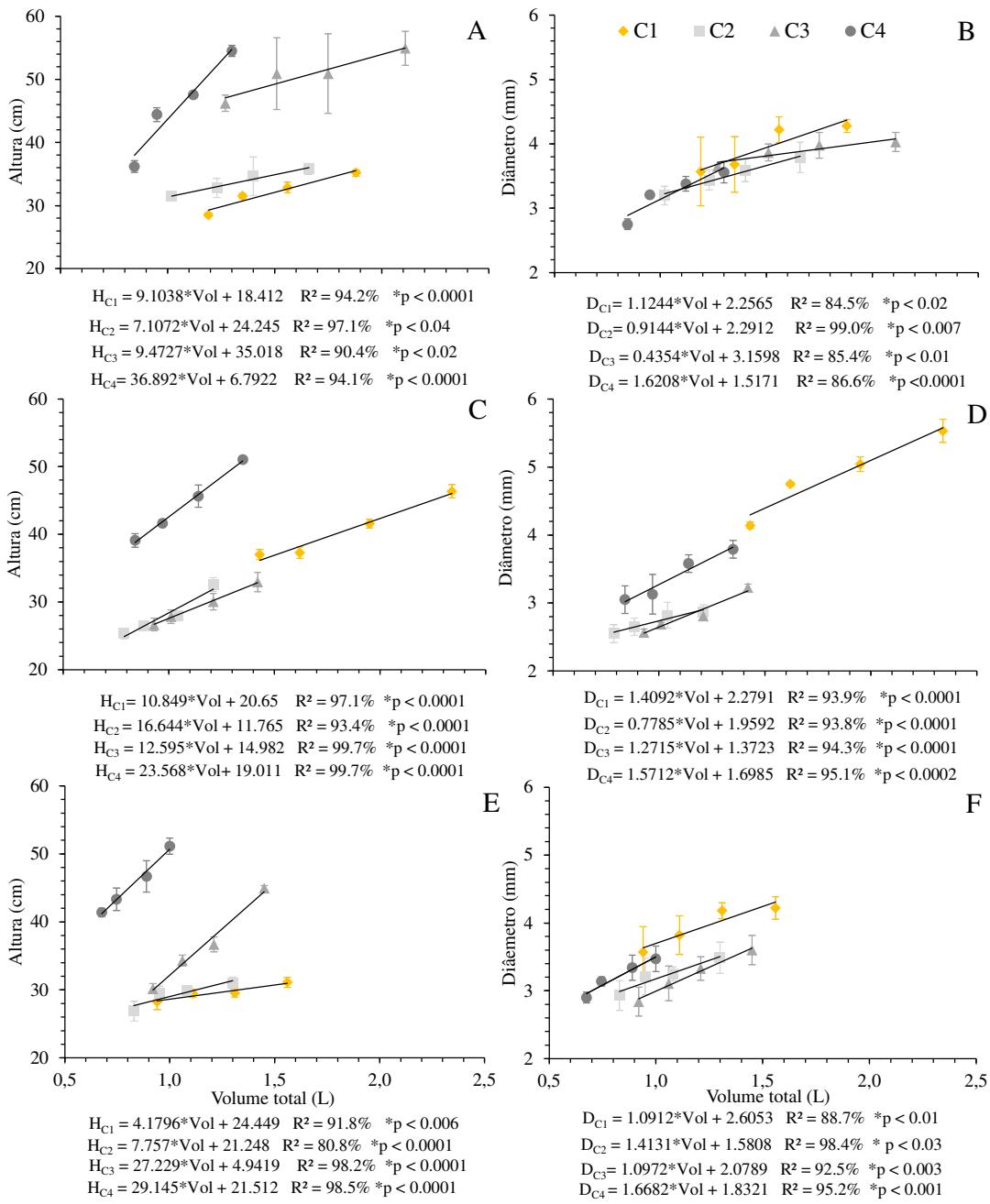


Figura 12. Crescimento de mudas de *D. nigra* em altura (esquerda) e diâmetro (direita) em relação ao volume irrigado. Os pontos representam as quatro lâminas aplicadas, ajustes foram feitos com valores médios alcançados em cada regime hídrico. A e B (T1: água controle), C e D (T2: ARB tratada 1h) e E e F (T3 ARB tratada 2h).

Os melhores ajustes foram obtidos com o modelo linear, com resposta positiva de H e D em relação ao aumento do volume aplicado. Independentemente do tipo de água utilizada, as mudas de *Dalbergia nigra* cultivadas em C₄ apresentaram maior taxa de crescimento (maiores coeficientes angulares) e necessitaram de menor volume para atingir maior altura. Com exceção do tratamento com 57% de reposição hídrica (D₁) utilizando T₁ e T₃, o nível de sombreamento C₄ proporcionou crescimento de mudas com o padrão de expedição recomendado para as espécies de 30 cm de altura e 3 mm de diâmetro (BUENO et al., 2021). O sucesso da restauração florestal depende do plantio de mudas de qualidade e com grande potencial de crescimento (GROSSNICKLE e MACDONALD, 2018). Assim, o Índice de

Qualidade de Dickson (IDA) torna-se um critério de avaliação de mudas, relacionando parâmetros morfológicos de altura, diâmetro e biomassa vegetal, sendo que valores maiores desse índice indicam mudas com melhor qualidade na época do plantio. A Figura 13 apresenta os valores de IQD das mudas em função do volume aplicado a cada tipo de água.

Os maiores índices foram obtidos em C₁, com valores superiores às demais coberturas em todos os volumes aplicados com T₁ e T₂, exceto na condição de maior déficit (D₁), quando foi utilizado T₃. Em ambiente sem sombreamento, as mudas atingiram IQD médio de 0,22 em C₁, variando de 0,25 a 0,47 em C₂ e de 0,13 a 0,27 em C₃. Os piores índices foram obtidos em C₄ para mudas irrigadas com T₁ e T₃, variando de 0,07 a 0,10 e 0,08 a 0,11, respectivamente, e em T₂ nas coberturas intermediárias (C₂ e C₃), com IQD médio de 0,07 em ambos os casos.

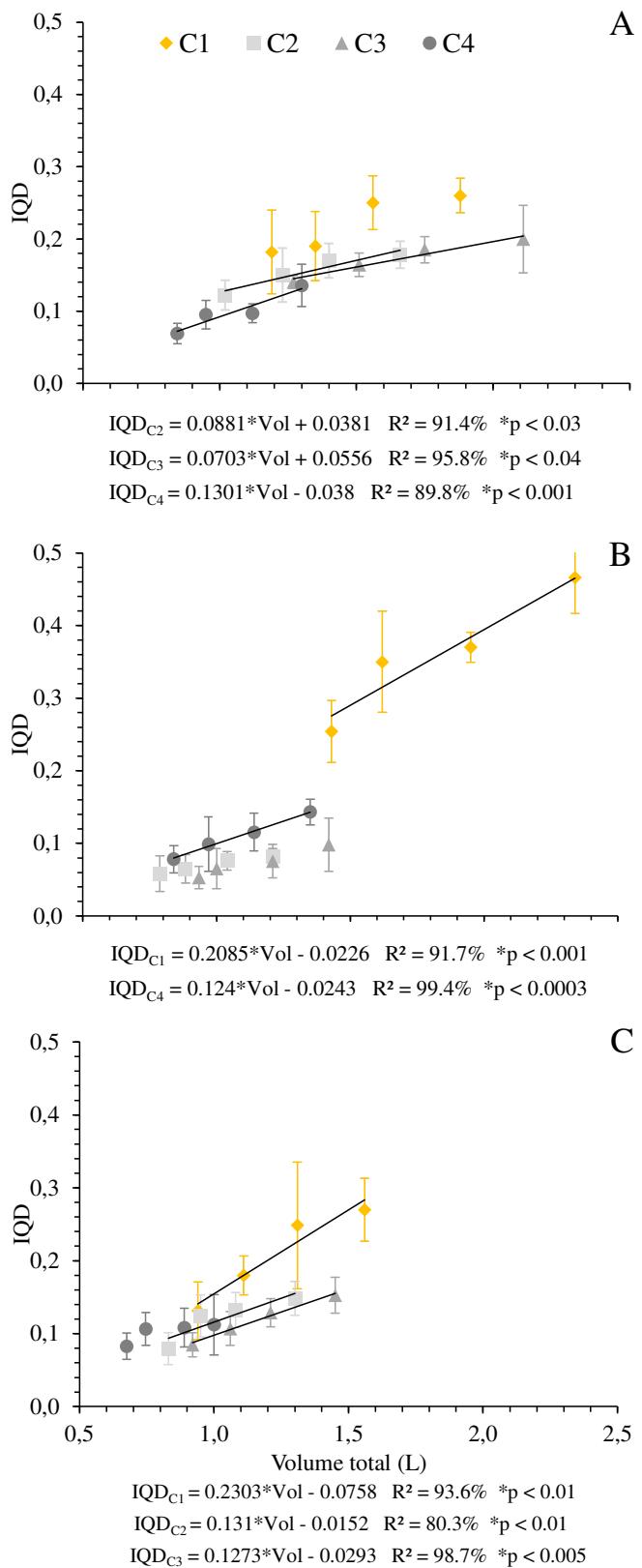


Figura 13. Índice de Qualidade de Dickson em relação ao volume total recebido por planta.

Os pontos representam as quatro lâminas aplicadas, ajustes foram feitos com valores médios alcançados em cada regime hídrico. A (T1: áqua controle), B (T2: ARB tratada 1h) e C (T3 ARB tratada 2h).

A Figura 14 apresenta os valores de produtividade de água (PAi) obtidos para os diferentes níveis de reposição e sombreamento, para os três tipos de água utilizados. A produtividade da água é um parâmetro que relaciona o quanto de água a planta utilizou para atingir a biomassa produzida (g L^{-1}) e, por isso, destacam-se os valores obtidos em T₂ pelas mudas cultivadas em ambiente sem sombra (C₁) (Figura 14C), sendo superiores estatisticamente em D₁, D₂ e D₄, alcançando 3,8 g L^{-1} no volume 100%.

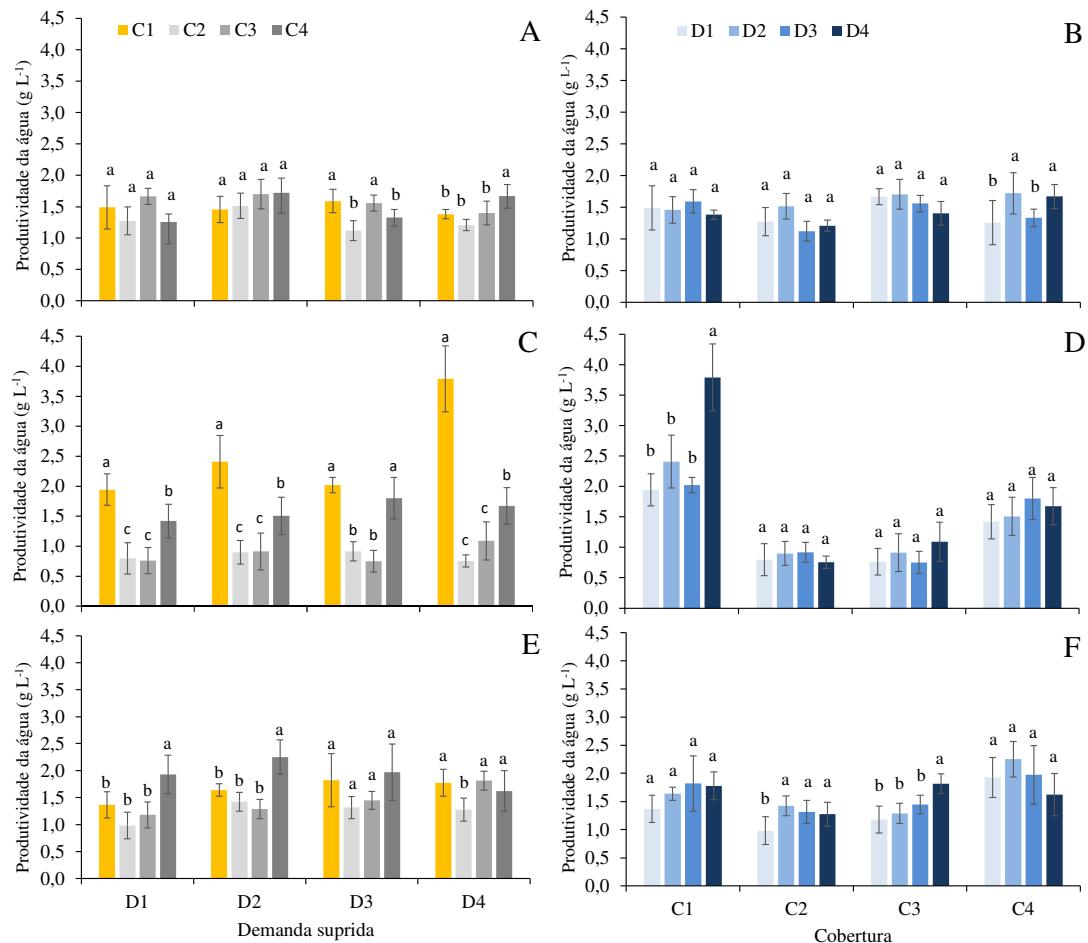


Figura 14. Produtividade da água (g L^{-1}). Análise realizada comparando os valores alcançados em cada lâmina entre as coberturas (a esquerda) e comparando as lâminas dentro de cada cobertura (a direita), nos tipos de água A e B (T₁: água controle), C e D (T₂: ARB tratada 1h) e E e F (T₃ ARB tratada 2h). * $p < 0,05$.

Em T₁, não houve diferenciação estatística nos dois menores volumes aplicados (D₁ e D₂), sendo a C₄ mais eficiente na conversão quando o volume total exigido pela planta foi suprido. As mudas irrigadas com T₃ (Figura 14E e 14F) tiveram melhor desempenho que T₁ em valores absolutos, com as mudas conduzidas em C₄ se sobressaindo das demais. Os resultados usando T₁ (Figura 14A e 14B) foram superiores aos obtidos por Bueno et al. (2021), não superando apenas os valores encontrados na C₂.

3.6 DISCUSSÃO

No período de 21 a 40 DAE, houve poucos acionamentos do sistema de irrigação e a quantidade de chuva foi suficiente para suprir a necessidade hídrica das mudas. Por outro lado, 67% das ativações ocorreram nos dois últimos períodos de avaliação (83-103; 104-122), correspondendo a mais de 58% do volume de água aplicado. A ativação do sistema de irrigação foi mais frequente em C₁, com 61, 72 e 41 vezes em T₁, T₂ e T₃, respectivamente, enquanto no maior nível de sombreamento (C₄), as ativações ocorreram apenas 29, 30 e 27 vezes (Figura 10). As plantas cultivadas com T₂ a descoberto (C₁) foram irrigadas em mais da metade dos dias experimentais (57 dias), seguidas pelas plantas cultivadas com T₁, nas coberturas C₁ (50 dias) e C₃ (43 dias). Houve dias com mais de uma ativação, que geralmente aumentou ao longo dos períodos de avaliação em resposta tanto ao crescimento das mudas quanto ao aumento da demanda evaporativa atmosférica (ET₀).

Os maiores volumes de água aplicados em cada experimento foram 2.342 L planta⁻¹ em T₂ C₁, 2.114 L planta⁻¹ em T₁ C₃ e 1.556 L planta⁻¹ em T₃ C₁. Esses volumes são inferiores aos descritos por Bueno et al. (2021) que, utilizando água controle (T₁), avaliou o crescimento de mudas de *Dalbergia nigra* por 115 dias, para uma ET₀ média de 3,8 mm dia⁻¹, 28% superior ao observado no presente estudo (3,0 mm dia⁻¹). Os valores encontrados em ambos os estudos mostram a precisão do manejo da irrigação realizado pelo AAI (MEDICI et al., 2010), pois a demanda da planta é atendida de acordo com as condições meteorológicas locais.

Maiores valores de crescimento em diâmetro do coleto foram obtidos para as mudas conduzidas em C₁ (Figura 11). Em condições não sombreadas, as mudas podem optar por translocar os fotoassimilados para o caule para melhor se estabelecerem em condições adversas. Este comportamento também foi observado em outras espécies de árvores, com o *Cunninghamia lanceolata* (LIU et al., 2018) e o *Quercus insignis* (MONTES-HERNÁNDEZ e LÓPEZ-BARRERA, 2013). Por outro lado, em situações de menor luminosidade (C₃ e C₄) observou-se alta relação H/D, indicando o estiolamento das mudas como resposta fisiológica ao sombreamento (GRIME, 2006).

Quando irrigadas com T₂, as mudas apresentaram menor crescimento em H e D nas coberturas intermediárias (C₂ e C₃). A alta concentração de matéria orgânica na água de irrigação favoreceu a formação de crostas (biofilme) na superfície dos tubos, criando uma barreira física para a evaporação e infiltração da água no substrato (ROSSI et al., 2017). De fato, a menor oferta de água e nutrientes pode ter prejudicado o crescimento das plantas nesse período.

Os maiores volumes de água aplicados às mudas de *Dalbergia nigra* foram observados nos níveis de sombreamento C₃ e C₁, em T₁ e T₂, respectivamente, contribuindo para o alcance do padrão de expedição desejado. Quando irrigadas com T₃, as mudas conduzidas em C₁ demandaram o maior volume de água, porém não refletindo no crescimento, pois a altura mínima recomendada (30 cm) foi alcançada apenas com os emissores de maior vazão (D₄). Nota-se também que em T₃C₁, o diâmetro das mudas foi visivelmente maior do que nas condições de sombreamento (C₂, C₃ e C₄), reforçando a teoria de que para espécies com crescimento secundário, a estratégia de sobrevivência em plena luz é a rápida fixação e sobrevivência, investindo em altura somente após sua implantação. Ainda na Figura 11, pode-se observar que as plantas que receberam menos água demoraram mais para atingir o padrão de expedição desejado. Para Bueno et al. (2021), a produção de mudas de qualidade em menor tempo é um fator importante na tomada de decisão, mas outros aspectos precisam ser considerados, como a eficiência no uso de água e energia, integrando organicamente preceitos sociais, ambientais e econômicos da produção sustentável.

De modo geral, foram produzidas mudas de melhor qualidade (IQD) com T₂ (Figura 13B), cuja concentração de nutrientes favoreceu especialmente o crescimento em diâmetro (Figura 12D) e, consequentemente, o acúmulo de matéria seca. Usando ARB, Silva et al. (2022) constataram que a menor exposição à ozonização promoveu maiores concentrações de P, N e matéria orgânica, o que constitui resultados interessantes para o uso agrícola do O₃ como potencializador da fertilidade do substrato. Vale ressaltar que o sucesso da restauração florestal depende do plantio de mudas de qualidade e com grande potencial de crescimento (GROSSNICKLE e MACDONALD, 2018). Assim, o IQD passa a ser um critério de avaliação de mudas, relacionando parâmetros morfológicos de altura, diâmetro e biomassa vegetal, e valores maiores deste índice indicam mudas com melhor qualidade no momento do plantio.

As mudas tiveram melhor conversão (PAi) em C₁, para valores absolutos, para déficit hídrico de 16,7% (D₃), quando irrigadas com T₁ e T₃. Em T₁, vale destacar os valores alcançados pelas mudas quando irrigadas com D₂, que em nenhum nível de sombreamento diferiu estatisticamente de D₄ (Figura 12A e 12B). Portanto, quando irrigadas com água do abastecimento local, as mudas de *Dalbergia nigra* podem ser eficientes no uso da água mesmo que suas necessidades não sejam 100% atendidas (Figura 12B). Este achado também está presente em T₂, para mudas cultivadas em algum nível de sombra (C₂, C₃ e C₄) (Figura 12D) e em T₃ especialmente para mudas cultivadas em C₁ e C₄ (Figura 12E).

Além da melhor qualidade, os maiores valores de PAi também foram obtidos com o T₂, mesmo em condição de maior déficit, sendo superiores aos relatados por Keffer et al. (2019) (1,92 g L⁻¹) em mudas de ipê amarelo da Amazônia, e por Borella et al. (2020) (1,43 g L⁻¹) para *Dipteryx alata* Vogel (Baru), sob diferentes condições de luminosidade. Embora sejam outras espécies, Bueno et al. (2021) apontam que o PAi não está relacionado apenas à espécie, mas também ao ambiente de crescimento inicial, que influencia a demanda hídrica para mudas. Assim, a busca pelo aumento do PAi em viveiros florestais deve ser estimulada, e pode ser alcançada com manejo adequado da irrigação associado ao uso de ARB tratado.

3.7 CONCLUSÕES

No Brasil, os sistemas de produção de mudas em viveiros florestais não utilizam técnicas de manejo de irrigação e, por desconhecimento de suas necessidades hídricas, diversas espécies são produzidas com aplicação excessiva de água. Associado à falta de gestão, o uso de águas residuárias também não tem sido aproveitado pelos viveiros. Neste trabalho, avaliou-se o uso de ARB tratada na irrigação de mudas de *Dalbergia nigra* com diferentes níveis de irrigação e sombreamento. Os resultados deste trabalho confirmam nossa primeira hipótese de que o crescimento de *Dalbergia nigra* não é prejudicado com o uso de ARB tratada na irrigação, ao contrário, o uso de T₂ favoreceu o crescimento das mudas quando conduzido em ambiente sem sombra e T₃ quando conduzido em maior sombreamento níveis. As mudas responderam bem aos níveis de sombreamento, principalmente em altura, onde as amostras realizadas em C₄ foram superiores às demais, independentemente do tipo de água utilizada.

Quando avaliado separadamente, o IQD foi maior em mudas de *Dalbergia nigra* cultivadas em ambiente sem sombra, pois a robustez desejada pela planta depende da relação entre altura, diâmetro e biomassa produzida. Os volumes de 2.342 L planta⁻¹ em T₂ C₁, 2.114 L planta⁻¹ em T₁ C₃ e 1.556 L planta⁻¹ em T₃ C₁ podem ser usados como referência para produção de mudas em viveiros comerciais, considerando as mesmas condições ambientais. Maiores valores de produtividade de água foram obtidos com ARB tratada, com mudas de *Dalbergia nigra* atingindo 3,8 g L⁻¹ em volume 100% de conversão para T₂ C₁. Os déficits aplicados não impediram o crescimento das mudas de *Dalbergia nigra*, contrariando a hipótese levantada inicialmente e, em algumas situações, levaram a um melhor aproveitamento da água pela planta do que quando foi aplicada a demanda total de água.

3.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements – FAO. **Irrigation and drainage paper 56.** 1998.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; MORAES, J. L. G.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22: 711-728. 2013.
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: **Relatório Pleno.** Brasília, Brasil. 2022.
- BALLESTRERI, A. A.; ARAUJO, M. M.; AIMI, S. C.; NASCIMENTO, N. F.; BERGHETTI, A. L. P.; GASPARIN, E.; TABALDI, L. A.; ZAVISTANOVICZ, T. C. Morphophysiological responses of forest tree species conducted under different levels of shading in the enrichment of degraded ecosystem. **Forest Ecology and Management** 488: 119032. 2021.
- BEZERRA, A. C. M.; VALENÇA, D. C.; CARVALHO, D. F.; PINHO, C. F.; REINERT, F.; GOMES, D. P.; GABETTO, F. P.; AZEVEDO, R. A.; MASSERONI, D.; MEDICI, L. O. Automation of lettuce seedlings irrigation with sensors deployed in the substrate or at the atmosphere. **Scientia Agricola** 76: 179-189. 2019.
- BORELLA, D. R.; SOUZA, A. P.; SILVA, A. C.; PIZZATTO, M.; KEFFER, J. F.; LIMA, D. C. Water requirement of *Dipteryx alata* Vogue seedlings at different solar radiation levels in Cerrado-Amazon transition. **Tropical and Subtropical Agrosystems** 23: 1-13. 2020.
- BRASIL. Resolução Nº 498, de 19 de agosto de 2020. Available from: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/CONAMA/RE0458-160713.pdf>. 2020.
- BUENO, M. M., LELES, P. S. S.; ABREU, J. F.G.; SANTOS, J. J. S.; CARVALHO, D. F. Water requirement and growth indicators of forest tree species seedlings produced with automated irrigation management. **PLOS ONE** 15: e0238677. 2020.
- BUENO, M. M.; LELES, P. S. S.; PINTO, M.F.; RESENDE, A.S.; COUTO, B.R.M.; CARVALHO, D.F. Water use in the growth of atlantic forest tree species seedlings under different shading levels. **Ciência e Agrotecnologia** 45: e025220. 2021.
- CARVALHO, D.F.; BUENO, M. M.; LELES, P. S. S.; ABREU, J. F. G.; MARTINS, R. C. F.; MEDICI, L.O. Production and initial growth of forest species seedlings using sewage sludge and automated irrigation. **Ciência e Agrotecnologia** 45: e017321. 2021.
- CRUZ, E. S.; MEDICI, L. O.; LELES P. S. S.; AMBROZIM, C. S.; SOUZA W. L.; CARVALHO, D. F. Growth of black pepper plantlets under different substrates and irrigation levels. **Scientia Agricola** 79: e20200094. 2022.
- DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forestry Chronicle**. 36: 10-13. 1960.
- GABIRA, M.; SILVA, R.; BORTOLHEIRO, F.; MATEUS, C.; VILLAS BOAS, R.; ROSSI, S.; GIRONA, M.; SILVA, M. R.; Composted sewage sludge as an alternative substrate for forest seedlings production. **IForest** 14: 569-575. 2021.
- GOMES, D. P.; CARVALHO, D. F.; PINTO, M. F.; VALENÇA, D. D. C.; MEDICI, L. O. Growth and production of tomato fertilized with ash and castor cake and under varying water depths, cultivated in organic potponics. **Acta Scientiarum Agronomy** 39: 201-209. 2017.

GRIME, J. P. Plant Strategies, Vegetation Processes, and Ecosystem Properties. **John Wiley & Sons**. 2006.

GROSSNICKLE, S. C.; MACDONALD, J. E. Why seedlings grow: influence of plant attributes. **New Forest** 49: 1-34. 2018.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Contas Econômicas Ambientais da Água**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2020.

KEFFER, J. F.; SILVA, C. C.; SOUZA, A. P.; SILVA, A. C.; BOUVIÉ, L.; DIAS, T. K. R. Evapotranspiration and water sensitivity of Amazonian yellow ipe seedlings under different shading conditions. **Ver. Bras. de Engenharia Agrícola e Ambiental** 23: 733-740. 2019.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle Irrigation Design Parameters. **Trans. ASAE** 17: 0678-0684. 1974.

LI, M.; CAO, X.; LIU, D.; FU, Q.; LI, T.; SHANG, R. Sustainable management of agricultural water and land resources under changing climate and socio-economic conditions: A multi-dimensional optimization approach. **Agricultural Water Management** 259: 107235. 2022.

LIMA, P.M.; MORAIS, F.; CONSTANTINO, M.A.; PAULO, P.L.; MAGALHÃES FILHO, F.J.C. Environmental assessment of waste handling in rural Brazil: Improvements towards circular economy. **Cleaner Environment System** 2: 100013. 2021.

LIU, B.; LIU, Q.; DARYANTO, S. GUO, S.; HUANG, Z.; WANG, Z.; WANG, L.; MA, Z.. Responses of Chinese fir and Schima superba seedlings to light gradients: Implications for the restoration of mixed broadleaf-conifer forests from Chinese fir monocultures. **Forest Ecology Management** 419-420: 51-57. 2018.

LUBELLO, C.; GORI, R.; NICESE, F.P.; FERRINI, F. Municipal-treated wastewater reuse for plant nurseries irrigation. **Water Research** 38: 2939-2947. 2004.

MARTINELLI, G.; MORAES, M. A.; **Livro vermelho da flora do Brasil**. - 1. ed. - Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 1100 p. 2013.

MEDICI, L. O.; ROCHA, H. S.; CARVALHO, D. F.; PIMENTEL, C.; AZEVEDO, R. A. Automatic controller to water plants. **Scientia Agricola** 67: 727-730. 2010.

MONTES-HERNÁNDEZ, B.; LÓPEZ-BARRERA, F. Seedling establishment of Quercus insignis: A critically endangered oak tree species in southern Mexico. **Forest Ecology Management** 310: 927-934. 2013.

PIERIK, R.; BALLARÉ, C. L. Control of Plant Growth and Defense by Photoreceptors: From Mechanisms to Opportunities in Agriculture. **Molecular Plant** 14: 61-76. 2021.

R CORE TEAM. R: The R Project for Statistical Computing. Available from: <https://www.r-project.org/>. 2022

ROSSI, F.; LI, H.; LIU, Y.; PHILIPPIS R. Cyanobacterial inoculation (cyanobacterisation): Perspectives for the development of a standardized multifunctional technology for soil fertilization and desertification reversal. **Earth-Science Reviews** 171: 28-43. 2017.

SALGOT, M.; FOLCH, M. Wastewater treatment and water reuse. **Current Opinion in Environmental Science & Health** 2: 64-74. 2018.

SANTOS, J. J. S.; PÊGO, R. G.; COUTO, B. R. M.; BUENO, M. M.; CARVALHO, D. F. Evaluation of water requirement, commercial quality, and yield response factor of gladiolus produced with automated irrigation in different growing periods. **Ciência e Agrotecnologia** 44: e017220. 2020.

SANTOS, A. R.; GONÇALVES, E. O.; SILVA JÚNIOR, L.; GIBSON, E. L.; ARAÚJO, E. F.; MIRANDA, F. D.; CALDEIRA, M. V. W. Diversity and genetic structure in a mini-garden of *Dalbergia nigra*: A tree threatened with extinction in the Atlantic Forest. **Plant Gene** 27: 100304. 2021.

SILVA, L. O.; MENDONÇA, H. V.; CONFORTO, B. A. A. F; PINTO, M. F.; CARVALHO, D. F. Production of forest seedlings using sewage sludge and automated irrigation with ozonated cattle wastewater. **PLOS ONE** 17: e0276633. 2022.

SIPPEL, S.; REICHSTEIN, M.; MA, X.; MAHECHA, M. D.; LANGE, H.; FLACH, M. Drought, Heat, and the Carbon Cycle: a Review. **Current Climate Change Reports** 4: 266-86. 2018.

SOUZA, D. S.; MACIEL, A. M.; OTENIO, M. H.; MENDONÇA, H. V. Optimization of Ozone Application in Post-Treatment of Cattle Wastewater from Organic Farms. **Water, Air, & Soil Pollution** 231: 362. 2020.

SOUZA, D. S.; VALADÃO, R. C.; SOUZA, E. R. P.; BARBOSA, M. I. M. J.; MENDONÇA, H.V. Enhanced *Arthrospira platensis* Biomass Production Combined with Anaerobic Cattle Wastewater Bioremediation. **BioEnergy Research**, 15: 412-425. 2021.

4. CAPÍTULO III

**CRESCIMENTO INICIAL EM VIVEIRO E EM CAMPO DE MUDAS DE
ESPÉCIES ARBÓREAS DA MATA ATLÂNTICA SOB DIFERENTES
NÍVEIS DE SOMBREAMENTO E MANEJO AUTOMÁTICO DE
IRRIGAÇÃO**

4.1 RESUMO

A produção de mudas de alta qualidade pode ser uma estratégia eficaz na restauração de áreas degradadas e na redução da emissão de gases de efeito estufa. Além disso, o aproveitamento de biossólidos como substrato de mudas contribui para mitigar os impactos das mudanças climáticas e é considerado uma tecnologia sustentável para minimizar passivos ambientais. O estudo avaliou o uso da água no crescimento de mudas de *Cariniana estrellensis* e *Gallesia integrifolia* em quatro níveis de sombreamento (0% - C₁, 37,6% - C₂, 49,4% - C₃ e 75,8% C₄). De novembro/21 a março/22, a altura, o diâmetro do coletor, a área foliar e a biomassa das mudas foram avaliados, assim como o índice de qualidade de Dickson (IQD). As mudas foram produzidas em tubetes de 280 cm³ preenchidos com biossólido puro e irrigadas por gotejamento com sistema automático de acionamento. Considerando a água proveniente da chuva e a irrigação suplementar, as mudas de *C. estrellensis* receberam, em média, 3,94; 3,60; 3,37 e 2,97 L planta⁻¹, enquanto as de *G. integrifolia* receberam 3,83; 3,63; 3,99 e 3,31 L planta⁻¹, para C₁, C₂, C₃ e C₄, respectivamente, durante o ciclo de 103 dias. Independente da espécie os maiores valores de IQD foram encontrados nas mudas produzidas com maior volume de água. As mudas de *C. estrellensis* cultivadas com sombreamento de 49,4 e 75,8% apresentaram maior crescimento na fase de viveiro. Quando transplantadas em campo após um ano de monitoramento alcançaram, em média, alturas de 76 e 72,3 cm, respectivamente. As mudas de *G. integrifolia* produzidas sob sombreamento de 49,4% apresentaram maior desempenho em altura e diâmetro durante a fase de viveiro e melhor adaptação (sobrevivência) após o transplante.

Palavras-chave: Restauração florestal. Viveiros florestais. Uso da água. Crescimento de plantas.

4.2 ABSTRACT

The production of high-quality seedlings can be an effective strategy for restoring degraded areas and reducing greenhouse gas emissions. Furthermore, the use of biosolids as seedling substrate contributes to mitigating the impacts of climate change and is considered a sustainable technology to minimize environmental liabilities. The study evaluated the use of water in the growth of seedlings of *Cariniana estrellensis* and *Gallesia integrifolia* in four shading levels (0% - C1, 37.6% - C2, 49.4% - C3 and 75.8% C4). From November/21 to March/22, height, stem diameter, leaf area and seedling biomass were evaluated, as well as the Dickson Quality Index (DQI). The seedlings were produced in 280 cm³ tubes filled with pure biosolids and irrigated by drip with an automatic activation system. Considering the water from rain and supplementary irrigation, the *C. estrellensis* seedlings received, on average, 3.94; 3.60; 3.37 and 2.97 L plant-1, while those of *G. integrifolia* received 3.83; 3.63; 3.99 and 3.31 L plant-1, for C1, C2, C3 and C4, respectively, during the 103-day cycle. Regardless of the species, the highest IQD values were found in seedlings produced with a greater volume of water. *C. estrellensis* seedlings grown with shade of 49.4 and 75.8% showed greater growth in the nursery phase. When transplanted in the field after one year of monitoring, they reached, on average, heights of 76 and 72.3 cm, respectively. *G. integrifolia* seedlings produced under 49.4% shading showed greater performance in height and diameter during the nursery phase and better adaptation (survival) after transplanting.

Keywords: Forest restoration. Forest nurseries. Water use. Plant growth.

4.3 INTRODUÇÃO

Nos países em desenvolvimento, o desmatamento e a degradação florestal são as principais fontes de emissão de gases de efeito estufa (PEARSON et al., 2017). De acordo com Matthews et al. (2014), a contribuição histórica do Brasil para o aquecimento global, decorrente da mudança do uso da terra, é estimada em 0,032 °C, considerado o quarto país com maior contribuição. Nesse sentido, investir em técnicas mais sustentáveis de produção de mudas de qualidade pode ser uma estratégia eficaz para reduzir a emissão de gases de efeito estufa e promover a restauração de áreas degradadas, contribuindo assim para mitigar os impactos das mudanças climáticas (SILVA et al., 2017; BUSTAMANTE et al., 2019).

A qualidade das mudas de espécies arbóreas interfere na eficiência dos projetos de reflorestamento (MOUSAVIJAD et al., 2023), e é influenciada significativamente pelo ambiente de produção. A máxima expressão do genótipo das espécies cultivadas é dependente dos fatores ambientais aos quais elas são submetidas (ADJI et al., 2022), incluindo o fornecimento de água, a qualidade do substrato usado e os níveis adequados de sombreamento (BUENO et al., 2021; SILVA et al., 2022).

A disponibilidade de água no ambiente radicular é fundamental para o crescimento das plantas e pode induzir alterações em diversos processos fisiológicos e bioquímicos (SIPPEL et al., 2018). No momento em que a redução da disponibilidade e a escassez de água é cada vez mais presente em diferentes regiões do planeta, torna-se indispensável a busca pela eficiência hídrica na produção vegetal (LI et al., 2022). Em viveiros florestais, por exemplo, o uso da água apesar de ser uma preocupação, não possui um manejo adequado, considerando a diversidade de espécies produzidas, resultando em desperdícios significativos. Dumroese et al., (2005) aponta que tais desperdícios podem atingir até 70% do volume aplicado.

Para superar esse desafio, técnicas de aplicação de água devem ser implementadas a fim de atender às necessidades hídricas da espécie. Nesse sentido, o uso da automação no manejo da irrigação pode contribuir para a maximização da eficiência do uso da água, permitindo o fornecimento de água na quantidade e momento adequados (KOECH e LANGAT, 2018). O acionador automático (AAI) proposto por Medici et al. (2010), que opera em resposta à tensão da água no solo, tem sido utilizado com eficiência em vários ambientes (GOMES et al., 2017; MELLO et al., 2018; BUENO et al., 2021; CRUZ et al., 2022; SILVA et al., 2022; TELES et al., 2023), e se destaca por ser de baixo custo e fácil operação.

O substrato é outro fator crítico na produção de mudas. Embora diversas formulações comerciais estejam disponíveis, há uma tendência crescente de reciclar resíduos orgânicos de forma ambientalmente responsável para essa finalidade. O lodo de esgoto, após tratamento e estabilização, recebe o nome de biossólido e tem apresentado grande potencial na formulação de substrato para a produção de mudas florestais (ABREU et al., 2017; MANCA et al., 2020; BUENO et al., 2021; CARVALHO et al., 2021; SILVA et al., 2022). Esse material apresenta boas propriedades físicas, é leve e rico em matéria orgânica e nutrientes (ABREU et al., 2019). Quando destinado à produção de mudas, representa uma alternativa sustentável à disposição em aterros sanitários (MANCA et al., 2020).

Ao planejar o reflorestamento de uma área, é fundamental considerar os fatores ecológicos específicos do local. A seleção cuidadosa das espécies de árvores é crucial para escolher variantes que possam prosperar na região em questão (MOUSAVIJAD et al., 2023). Tem havido um crescente interesse no estudo da interação entre nível de sombreamento e estresse hídrico e seu efeito no crescimento das plantas e na regeneração vegetal (PUÉRTOLAS et al., 2009), sendo especialmente relevante na produção de mudas em viveiros. Bueno et al. (2021) constataram melhor crescimento de mudas de *Dalbergia nigra* e *Apuleia leiocarpa* em viveiro com sombreamentos de 37% e 58%, respectivamente. Em campo, Ballestreri et al. (2021) observaram melhores atributos morfofisiológicos para as

espécies *Casearia sylvestris*, *Cordia americana* e, principalmente, *Eugenea involucrata* em plantios com sombreamento mínimo de 36%. Esses resultados sugerem que a utilização de sombreamento pode ser uma estratégia eficaz para o crescimento saudável de mudas e, consequentemente, no reflorestamento bem-sucedido.

A determinação do nível de luz ideal para cultivar espécies arbóreas é muito importante para os gestores de viveiros, especialmente quando se trata de espécies nativas. O Jequitibá-Branco (*Cariniana estrellensis* (Raddi) Kuntze) e o Pau d’Alho (*Gallesia integrifolia* (Spreng.) Harms) são espécies que pertencem a diferentes grupos sucessionais. De acordo com Poorter et al. (2006), o Jequitibá-Branco é uma espécie pioneira de vida longa tendo como principal característica desse o grupo uma maior tolerância e eficiência no uso de altos níveis de irradiância, como também o estabelecimento inicial mais rápido. O Pau d’Alho se caracteriza como uma espécie secundária precoce (BALESTRIN et al., 2019), esse grupo se estabelece melhor em ambientes já sombreados e são mais exigentes em fertilidade.

A compreensão da sucessão ecológica é fundamental para a conservação e restauração da floresta, uma vez que as espécies de diferentes grupos sucessionais têm necessidades ecológicas diferentes e respondem de maneira distinta às alterações ambientais (HAN et al., 2023). Essa compreensão também pode potencializar a produção de mudas, permitindo a seleção de espécies adequadas para a fase sucessional em que se encontra a área a ser reflorestada.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar a produção de mudas das espécies *Cariniana estrellensis* e *Gallesia integrifolia* utilizando níveis de sombreamento e manejo de irrigação automatizado, e o crescimento das mudas em área de reflorestamento.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

As mudas foram produzidas em uma área experimental na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro ($22^{\circ}46'29.5''S$ e $43^{\circ}41'11.9''W$) durante o período de verão de 2021/2022, totalizando 103 dias. Foram utilizadas sementes de *Cariniana estrellensis* e *Gallesia integrifolia* coletadas de matrizes selecionadas da Mata Atlântica, que foram semeadas diretamente em tubetes de 280 cm^3 preenchidos com bioassólido puro. Os tubetes foram preenchidos com antecedência e molhados diariamente para que houvesse o assentamento do substrato. As mudas foram mantidas em viveiro, cada espécie constituindo experimentos distintos, dispostos em um delineamento em blocos casualizados com quatro repetições, com 10 repetições, sob quatro níveis de luminosidade: pleno sol (C_1) e três níveis de sombreamento (C_2 , C_3 e C_4).

O bioassólido utilizado como substrato para as mudas foi analisado por Silva et al. (2022), de acordo com os procedimentos da Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2020), e apresentou densidade aparente de $0,40\text{ g cm}^{-3}$ e valores médios de macronutrientes de 1,57% Ca, 1,5% N, 0,89% S, 0,61% P, 0,32% Mg, e 0,16% K, além de 9,41% de carbono orgânico e de micronutrientes $20773,3\text{ mg kg}^{-1}$ de Fe, $722,7\text{ mg kg}^{-1}$ de Zn, $184,5\text{ mg kg}^{-1}$ de Mn, $164,3\text{ mg kg}^{-1}$ de Cu e $12,1\text{ mg kg}^{-1}$ de B. Este material foi originado de uma estação de tratamento de esgoto pertencente à CEDAE - Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (ETE – Alegria), de áreas urbanas residenciais e comerciais, e não continha resíduos industriais.

Após a emergência das plântulas e emissão da primeira folha definitiva, realizou-se o desbaste, mantendo apenas a planta mais vigorosa em cada tubete. Com 27 dias após a emergência, quando mediam aproximadamente 5 cm, as mudas de cada espécie foram distribuídas separadamente em bandejas plásticas, com capacidade para 54 tubetes. Dez mudas de cada espécie foram dispostas em duas linhas da bandeja (Figura 15A), constituindo uma repetição do bloco.

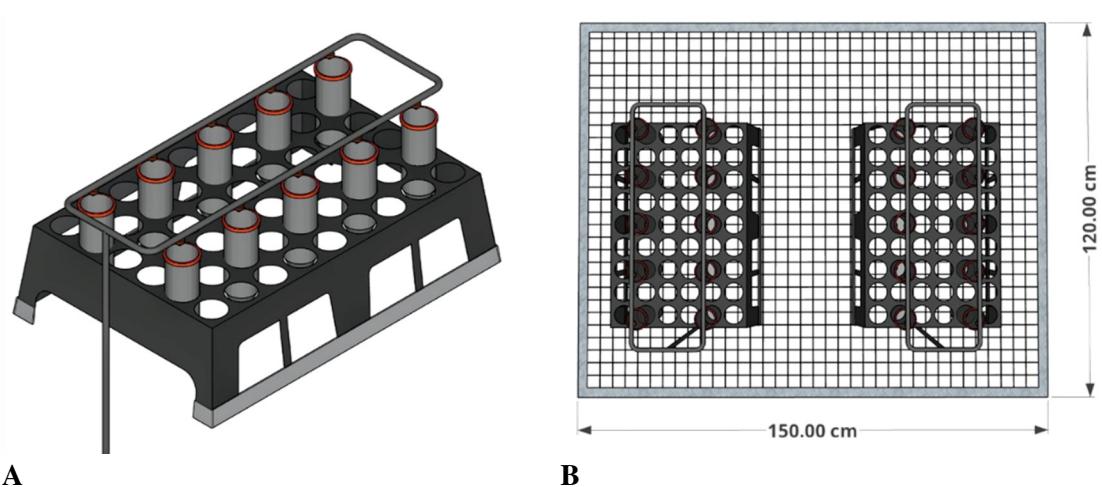


Figura 15. Disposição dos tubetes na bandeja (A) e disposição das bandejas na bancada (B), sendo uma bandeja por espécie.

As bancadas metálicas ($0.8 \times 1.2 \times 1.5\text{ m}$) foram revestidas superior e lateralmente com telas agrícolas poliolefinas comerciais na cor preta (sombrite®), com sombreamento nominal de 35, 50 e 80%. A definição dos tratamentos foi realizada por meio do monitoramento horário da iluminância das coberturas, durante 5 dias consecutivos, utilizando luxímetro digital (modelo LD-400 da Instrutherm). Os valores médios obtidos foram de 67,74

Lux, para a condição de pleno solo, e 41,43; 34,28 e 12,26 Lux, para as bancadas com cobertura. Assim, os tratamentos foram caracterizados, respectivamente, como 0% (C_1), 37,6% (C_2), 49,4% (C_3) e 75,8% (C_4) de redução na intensidade luminosa. A radiação solar e a fotossinteticamente ativa foram medidas com um piranômetro (mod. MP-200, Apogee) e um medidor Quantum (mod. MQ-200, Apogee), respectivamente.

A irrigação das mudas foi realizada com água de abastecimento local utilizando o sistema de irrigação por gotejamento com emissores (Netafim, mod. PCJ-HCNL) de vazão nominal de $1,2 \text{ L h}^{-1}$. Testes de vazão indicaram uniformidade de distribuição superior a 95%, considerada adequada para irrigação por gotejamento (KELLER e KARMELI, 1974). O manejo do sistema foi realizado por meio do acionador automático para irrigação (AAI), proposto por Medici et al. (2010). Esse sistema tem sido utilizado na irrigação de mudas de espécies arbóreas, conforme Bueno et al. (2020, 2021), Carvalho et al. (2021) e Silva et al. (2022). Para cada espécie, foram instalados quatro acionadores independentes, um para cada condição de luminosidade.

Os sensores utilizados no AAI foram confeccionados a partir de vela de filtro comercial, gerando microcápsulas cerâmicas, instaladas verticalmente no substrato a uma profundidade de 5 cm, com desnível de 40 cm em relação ao pressostato, responsável pelo acionamento de cada um dos sistemas de irrigação (SILVA et al., 2022). Quando a tensão de água no substrato atingia, aproximadamente, -4,0 kPa, o sistema era ativado. Neste momento, o pressostato permitia a passagem de corrente elétrica, acionando a bomba e a válvula solenoide (Emicol/12V) correspondentes, liberando a passagem de água para as linhas de distribuição.

Os eventos de irrigação foram monitorados e os tempos de ativação do AAI eram registrados automaticamente em um sistema de coleta e armazenamento de dados composto por uma placa Arduino Mega e um cartão SD (adaptado de BUENO et al., 2021). Para cada irrigação, o sistema foi programado para interromper o fornecimento de água por 1 min a cada 30 s ativado, evitando a percolação de água nos tubetes, principalmente pelo fato da alta porosidade do substrato utilizado ($0,73 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Se a fonte de alimentação do pressostato permanecesse ativa, o sistema de irrigação era ativado novamente, até o suprimento total da demanda das mudas, quando o aumento da tensão da água no substrato interrompia o fornecimento de energia. Para cada espécie arbórea foi utilizada uma bomba de 12 V (NeoSolar SingFlo DP-160), com filtro acoplado, alimentada por dois módulos fotovoltaicos de 130 W (modelo YL140p-17b, Ying Solar) conectados a uma bateria. Para os dois experimentos, portanto, foram utilizadas 2 bombas e 8 válvulas solenoides, correspondentes a cada tratamento avaliado.

Durante o período experimental foi realizado monitoramento meteorológico a partir dos dados registrados na estação do INMET (Ecologia Agrícola – 83741), localizada próxima ao local do experimento (Tabela 5). Adicionalmente, foram instalados pluviômetros nas bancadas sem cobertura e dentro das coberturas de cada espécie para melhor mensurar o efeito das chuvas nos experimentos. A partir dos dados meteorológicos coletados, a evapotranspiração de referência (ET₀) foi estimada diariamente pelo método de Penman-Montheith FAO-56 (ALLEN et al., 1998).

Tabela 5. Temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, ETo média diária e precipitação acumulada nos períodos entre avaliações dos experimentos.

Período (DAE)	T _{Máx.}	T _{Mín.}	UR _{Máx.}	UR _{Mín.}	R _s	E _{To}	P _p t
	----- °C -----	----- % -----	MJ m ⁻² dia ⁻¹	mm dia ⁻¹ mm			
27 - 49	31,1	21,6	90,5	49,9	18,1	4,4	174,9
50 - 63	31,7	22,3	91,1	54,4	19,2	4,5	120,4
64 - 77	33,3	22,9	88,4	44,9	21,7	5,2	74,8
78 - 91	31,0	21,9	90,9	51,5	17,5	4,1	84,2
92 - 105	33,5	22,4	89,9	42,0	21,9	5,1	29,1
106 - 119	35,6	22,3	89,7	34,6	23,9	5,7	34,1
120 - 130	32,2	22,0	87,6	44,5	16,9	4,2	34,8
Total	-	-	-	-	-	491,5	552,2

DAE - Dias após a emergência das plântulas; T_{max} - temperatura máxima; T_{mín} - temperatura mínima; UR_{máx} - umidade relativa máxima; UR_{mín} - umidade relativa mínima; R_s - radiação solar; ETo: evapotranspiração; Ppt: precipitação acumulada no período.

Avaliações de altura (H) e diâmetro (D) das mudas foram realizadas aos 27, 50, 64, 78, 92, 106, 120 e 130 dias após emergência (DAE). Quando 50% das mudas alcançaram o padrão comercial de 30 cm de altura e 3,0 mm de diâmetro do coleto (DAVIDE e BOTELHO, 2015), foram selecionadas três mudas mais próximas da média de cada repetição para a determinação da área foliar (AF), Clorofila a (CloA) usando um clorofilômetro eletrônico (modelo clorofiLOG - CFL1030, Falker Automação Agrícola - Porto Alegre, RS - Brasil), matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca do sistema radicular (MSR) e matéria seca total (MST). As mudas selecionadas foram cortadas, separando-se a parte aérea do sistema radicular, acondicionadas em sacos de papel e mantidas em estufa a 65 °C até atingirem massa constante. A partir dos dados obtidos foram determinados o índice de qualidade de Dickson (IQD) (DICKSON et al., 1960) e a produtividade da água de irrigação (PAi), calculada pela razão entre MST e o volume de água aplicado pela irrigação.

As mudas que não foram utilizadas na análise anterior foram rustificadas e plantadas em uma área reflorestada na UFRRJ, denominada "Bosque do Servidor" (22°45'16" S e 43°41'47" W). Nessa área, a restauração da floresta está em um estágio avançado, com copas formadas e serrapilheira acumulada. Os dados meteorológicos coletados em estação automática do INMET localizada próximo à área de plantio são apresentados na **Tabela 6**. As mudas foram plantadas entre fileiras de árvores presentes no local, em covas abertas manualmente, com dimensões de 30 cm x 30 cm x 30 cm (comprimento x largura x profundidade) e espaçamento de 3,0 m x 5,0 m entre as mudas. O plantio foi realizado em 20/04/2022, com nove repetições por tratamento, e seus dados biométricos iniciais foram registrados. O crescimento em altura e diâmetro dessas plantas foi monitorado aos 60, 150, 240 e 330 dias após o plantio (DAP). Aos 60 e 150 DAP foram identificados ataques de insetos cortadores (gafanhotos) que comprometeram o crescimento das mudas e causaram uma mortalidade de cerca de 40% em ambas as espécies. Apesar disso, foi possível notar a recuperação das mudas sobreviventes nas avaliações seguintes.

Tabela 6. Médias da temperatura do ar, umidade relativa e precipitação acumulada dos períodos entre avaliações das mudas em campo.

Período (DAP)	T _{Máx.}	T _{Mín.}	UR _{Máx.}	UR _{Mín.}	Ppt
	----- ° C -----		----- % -----		(mm)
0-60	22,3	21,1	76,1	70,9	62,8
61-150	22,1	20,8	71,3	65,8	122,4
151-240	23,7	22,7	77,4	72,3	417,0
241-330	26,6	25,4	77,4	71,8	730,4
Total	-	-	-	-	1332,60

DAP - Dias após o plantio das mudas a campo; T_{max} – temperatura máxima; T_{mín} – temperatura mínima; UR_{máx} – umidade relativa máxima; UR_{mín} – umidade relativa mínima; Ppt: precipitação acumulada no período.

Para garantir a validade da análise estatística, os pressupostos de normalidade e homoscedasticidade foram testados para cada conjunto de dados coletados utilizando os testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente, a uma probabilidade de 5%. Durante o período de avaliação das mudas, a diferença entre os períodos de avaliação das variáveis H e D das mudas foram comparadas em cada nível de sombreamento (C₁, C₂, C₃ e C₄). A altura e o diâmetro de mudas em área de restauração florestal foi avaliada entre as coberturas para cada período avaliado.

Para todas as comparações estatísticas, o teste Tukey ($p \leq 0,05$) foi utilizado por meio do software Sisvar (FERREIRA, 2011). Além disso, foi realizada uma análise de regressão para cada espécie, visando ajustar modelos entre as variáveis H, D, clorofila total, área foliar, IQD e produtividade da água com o volume total de água recebido por muda, nos níveis de sombreamento. A análise foi conduzida com uma probabilidade de 5% de significância, utilizando o mesmo software.

4.5 RESULTADOS

O número de acionamentos e os volumes de água aplicados pelo sistema de irrigação, bem como os volumes de chuva em cada nível de sombreamento são apresentados na (Figura 16). Considerando os aportes de água pela chuva e de forma suplementar pela irrigação, as mudas de *C. estrellensis* receberam 3,94 L planta⁻¹; 3,60 L planta⁻¹; 3,37 L planta⁻¹ e 2,97 L planta⁻¹ para C₁, C₂, C₃ e C₄, respectivamente (Figura 16A). Na *G. integrifolia*, os volumes foram de 3,83 L planta⁻¹; 3,63 L planta⁻¹; 3,99 L planta⁻¹ e 3,31 L planta⁻¹, respectivamente (Figura 16B). De um modo geral, a quantidade de água aplicada diminuiu com o aumento do sombreamento, com exceção da C₃ para a *G. integrifolia*. Ao final da avaliação, houve uma mortalidade de 6% para *C. estrellensis* e 4% para *G. integrifolia*, sem relação com cobertura e de forma aleatória. A ETo acumulada foi superior às precipitações acumuladas a partir do quinto período de avaliação (92 DAE), com as maiores lâminas de chuva concentradas no início do monitoramento das mudas (Tabela 5).

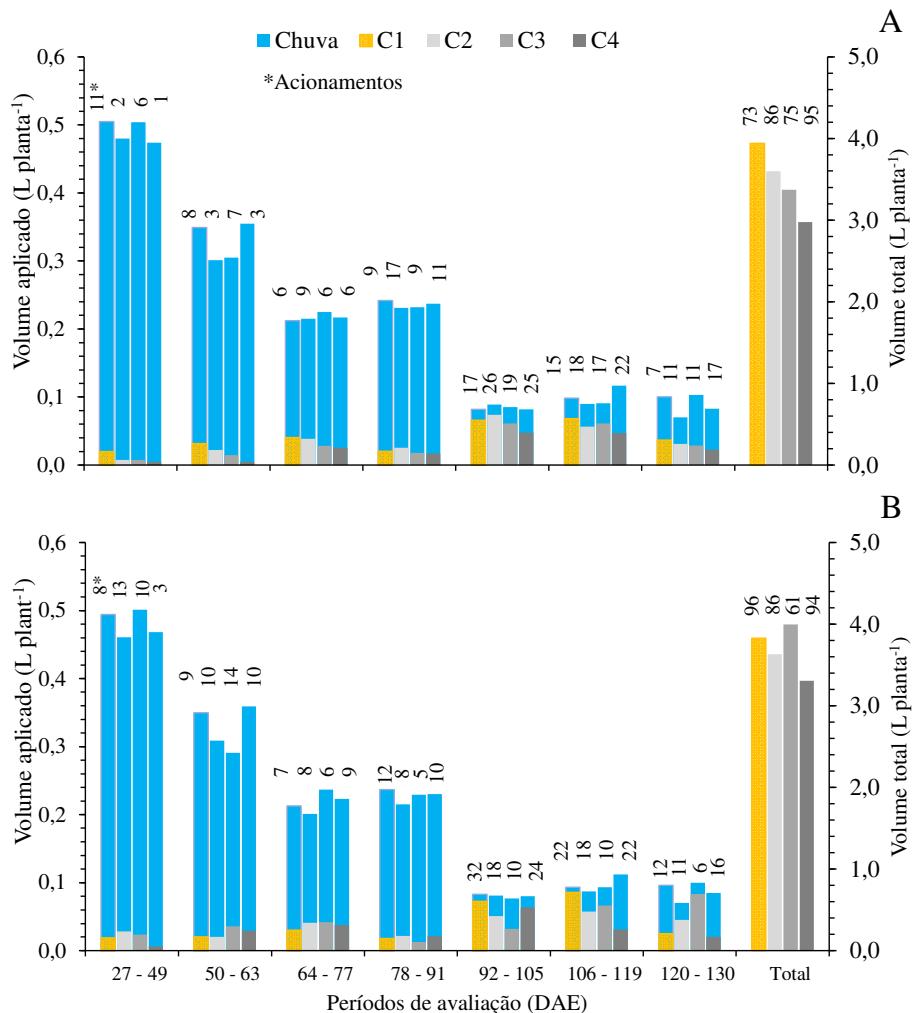


Figura 16. Número de acionamentos e volumes de água aplicados (chuva + irrigação) em mudas de *C. estrellensis* (A) e *G. integrifolia* (B) nas diferentes coberturas de sombreamento C₁ - pleno sol; C₂ - 37,6%; C₃ - 49,4 %; e C₄ - 75,8% de atenuação.

No período de 27-91 DAE houve poucos acionamentos do sistema de irrigação, sendo o aporte de água pela chuva suficiente para atender à necessidade hídrica das mudas (Figura

16). Por outro lado, houve dias com mais de um acionamento que, em geral, aconteceram nos três últimos períodos de avaliação, quando a precipitação foi inferior à demanda atmosférica por vapor (ET₀) (Tabela 5) e com maior crescimento das mudas.

As diferenças de altura e diâmetro das mudas de *C. estrellensis* e *G. integrifolia* entre os períodos de avaliação, nos diferentes níveis de sombreamento, estão apresentadas na Figura 17.

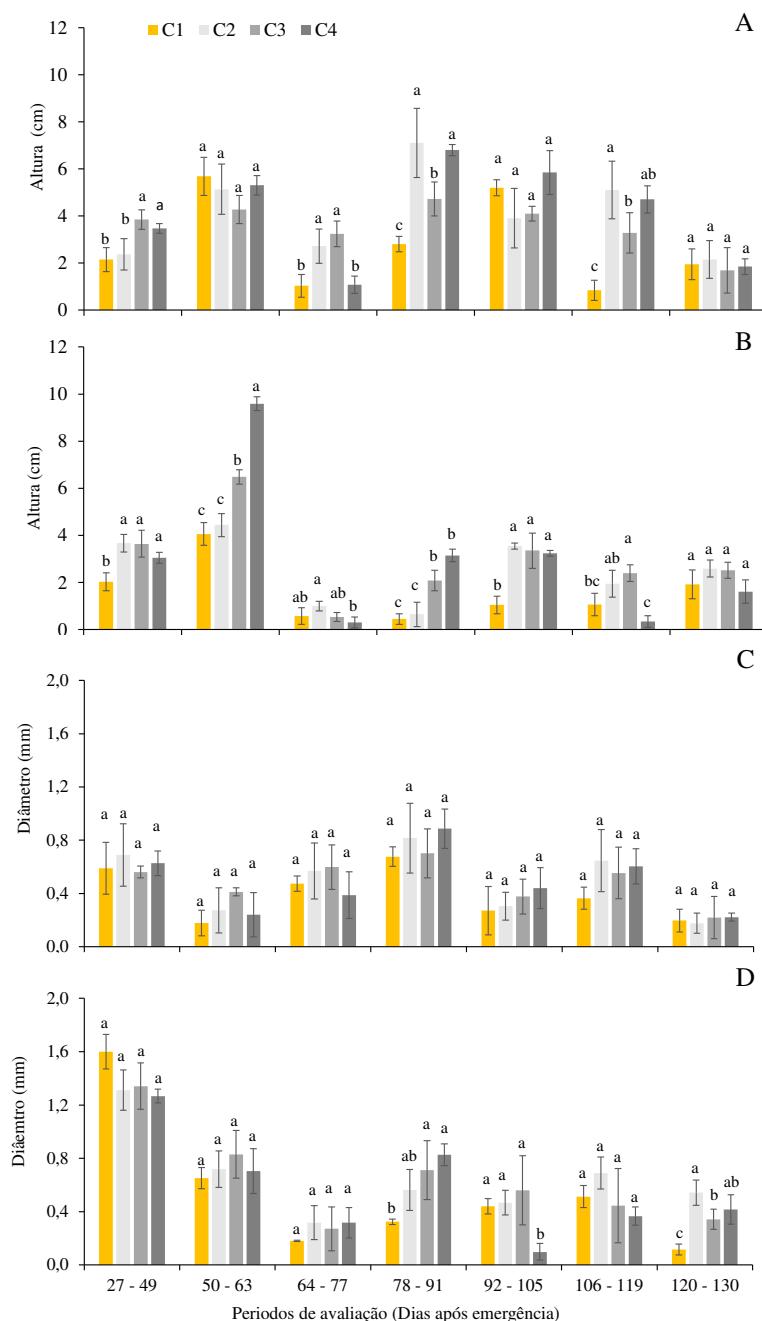


Figura 17. Crescimento em altura e diâmetro, respectivamente, de mudas de *C. estrellensis* (A e C) e *G. integrifolia* (B e D) ao longo do período experimental produzidas a pleno sol (C₁) e nos sombreamentos 37,6% (C₂), 49,4% (C₃) e 75,8% (C₄) aos 130 dias após a emergência (DAE). Significativo a 95% de probabilidade pelo teste t, em cada período.

Para *C. estrellensis*, o crescimento em altura (Figura 17A) foi distribuído ao longo do período experimental, diferentemente das mudas de *G. integrifolia*, que cresceram mais no período inicial, com destaque até os 60 DAE (Figura 17 B). O diâmetro de *C. estrellensis* não apresentou diferença estatística nas condições experimentais. Por outro lado, as mudas de *G. integrifolia* apresentaram maior crescimento em diâmetro na primeira metade do período experimental, destacando-se os primeiros dias do estabelecimento.

Os valores de altura, diâmetro, clorofila a, área foliar, índice de qualidade de Dickson e produtividade da água de irrigação para *C. estrellensis* e *G. integrifolia*, em relação aos níveis de sombreamento estão apresentados na Figura 18.

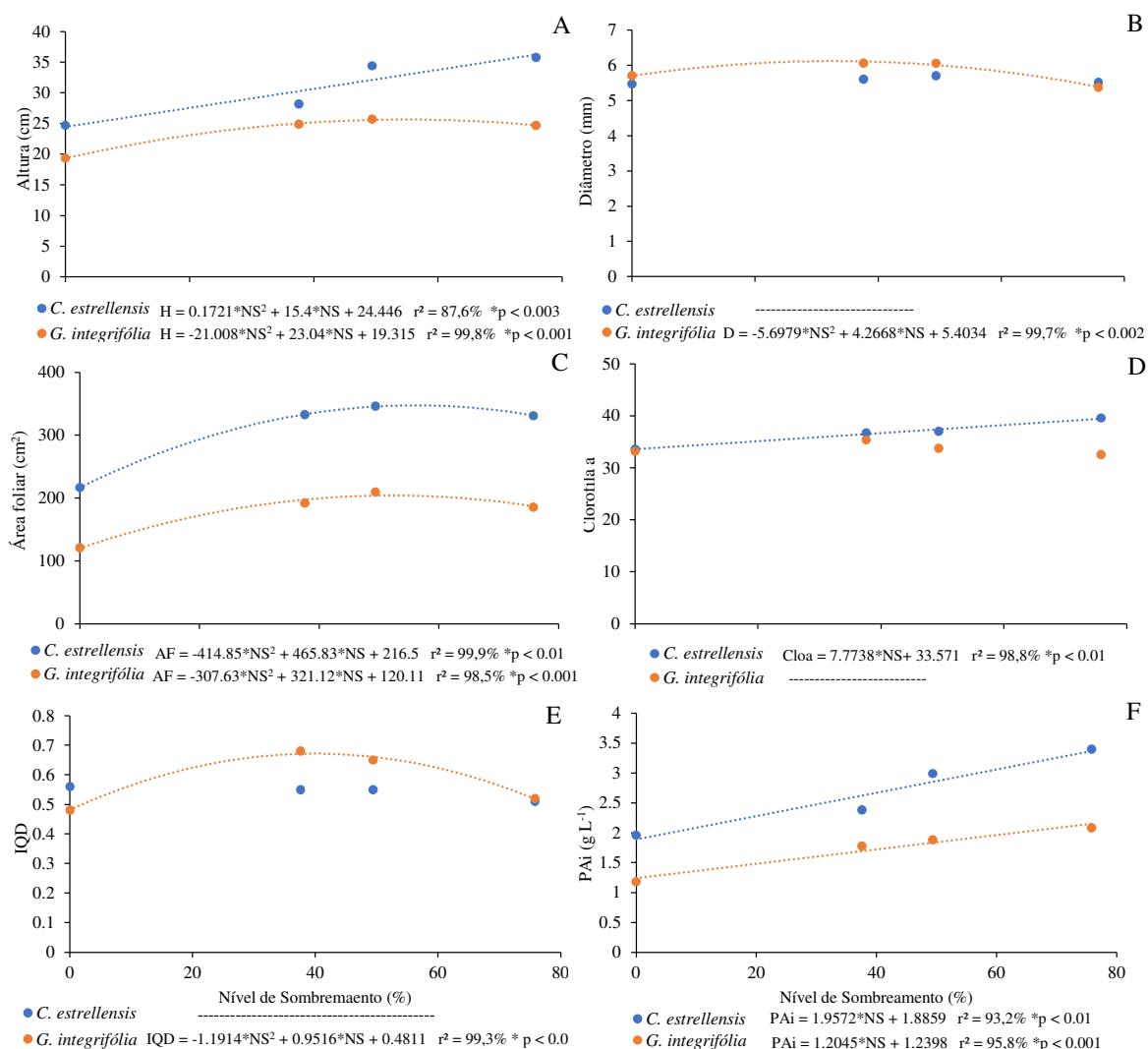


Figura 18. Variação na altura das mudas (A), diâmetro do caule (B), área foliar (C), clorofila a (D), índice de qualidade de Dickson - IQD (E) e produtividade da água de irrigação (F), para *C. estrellensis* e *G. integrifolia* em níveis de sombreamento (NS).

O modelo polinomial quadrático proporcionou o melhor ajuste para a altura, com resposta positiva para *C. estrellensis* e negativa para *G. integrifolia* em relação ao aumento do nível de sombreamento (Figura 18A). Também houve ajuste do modelo polinomial quadrático para o diâmetro (Figura 18B) das mudas de *G. integrifolia*, enquanto para *C. estrellensis* não foi observada variação significativa. Em geral, ambas as espécies apresentaram maior desempenho de crescimento com sombreamento intermediário, entre 35 e 50%.

A área foliar apresentou ajuste para o modelo quadrático para ambas as espécies (Figura 18C). O sombreamento intermediário (50%) produziu mudas com maior área foliar em ambas as espécies, sendo 346 cm² para *C. estrellensis* e 210 cm² para *G. integrifolia*. Não houve variação significativa da clorofila a em relação aos níveis de sombreamento na espécie *G. integrifolia*, porém foi obtido ajuste linear para a espécie *C. estrellensis* (Figura 18D).

A qualidade das mudas, avaliada pelo índice de qualidade de Dickson, apresentou ajuste significativo quadrático com resposta positiva para *G. integrifolia* (Figura 18E). Não houve ajuste significativo para *C. estrellensis*, com variação 0,56 para 0,51. Ademais, constatou-se que a eficiência do uso da água foi significativamente afetada pelos diferentes níveis de sombreamento, exibindo com ajuste linear e crescente para o aumento do nível de sombreamento, para ambas as espécies avaliadas (Figura 18F). Esse resultado reforça a importância do uso de coberturas na redução da perda de água por evaporação para essas espécies, o que resulta em uma utilização mais efetiva desse recurso no substrato.

Os valores de altura e diâmetro de mudas de *C. estrellensis* e *G. integrifolia*, cultivadas em diferentes níveis de sombreamento e plantadas em uma área de restauração florestal na Mata Atlântica são apresentados na Figura 19. As mudas de *C. estrellensis* cultivadas sob os maiores níveis de sombreamento (49,4% e 75,8%) apresentaram maior crescimento na fase de viveiro, e essa tendência foi mantida 330 dias após o plantio na área definitiva, alcançando em média alturas de 76,0 cm e 72,3 cm, respectivamente (Figura 19A). As diferenças entre os níveis de sombreamento foram menos expressivas para o diâmetro, embora as mudas cultivadas a pleno sol tenham apresentado diâmetros estatisticamente inferiores em todos os períodos avaliados, com um crescimento médio de 12% menor em comparação às mudas cultivadas sob maior sombreamento.

As mudas de *G. integrifolia* (Figura 19B) produzidas sob sombreamento de 49,4% apresentaram maiores alturas e diâmetros durante a fase de viveiro e uma melhor sobrevivência e crescimento após o transplantio. Embora tenha sido observado ataque de insetos herbívoros na primeira metade do período de acompanhamento, o que resultou em desfolha e interferência no crescimento, as mudas continuaram a crescer. Após 330 dias, as médias de altura foram de 29,4, 36,5, 43,9 e 41,9 cm e as médias de diâmetro foram de 6,9, 7,2, 7,6 e 7,7 mm com relações H/D de 4,3; 5,1; 5,8; 5,4 para as mudas produzidas em C₁, C₂, C₃ e C₄, respectivamente.

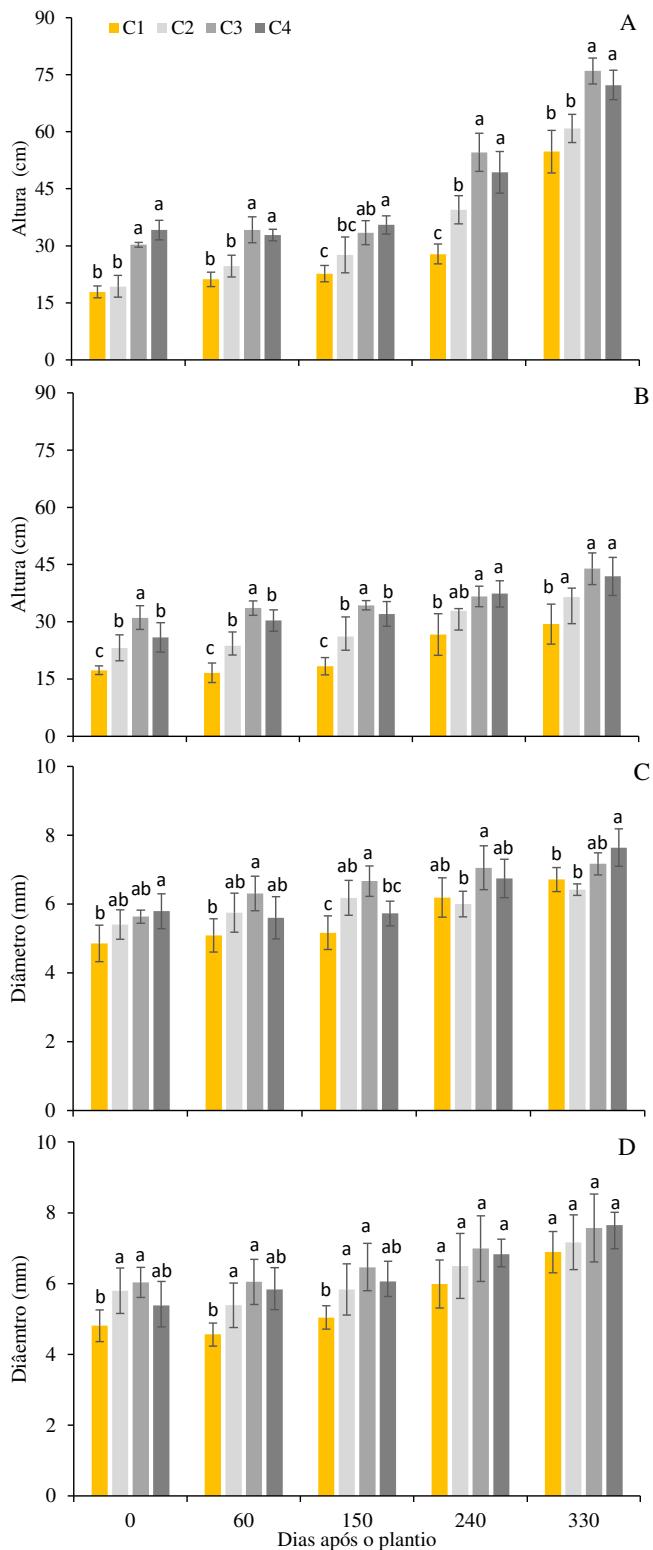


Figura 19. Crescimento em altura e diâmetro de mudas de *C. estrellensis* (A) e *G. integrifolia* (B) plantadas em área de restauração florestal da Mata Atlântica, produzidas em viveiro em pleno sol (C1) e nos sombreamentos 37,6% (C2), 49,4% (C3) e 75,8% (C4). Médias seguidas na coluna pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

4.6 DISCUSSÃO

O uso de sombreamento artificial proporcionou efeito positivo no crescimento em altura das espécies avaliadas. As mudas de *C. estrellensis* tiveram um crescimento inferior em relação às de *G. integrifolia* sob as condições de pleno sol (C₁), o que pode ser justificado pela preferência das espécies pioneiras, como a *G. integrifolia*, por condições de maior luminosidade.

As mudas foram produzidas no verão e, apesar das altas temperaturas na região, as chuvas que ocorrem no período podem satisfazer, em parte, a necessidade hídrica das espécies, proporcionando economia de água nos viveiros. O uso do AAI no manejo do sistema de irrigação proporcionou resultados interessantes, que demonstram sua sensibilidade aos eventos de chuva, e promove aplicação de água às plantas apenas quando necessário. Apesar da ocorrência de chuva, um maior número de acionamentos foi registrado durante este estudo de verão em comparação aos realizados no período de outono/inverno, pois a ocorrência de altas temperaturas favorece maior demanda por água.

Durante o período de inverno, Bueno et al. (2021) registraram, em média, 49, 49 e 51 acionamentos, respectivamente, na produção de mudas das espécies *Dalbergia nigra*, *Apuleia leiocarpa* e *Hymenaea corbaril*, utilizando metodologia semelhante. Utilizando águas resíduárias de bovinocultura para irrigação de mudas de *Dalbergia nigra*, Silva et al. (2022) registraram de 38 a 61 acionamentos, corroborando com a ideia apresentada de que a frequência de acionamento da irrigação influencia no crescimento das espécies estudadas. É importante destacar que as mudas que cresceram em tratamentos com maior número de acionamentos alcançaram resultados melhores nos parâmetros avaliados, o que reforça a importância de um manejo adequado da irrigação para o desenvolvimento das espécies.

De acordo com Gogosz e Boeger (2019), as espécies secundárias apresentam um crescimento inicial mais lento devido à dependência das reservas de suas sementes e cotilédones. Essas espécies geralmente possuem sementes maiores com mais reservas, o que resulta em um início de expansão foliar mais tardio. Por outro lado, as espécies pioneiras, que têm sementes menores para melhor dispersão e com poucas reservas, iniciam a expansão foliar mais rapidamente. Isso ocorre porque o crescimento inicial depende quase que exclusivamente da atividade fotossintética plena. A resposta positiva do *C. estrellensis* ao aumento do sombreamento é um indicativo da sua adaptabilidade com respeito à fotoaclimatação.

Avaliando o crescimento de *Copaifera langsdorffii*, *Apuleia leiocarpa* e *Dalbergia nigra*, respectivamente, Rosa et al. (2021), Bueno et al. (2021) e Silva et al (2022) confirmaram o efeito atenuante do sombreamento em relação ao déficit hídrico e melhor uso da água por mudas arbóreas. Esses resultados são importantes, podendo direcionar aos viveiristas práticas que sejam mais eficientes no uso de água e demais insumos, diminuindo a mortalidade de mudas e, consequentemente, os custos de produção.

A produção de mudas de qualidade é fundamental nos viveiros a fim de garantir a sobrevivência das plantas após o plantio em áreas definitivas, mas outros fatores, tanto bióticos como abióticos, também afetam essa etapa. Croce et al. (2022) ressaltam a importância de avaliar fatores interativos e de se buscar espécies adaptadas às condições ambientais para projetos de recuperação de áreas degradadas. As duas espécies avaliadas tiveram melhor adaptação ao local de plantio quando suas mudas foram produzidas com níveis de sombreamento C₃ e C₄ apresentando melhor adaptação ao local de plantio (Figura 19). Sob maiores níveis de sombreamento, as mudas cresceram mais no viveiro e continuaram a apresentar altura superior em campo, possivelmente devido à maior área foliar para absorção de luz e produção de fotossintatos, como constatado também por Sasso et al. (2021). No entanto, é importante destacar que o local e a finalidade do plantio foram fatores

determinantes para esse resultado. Se as espécies fossem plantadas em uma área aberta para início de restauração, os resultados poderiam ser diferentes.

Os resultados deste estudo sugerem que o sombreamento artificial pode ter um impacto positivo no crescimento da *Cariniana estrellensis* e da *Gallesia integrifolia*, porém é importante considerar a preferência por condições de maior luminosidade por parte de espécies pioneiras e o fornecimento adequado de água pelo manejo de irrigação. Além disso, a capacidade de adaptação das espécies ao sombreamento e sua resposta fisiológica também são relevantes para o desenvolvimento de práticas de manejo mais eficientes em viveiros, buscando produzir mudas de qualidade com menor custo e menor impacto ambiental.

4.7 CONCLUSÕES

O volume de água aplicado por meio da irrigação diminuiu com o aumento do nível de sombreamento, com exceção do tratamento C₃ para a *G. integrifolia*. A variação da altura e diâmetro das mudas foi diferente entre as espécies, com destaque para o crescimento mais rápido da *G. integrifolia* no período inicial da fase de viveiro. Ambas as espécies apresentaram melhor desempenho de crescimento com sombreamento intermediário, entre 37,6 e 49,4 %. Quando levadas para plantio em área definitiva, as mudas produzidas com maior sombreamento (49,4 a 75,8%) se adaptaram melhor em área com bosque em estado avançado.

Em geral, os resultados sugerem que o sombreamento pode ser uma estratégia eficaz para o cultivo de mudas de *C. estrellensis* e *G. integrifolia*, uma vez que o crescimento das mudas foi melhor com sombreamento intermediário e a quantidade de água aplicada por meio da irrigação foi menor, além de alcançar maior eficiência no uso da água em comparação com as mudas cultivadas a pleno sol.

4.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A. H. M.; LELES, P. S. D. S.; MELO, L. A.; OLIVEIRA, R. R.; FERREIRA, D. H. A. A. Caracterização e potencial de substratos formulados com bioassólido na produção de mudas de *Schinus terebinthifolius* Raddi. e *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos. **Ciência Florestal.** 27:1179. 2017.
- ABREU, A. H. M; ALONSO, J. M; MELO, L. A.; LELES, P. S. S.; SANTOS, G. R. Caracterização de bioassólido e potencial de uso na produção de mudas de *Schinus terebinthifolia* Raddi. **Eng Sanit E Ambient.** 24:591-9. 2019.
- ADJI, B. I.; AKAFFOU, D. S.; REFFYE, P.; SABATIER, S. Maternal environment and seed size are important for successful germination and seedling establishment of *Pterocarpus erinaceus* (Fabaceae). **Journal of Forestry Research.** 33:977-90. 2022.
- BALESTRIN, D.; MARTINS, S. V.; Schoorl, J. M.; Lopes, A. T.; Andrade, C. F. Phytosociological study to define restoration measures in a mined area in Minas Gerais, Brazil. **Ecological Engineering.**;135:8-16. 2019.
- BALLESTRERI, A. A.; ARAUJO, M. M.; AIMI, S. C.; NASCIMENTO, N. F.; BERGHETTI, A. L. P.; GASPARIN, E.; TABALDI, L. A.; ZAVISTANOVICZ, T. C. Morphophysiological responses of forest tree species conducted under different levels of shading in the enrichment of degraded ecosystem. **Forest Ecology and Management,** 488:11903. 2021.
- BRASIL. Resolução Nº 498, de 19 de agosto de 2020. Available from: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/CONAMA/RE0458-160713.pdf>. 2020.
- BUENO, M.M.; LELES, P.S.S.; PINTO, M. F.; RESENDE, A. S.; COUTO, B. R. M.; CARVALHO, D.F. Water use in the growth of Atlantic Forest tree species seedlings under different shading levels. **Ciência e Agrotecnologia.**;45:e025220. 2021.
- BUENO, M.M.; LELES, P.S.S.; ABREU, J.F.G.; SANTOS, J.J.S.; CARVALHO, D.F. Water requirement and growth indicators of forest tree species seedlings produced with automated irrigation management. **PLoS ONE.**;15:e0238677. 2020.
- BUSTAMANTE, M. M. C.; SILVA, J. S.; SCARIOT, A.; SAMPAIO, A. B.; MASCIA, D. L.; GARCIA, E.; SANO, E.; FERNANDES, G.W.; DURIGAN, G.; ROITMAN, I.; FIGUEIREDO, I.; RODRIGUES, R. R.; PILLAR, V. D.; OLIVEIRA, A. O.; MALHADO, A. C.; ALENCAR, A.; VENDRAMINI, A.; PADOVEZI, A.; CARRASCOSA, H.; FREITAS, J.; SIQUEIRA, J.A.; SHIMBO, J.; GENEROSO, L.G.; TABARELLI, M.; BIDERMAN, R.; SALOMÃO, R.P.; VALLE, R.; JUNIOR, B.; NOBRE, C. Ecological restoration as a strategy for mitigating and adapting to climate change: lessons and challenges from Brazil. **Mitig Adapt Strateg Glob Change**, 24:1249-70. 2019.
- CARVALHO, D. F.; BUENO, M. M.; LELES, P. S. S.; ABREU, J. F. G.; MARTINS, R. C. F.; MEDICI, L. O. Production and initial growth of forest species seedlings using sewage sludge and automated irrigation. **Ciência Agrotecnologia**, 45:e017321. 2021.
- CROCE, J.; BADANO, E. I.; TRIGO, C. B.; MARTINEZ-GALVEZ, F.; TÁLAMO, A. Experimental approaches to select tree species for forest restoration: effects of light, water availability and interspecific competition in degraded areas. **Journal of Forestry Research.** 33:1197-207. 2022.

- CRUZ, E. S.; MEDICI, L.O.; LELES, P. S. S.; AMBROZIM, C. S.; SOUZA, W. L.; CARVALHO, D. F. Growth of black pepper plantlets under different substrates and irrigation levels. **Scientia Agricola** (Piracicaba, Braz), 79:e20200094. 2022.
- DAVIDE, A. C.; BOTELHO, S. A. Fundamentos e métodos de restauração de ecossistemas florestais: 25 anos de experiência em matas ciliares. Lavras, **Editora UFLA**, 636p. 2015.
- DICKSON, A.; LEAF, A. L.; HOSNER, J. F. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. **The Forestry Chronicle**. 36:10. 1960.
- DUMROESE, R. K.; PAGE-DUMROESE, D. S.; SALIFU, K. F.; JACOBS, D. F. Exponential fertilization of *Pinus monticola* seedlings: nutrient uptake efficiency, leaching fractions, and early outplanting performance. 2005, 35:7. 2005.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, 35:1039-42. 2011.
- GOGOSZ, A.M.; BOEGER, M.R.T. Functional morphology of subtropical tree seedlings in southern Brazil. **Rodriguésia**. 70. 2019.
- GOMES, D. P.; CARVALHO, D. F.; PINTO, M. F.; VALENÇA, D. D. C.; MEDICI, L. O. Growth and production of tomato fertilized with ash and castor cake and under varying water depths, cultivated in organic potponics. **Acta Scientiarum Agronomy**. 39:201. 2017.
- HAN, T.; REN, H.; HUI, D.; ZHU, Y.; LU, H.; GUO, Q.; WANG, J. Dominant ecological processes and plant functional strategies change during the succession of a subtropical forest. **Ecological Indicators**, 146:109885. 2023.
- KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle Irrigation Design Parameters. Transactions of the ASAE.17:0678-84. 1974.
- KOECH, R.; LANGAT, P. Improving Irrigation Water Use Efficiency: A Review of Advances, Challenges and Opportunities in the Australian Context. **Water**. 10:1771. 2018.
- LI, M.; CAO, X.; LIU, D.; FU, Q.; LI, T.; SHANG, R. Sustainable management of agricultural water and land resources under changing climate and socio-economic conditions: A multi-dimensional optimization approach. **Agricultural Water Management**. 259:107235. 2022.
- MANCA, A.; SILVA, M. R.; GUERRINI, I. A.; FERNANDES, D. M.; VILLAS BÔAS, R. L.; SILVA, L. C.; FONSECA, A.C.; RUGGIU, M. C.; CRUZ, C.V.; SIVISACA, D. C. L.; MATEUS, C. M. D.; MURGIA, I.; GRILLI, E.; GANGA, A.; CAPRA, G. F. Composted sewage sludge with sugarcane bagasse as a commercial substrate for *Eucalyptus urograndis* seedling production. **Journal of Cleaner Production**. 269:122145. 2020.
- MATTHEWS, H. D.; GRAHAM, T. L.; KEVERIAN, S.; LAMONTAGNE, C.; SETO, D.; SMITH, T. J. National contributions to observed global warming. **Environmental Research Letters**. 9:014010. 2014.
- MEDICI, L.O.; REINERT, F.; CARVALHO, D.F.; KOZAK, M.; AZEVEDO, R.A. What about keeping plants well watered? **Environmental and Experimental Botany**. 99:38-42. 2014.
- MEDICI, L. O.; ROCHA, H. S.; CARVALHO, D. F.; PIMENTEL, C.; AZEVEDO, R. A. Automatic controller to water plants. **Scientia Agricola** (Piracicaba, Braz). 2010a, 67:727-30. 2010.

- MELLO, G. A. B.; CARVALHO, D. F.; MEDICI, L. O.; SILVA, A. C.; GOMES, D. P.; PINTO, M. F. Organic cultivation of onion under castor cake fertilization and irrigation depths. *Acta Scientiarum Agronomy*. 40: 34993. 2018.
- MOUSAVIDJAD, M.; LEBEL, L.; LEHOUX, N.; CLOUTIER, C.; CARLES, S. Resource allocation in a collaborative reforestation value chain: Optimisation with multi-objective models. *Journal of Environmental Management*. 328:116866. 2023.
- PEARSON, T. R. H.; BROWN, S.; MURRAY, L.; SIDMAN, G. Greenhouse gas emissions from tropical forest degradation: an underestimated source. *Carbon Balance and Management*. 12:3. 2017.
- POORTER, L.; BONGERS, L.; BONGERS, F. Architecture of 54 Moist-Forest Tree Species: Traits, Trade-Offs, and Functional Groups. *Ecology Society of America*. 87:1289-301. 2006.
- PUÉRTOLAS, J.; BENITO, L.F.; PEÑUELAS, J.L. Effects of nursery shading on seedling quality and post-planting performance in two Mediterranean species with contrasting shade tolerance. *New Forests*. 38:295-308. 2009.
- ROSA, D. B. C. J.; SCALON, S. P. Q.; DRESCH, D. M. Shading for water stress mitigation in *Copaifera langsdorffii* Desf. seedlings. *South African Journal of Botany*. 140:240-8. 2021.
- SASSO, S. A. Z.; MARCHESE, J. A.; MOURA, A. P. C.; GIL, B. V.; PERBONI, A. T.; DONAZZOLO, J.; OLIVEIRA F. L. R.; SANT'ANNA-SANTOS, B. F.; ROHR, A.; DANNER, M. A. Shade and sapling size influence restoration of *Araucaria angustifolia*. *Journal Forestry Research*. 2021, 32:1833-41. 2021.
- SILVA, A. P. M.; SCHWEIZER, D.; MARQUES, H. R.; TEIXEIRA, A. M. C.; SANTOS, T. V. M. N.; SAMBUICHI, R. H. R.; BADARI, C. G.; GAUDARE, U.; BRANCALION, P. H. S. Can current native tree seedling production and infrastructure meet an increasing forest restoration demand in Brazil? *Restoration Ecology*. 25:509-15. 2017.
- SILVA, L. O.; MENDONÇA, H. V.; CONFORTO, B. A. A. F.; PINTO, M. F.; CARVALHO, D. F. Production of forest seedlings using sewage sludge and automated irrigation with ozonated cattle wastewater. *PLOS ONE*. 7:e0276633. 2022.
- SIPPEL, S.; REICHSTEIN, M.; MA, X.; MAHECHA, M. D.; LANGE, H.; FLACH, M.; FRANK, D. Drought, Heat, and the Carbon Cycle: a Review. *Current Climate Change Reports*, 4:266-86. 2018.

5. CONCLUSÕES GERAIS

O tratamento por ozonização da água resíduária de bovinocultura (ARB) e o efeito da sua aplicação no crescimento de mudas de *Dalbergia nigra* cultivadas com biossólido sob diferentes condições de luminosidade dão um direcionamento positivo para o uso de resíduos na cadeia produtiva de viveiros florestais (Capítulo I). Os resultados apresentados com relação às características químicas e físicas desses resíduos podem favorecer a sobrevivência das mudas quando plantadas em áreas de reflorestamento. Além da qualidade da água resíduária tratada, o crescimento de mudas em viveiros florestais foi avaliado em diferentes níveis de sombreamento e suprimento da necessidade hídrica (Capítulo II). Os volumes de ARB aplicados a pleno sol variaram de 1,556 a 2,342 L planta⁻¹, respectivamente, para tratamento por 2,0 e 1,0 h de ozonização. Os déficits aplicados não impediram o crescimento das mudas de *Dalbergia nigra* e em algumas situações, proporcionaram melhor aproveitamento da água pela planta quando comparado à reposição total. As mudas de *Cariniana estrellensis* e *Gallesia integrifolia*, de ciclos sucessionais diferentes, apresentaram bons resultados, alcançando maior produtividade de água de irrigação e IQD quando produzidas com pelo menos 50% de redução da luminosidade (Capítulo III). As mudas que tiveram melhor crescimento e qualidade na fase de viveiro apresentaram melhor desempenho quando plantadas em área de restauração florestal. De um modo geral, a utilização de insumos alternativos na produção de mudas espécies arbóreas é recomendada e deve ser incentivada, pois os resultados promissores indicam benefícios da destinação de resíduos, como lodo de esgoto e efluentes.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste projeto de doutorado foi explorado o uso de resíduos (biossólido de lodo de esgoto e águas residuárias) na produção de mudas de espécies arbóreas nativas de Mata Atlântica. Além das particularidades mencionadas com relação ao sistema de produção de mudas, os resultados obtidos indicam que é possível inserir esses resíduos na cadeia produtiva dos viveiros, proporcionando benefícios econômicos e ao meio ambiente.

Apesar de apresentam características distintas, constata-se que o nível de sombreamento e a reposição adequada de água são fatores importantes para a produção de mudas de espécies nativas com qualidade visando o plantio em áreas de restauração florestal.

Destaca-se, por fim, que outro estudo está sendo conduzido para enriquecer as tecnologias apresentadas nesta pesquisa. Avaliada no capítulo III, mudas de *C. estrellensis* estão sendo produzidas com diferentes composições de substratos a base de biossólido e manejo do uso da água residuária para irrigação. Espera-se, portanto, que novas tecnologias possam ser aprimoradas e incorporadas em viveiros florestais, contribuindo com a restauração florestal e a preservação do meio ambiente.