UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

ESTRESSES ABIÓTICOS NA GERMINAÇÃO DE SEMENTES E NO DESENVOLVIMENTO DE MUDAS FLORESTAIS

Robson Luis Silva de Medeiros

Licenciado em Ciências Agrárias

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

ESTRESSES ABIÓTICOS NA GERMINAÇÃO DE SEMENTES E NO DESENVOLVIMENTO DE MUDAS FLORESTAIS

Robson Luis Silva de Medeiros

Orientador: Prof. Dr. Rinaldo Cesar de Paula

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

2022

M488e

Medeiros, Robson Luis Silva de
Estresses abióticos na germinação de sementes e no desenvolvimento de mudas florestais / Robson Luis Silva de Medeiros. -- Jaboticabal, 2022
98 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Rinaldo Cesar de Paula

1. Eucalipto. 2. ipê. 3. potencial fisiológico. 4. mudanças climáticas. 5. setor florestal. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Certificado de Aprovação

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: ESTRESSES ABIÓTICOS NA GERMINAÇÃO DE SEMENTES E NO DESENVOLVIMENTO DE MUDAS FLORESTAIS

AUTOR: ROBSON LUIS SILVA DE MEDEIROS
ORIENTADOR: RINALDO CESAR DE PAULA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. RINALDO CESAR DE PAULA (Participaçao Virtual)
Departamento de Ciencias da Producao Agricola / FCAV UNESP Jaboticabal

p/
Prof.Dr. PAULO ALEXANDRE FERNANDES RODRIGUES DE MELO (Participaçao Virtual)
Universidade Estadual do Maranhão-UEMA / São Luis/MA

p/
Profa. Dra. PRISCILA LUPINO GRATÃO (Participaçao Virtual)
Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária / FCAV / UNESP - Jaboticabal

p/
Profa. Dra. EDILMA PEREIRA GONÇALVES (Participaçao Virtual)
Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE / Garanhuns/PE

p/
Prof. Dr. JOSÉ MAURO SANTANA DA SILVA (Participaçao Virtual)
Universidade Federal de São Carlos - Campus Sorocaba / Sorocaba/SP

Jaboticabal, 16 de fevereiro de 2022

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Robson Luis Silva de Medeiros, nascido em 10 de Junho de 1993 na cidade de Esperança - PB, filho dos agricultores Ricardo Luis de Medeiros e Rozana Maria Silva de Medeiros. Concluiu o ensino médio na Escola Municipal Luzia Laudelino Silva de Medeiros em 2010 na cidade de Arara - PB. No ano seguinte, ingressou no curso superior de Licenciatura em Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), campus de Bananeiras. Foi Bolsista de extensão em 2012, trabalhou com Educação Ambiental em escolas públicas da região. Foi bolsista de Iniciação Cientifica (2012 – 2015) por 3 vigências consecutivas, desenvolvendo pesquisas em Brejo de Altitude e na Caatinga Paraibana. No ano de 2015 foi professor de Biologia do Cursinho solidário do campus III – UFPB e Bolsista do Programa de Iniciação à Docência, onde participou do projeto “Hortas escolares no Brejo Paraibano” em Instituições de ensino da rede Estadual da Paraíba. Mestre em Agronomia (Produção Vegetal), pela Faculdade de Ciências Agrarias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2018. Doutor em Agronomia (Produção Vegetal), pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2022.

“Os lábios da sabedoria estão fechados,
exceto aos ouvidos do entendimento.”
∴

“Ó Maria, concebida sem pecado,
rogai por nós, que recorremos a Vós. Amém.”

“Quando você quer alguma coisa,
todo o universo conspira para que você realize o seu desejo.”
O Alquimista

Aos meus pais, Ricardo e Rozana, pelo amor
e apoio diário e incondicional.
Ao meu irmão, Rafael pelo amor e solidariedade.
Ao meu sobrinho, o “pequenino”
Davi Luis pelo amor inexplicável.
DEDICO

A Gabriel Francisco da Silva,
um ser humano fantástico,
que carrega em si um “coração de ouro”,
me ensinou a conquistar o mundo,
principalmente o “invisível”.
OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter proporcionado o dom da verdadeira riqueza humana. A Vida, Saúde, Sabedoria, Coragem, Amor, Humildade.

Aos meus pais Ricardo e Rozana, por estarem todo tempo ao meu lado, sempre me incentivando nessa difícil jornada. Amo vocês, vocês são a minha fonte de inspiração.

A Davi Medeiros, meu pequeno sobrinho, por todo amor, me ensinar a amar e incentivar a ser uma pessoa melhor.

Ao meu irmão Rafael Luis e meus primos Allex Eleutério e Saulo Aislan, pelas belas lembranças compartilhadas e sempre a expectativa para que em novos (re)encontros, possamos espalhar nossas conquistas, fracassos, metas e planos para conquistar o “mundo”. Mesmo sozinho, sempre existia alguém comigo.

Ao professor Rinaldo Cesar de Paula, orientador e amigo. Seus ensinamentos profissionais e para a vida me influenciaram a ser um ser humano melhor e a enxergar o melhor em cada pessoa. Obrigado pela paciência e parceria durante esses anos.

À toda a minha família por acreditar em mim, pela torcida e disposição para ajudar. Em especial à tia Aída Maria, tia Gorete Bento, Flavinha Bento, Flaviana Bento. Ao Tio Gabriel da Silva, pelo companheirismo, inspiração, lições sobre a vida, filosofias. Sou eternamente grato.

A Debora Santos de Souza, por ser calmaria em um mundo frenético e compartilhar uma melhor visão do mundo.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), em especial ao corpo docente do programa e ao conselho, pela incansável missão de transmitir o conhecimento.

Ao professor Antonio Sergio Ferraudo, pelo companheirismo e amizade, sempre disposto a ajudar. Ao professor Arthur Cecilio Filho, pela amizade, companheirismo e cafés filosóficos.

Aos compalheiros da “Pé de Manga House”, Gustavo Moura, Patric Castro, Caio Carmo e Marcus Silveira. Pela amizade, carinho e companherismo.

Aos colegas do Laboratório de Sementes e Melhoramento Florestal, William, João Vitor, Márcio, Tamara, Bruna, Patrícia, Lígia, Ygor, Matheus, Wagner e Taty, pela contribuição intelectual durante os momentos de discussão sobre pequisas cientificas e momentos de descontração.

A Banca examinadora no Exame Geral de Qualificação e de Defesa da Tese, Professores Paulo Alexandre, Priscila Gratão, Edilma Gonçalves, José Mauro Santana da Silva e ao pesquisador Márcio Jose Araujo.

A todos os funcionários da FCAV/UNESP, pelo constante serviço prestado diariamente e passarem despercebido da comunidade acadêmica. Em especial aos funcionários do Departamento de Ciências da Produção Agrícola Rosane Betiolli e Wagner Tarina por animarem o ambiente de trabalho sempre com alegria e disposição. Aos funcionários do restaurante universitário (RU) da FCAV/UNESP.

Aos funcionários do Horto Florestal Adevair e Roberto Carlos. Aos motoristas Donizete, Mafra e Sola. Ao Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária, pela contribuição na realização da pesquisa. Aos professores Priscila Gratão, Pedro Luis e Rogério Carvalho. À Sonia Carregari, sempre trabalhando com sorriso no rosto e elucidando dúvidas sobres as diversas metodologias

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro (Processo nº 141302/2018-6).

SUMÁRIO

RESUMO.....iv
ABSTRACT vi
LISTA DE TABELAS viii
LISTA DE FIGURAS ix
CAPÍTULO 1 – Considerações gerais..... 1
1 Introdução 1
2 Revisão de Literatura..... 2
2.1 Setor florestal..... 2
2.2 *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson..... 3
2.3 *Zeyheria tuberculosa* (Vell.) Bureau ex Verl..... 4
2.4 Estresses abióticos na germinação de sementes florestais..... 5
2.5 Estresse hídrico em mudas florestais durante o estabelecimento inicial .. 7
3 Referências 8
CAPÍTULO 2 - Estresses hídrico e salino afetam diferencialmente a germinação de sementes de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson dentro da faixa ótima de temperatura para o processo germinativo..... 15
1 Introdução 15
2 Material e Métodos..... 18
2.1 Experimento 1..... 18
2.2 Experimento 2..... 18
2.3 Experimento 3..... 19
2.4 Análise dos dados..... 19
3 Resultados 20
4 Discussão..... 23
5 Conclusão 26
6 Referências 27
CAPÍTULO 3 - Deficiência hídrica induz alterações no metabolismo primário e secundário em mudas de *Corymbia citriodora* 32
1 Introdução 32
2 Material e Métodos..... 33
2.1 Trocas gasosas e potencial hídrico foliar 35
2.2 Pigmentos fotossintéticos 36
2.3 Solutos orgânicos..... 36

2.4 Biometria, área foliar e massa das plantas 37
2.5 Análise de dados..... 37
3 Resultados 37
4 Discussão..... 43
5 Conclusão 47
6 Referências 47
CAPÍTULO 4 - Como o estresse hídrico afeta plantas de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson) ao longo da fase de crescimento inicial? . 52
1 Introdução 52
2 Material e Métodos..... 54
2.1 Experimento..... 54
2.2 Análises fisiológicas..... 56
2.2.1 Trocas gasosas e potencial hídrico foliar..... 56
2.2.2 Pigmentos fotossintéticos. 56
2.3 Análises bioquímicas 56
2.3.1 Teor de MDA - 57
2.3.2 Teor de prolina..... 57
2.4 Análises de crescimento 57
2.5 Análise de dados..... 57
3 Resultados 58
3.1 Características fisiológicas..... 58
3.2 Características bioquímicas 61
3.3 Características de crescimento..... 62
4 Discussão..... 64
4.1 Características fisiológicas..... 64
4.2 Características bioquímicas 66
4.3 Características de crescimento..... 67
5 Conclusões..... 68
6 Referências 68
CAPÍTULO 5 - Estresse abiótico na germinação de sementes e crescimento de plantas de *Zeyheria tuberculosa (*Vell.) Bureau ex Verl 73
1 Introdução 73
2 Material e Métodos..... 75
2.1. Experimento 1..... 76
2.2 Experimento 2..... 76

2.3. Experimento 3 77
2.4 Experimento 4 77
2.4.1. Trocas gasosas e potencial hídrico foliar 79
2.4.2. Biometria, área foliar e massa das plantas 79
2.4.3. Análise de dados 79
3 Resultados 80
3.1 Germinação de sementes sob diferentes temperaturas 80
3.2 Germinação de sementes sob estresses hídrico e salino 81
3.3 Desempenho de plantas sob diferentes regimes de irrigação 83
4 Discussão 87
4.1 Germinação de sementes sob estresses abióticos 87
4.2 Desempenho de mudas sob diferentes regimes de irrigação 90
5 Conclusões 92
6 Referências 92

ESTRESSES ABIÓTICOS NA GERMINAÇÃO DE SEMENTES E NO DESENVOLVIMENTO DE MUDAS FLORESTAIS

RESUMO – Estresses abióticos prejudicam a germinação e o desenvolvimento de mudas em espécies florestais, em áreas comerciais ou de recomposição. Frente às mudanças climáticas, estudos podem melhorar as estratégias para a conservação da biodiversidade autóctone e fortalecer projetos de reflorestamento comercial ou de recomposição ambiental. Objetivou-se avaliar os efeitos dos estresses térmico, hídrico e salino na germinação de sementes e do estresse hídrico no crescimento de plantas de *Corymbia citriodora*, uma espécie exótica com interesse comercial crescente no Brasil, e de *Zeyheria tuberculosa*, uma espécie nativa do Brasil com potencial econômico e para uso em trabalhos de recomposição ambiental. Para as duas espécies foram conduzidos experimentos em laboratório e em casa de vegetação. Em laboratório avaliou-se o processo germinativo das sementes das duas espécies sob diferentes temperaturas, potenciais hídricos simulados com polietilenoglicol (PEG 6000) e potenciais osmóticos simulados com NaCl. Em casa de vegetação, mudas das duas espécies foram submetidas a cinco regimes hídricos (20, 35, 50, 65 e 80% da capacidade máxima de retenção de água no solo), avaliando-se características de crescimento, fisiológicas e bioquímicas. Para as duas espécies, as temperaturas de 25 e 30 °C favorecem o potencial fisiológico das sementes. Para *C. citriodora* a porcentagem e a velocidade de germinação das sementes diminuíram com o aumento do estresse hídrico e salino, mas de forma mais acentuada sob déficit hídrico a 30 ºC e o limite de tolerância das sementes ao déficit hídrico está entre -0,6 e -0,8 MPa, tanto a 25 quanto a 30 ºC, e ao estresse salino entre -1,4 e -1,6 MPa, a 25 ºC, e entre -1,2 e -1,4 MPa, a 30 ºC. Portanto, a germinação de sementes de *C. citriodora* apresenta sensibilidade diferenciada ao déficit hídrico e salino, sendo mais prejudicada pelo déficit hídrico. Para *Z. tuberculosa*, o aumento do estresse reduziu a germinação e IVG das sementes a partir de -0,6 MPa, porém de forma diferenciada entre os tipos de estresse, sendo mais sensível ao estresse salino. As mudas de *C. citriodora* apresentaram aumento nos teores de clorofila, carotenoides, prolina e MDA e redução no potencial hídrico foliar e nos parâmetros de trocas gasosas e crescimento com a diminuição da disponibilidade hídrica e quando cultivadas em níveis inferiores a 50% da capacidade máxima de retenção de água no solo houve redução significativa nas características de crescimento. Observou-se, também, que os regimes de irrigação mais restritivos proporcionaram diferenças, que com o aumento da idade e crescimento das mudas, se acentuaram de forma mais severa. As temperarturas de 25 e 30 ºC porpocionaram o maior potencial fisiológico em ambas as espécies. O limite de tolerância das sementes de *C. citriodora* ao déficit hídrico está entre -0,6 e -0,8 MPa, tanto a 25 quanto a 30 ºC, e ao estresse salino entre -1,4 e -1,6 MPa, a 25 ºC, e entre -1,2 e -1,4 MPa, a 30 ºC. Portanto, a germinação de sementes de *C. citriodora* tem sensibilidade diferenciada ao déficit hídrico e salino, sendo mais prejudicada pelo déficit hídrico. As sementes de *Z. tuberculosa* são mais sensíveis ao estresse salino do que ao estresse hídrico. Potenciais hídricos inferiores a -0,6 MPa e salinos a -0,4 MPa comprometem o potencial fisiológico das sementes. Os regimes hídricos mais restritivos reduziram os parâmetros fisiológicos e morfológicos das mudas de *C. citriodora*, sendo o desenvolvimento de mudas comprometido a níveis de umidade inferiores a 50% da capacidade de campo. Regimes de

irrigação que proporcionam 50% ou menos de retenção de água no substrato prejudicam o crescimento de plantas de Z. *tuberculosa* e alta umidade (≥80%) no substrato prejudica o crescimento radicular.

Palavras-chave: Eucalipto, ipê, potencial fisiológico, mudanças climáticas, setor florestal.

ABIOTIC STRESS IN SEED GERMINATION AND FOREST SEEDLING DEVELOPMENT

ABSTRACT – Abiotic stresses affect the germination and development of seedlings in forest species, in commercial or recomposition areas. Faced with climate change, studies can improve strategies for the conservation of indigenous biodiversity and strengthen commercial reforestation or environmental restoration projects. The objective was to evaluate the effects of heat, water and saline stress on seed germination and of water stress on plant growth of *Corymbia citriodora*, an exotic species with growing commercial interest in Brazil, and *Zeyheria tuberculosa*, a species native to Brazil with economic potential and for use in environmental restoration work. For both species, experiments were carried out in the laboratory and in a greenhouse. In the laboratory, the germination process of the seeds of the two species was evaluated under different temperatures, water potentials simulated with polyethylene glycol (PEG 6000) and osmotic potentials simulated with NaCl. In a greenhouse, seedlings of the two species were submitted to five water regimes (20, 35, 50, 65 and 80% of the maximum soil water retention capacity), evaluating growth, physiological and biochemical characteristics. For both species, temperatures of 25 and 30 °C favor the physiological potential of the seeds. For *C. citriodora*, the percentage and speed of seed germination decreased with increasing water and saline stress, but more markedly under water deficit at 30 ºC and the tolerance limit of seeds to water deficit is between -0.6 and -0.8 MPa, both at 25 and 30 ºC, and to salt stress between -1.4 and -1.6 MPa, at 25 ºC, and between -1.2 and -1.4 MPa, at 30 ºC Therefore, the germination of *C. citriodora* seeds presents differentiated sensitivity to water and saline deficits, being more affected by water deficits. For *Z. tuberculosa*, the increase in stress reduced germination and IVG of seeds from -0.6 MPa, but in a different way between the types of stress, being more sensitive to saline stress. *C. citriodora* seedlings showed an increase in chlorophyll, carotenoids, proline and MDA contents and a reduction in leaf water potential and in gas exchange and growth parameters with the decrease in water availability and when cultivated at levels below 50% of maximum capacity of water retention in the soil there was a significant reduction in growth characteristics. It was also observed that the more restrictive irrigation regimes provided differences, which with increasing age and seedling growth, became more severe. Temperatures of 25 and 30 ºC provided the highest physiological potential in both species. The tolerance limit of *C. citriodora* seeds to water deficit is between -0.6 and -0.8 MPa, both at 25 and 30 ºC, and to salt stress between -1.4 and -1.6 MPa, at 25°C, and between -1.2 and -1.4 MPa at 30 °C. Therefore, the germination of *C. citriodora* seeds has differentiated sensitivity to water and saline deficits, being more affected by water deficits. The seeds of *Z. tuberculosa* are more sensitive to salt stress than to water stress. Water potentials below -0.6 MPa and saline at -0.4 MPa compromise the physiological potential of seeds. The most restrictive water regimes reduced the physiological and morphological parameters of *C. citriodora* seedlings, and seedling development was

compromised at moisture levels below 50% of field capacity. Irrigation regimes that provide 50% or less of water retention in the substrate impair the growth of *Z. tuberculosa* plants and high humidity (≥80%) in the substrate impairs root growth.

Keywords: Eucalyptus, ipê, physiological potential, climate change, forestry sector.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 1

CAPÌTULO 2 15

Tabela 1. Germinação (%), índice de velocidade de germinação (IVG), comprimento de raiz (CRaiz, mm), comprimento da parte aérea (CPA, mm), comprimento total de plântulas (CTP, mm) e massa seca das plântulas (MSP, g plântula^{-1}) obtidos a partir de sementes de *C. citriodora* submetidas a diferentes temperaturas. 20

CAPÌTULO 3 32

Tabela 1. Caracterização química do solo utilizado no experimento..... 35

CAPÍTULO 4 52

Tabela 1. Caracterização química do solo utilizado no experimento..... 55

CAPÍTULO 5 73

Tabela 1. Caracterização química do solo utilizado no experimento..... 78

Tabela 2. Germinação (%), índice de velocidade de germinação (IVG), comprimento de raiz (CRaiz, mm), comprimento da parte aérea (CPA, mm), comprimento total de plântulas (CTP, mm) e massa seca das plântulas (MSP, g plântula^{-1}) obtidos a partir de sementes de *Z. tuberculosa* submetidas a diferentes temperaturas de germinação. 81

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 1

CAPÍTULO 2 15

Figura 1. Equações que estimam a germinação (G, %) e índice de velocidade de germinação (IVG) de sementes de *C. citriodora* submetidas a déficit hídrico induzido por PEG 6000, a 25 e 30 °C. (* - indica potenciais hídricos onde houve diferenças significativas (p<0,05) entre as temperaturas).....21

Figura 2. Equações que estimam a germinação (G, %) e índice de velocidade de germinação (IVG) de sementes de *C. citriodora* submetidas a estresse salino induzido por NaCl, a 25 e 30 °C. (* - indica potenciais hídricos onde houve diferenças significativas (p<0,05) entre as temperaturas). 22

CAPÍTULO 3 32

Figura 1. Temperaturas máximas (T ºC Max) e mínimas (T ºC Min) e umidade relativa do ar máxima (U% Max) e mínima (U% Min) diárias obtidas no interior da casa de vegetação durante o período experimental (dezembro de 2018 a março de 2019). 34

Figura 2. Taxa de assimilação líquida (*A*, μmol m^{-2} s^{-1}), transpiração (*E*, mmol m^{-2} s^{-1}), condutância estomática (g_s, mol m^{-2} s^{-1}), CO_2 intracelular (Ci, μmol mol^{-2}), potencial hídrico foliar 1 (no período antemanhã, -MPa) e potencial hídrico foliar 2 (ao meio dia, -MPa) em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliado aos 110 dias após imposição dos regimes hídricos. 38

Figura 3. Taxa de assimilação líquida (*A*, μmol m^{-2} s^{-1}), transpiração (*E*, mmol m^{-2} s^{-1}), condutância estomática (g_s, mol m^{-2} s^{-1}) e CO_2 intracelular (Ci, μmol mol^{-2}) em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliado aos 110 dias após imposição dos regimes hídricos. 39

Figura 4. Conteúdo (mg g^{-1}) de clorofila a (Chl^{-a}), clorofila b (Chl^{-b}), clorofilas a+b (Chl a+b) e carotenoides (Cx+c) em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliado aos 110 dias após imposição dos regimes hídricos. 40

Figura 5. Conteúdo de MDA (malondialdeído) em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliado aos 110 dias após imposição dos regimes hídricos. 41

Figura 6. Conteúdo de prolina em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliado aos 110 dias após imposição dos regimes hídricos. 41

Figura 7. Comportamento da Altura (cm), diâmetro ao nível do solo (mm), número de folhas, área foliar (cm^2) de plantas de *C. citriodora* submetidas a cincos regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliados aos 110 dias após imposição dos regimes hídricos. 42

Figura 8. Comportamento da massa seca (g) de raízes, de caule+ramos e de folhas de plantas de *C. citriodora* submetidas a cincos regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliados aos 110 dias após imposição dos regimes hídricos. 43

CAPÍTULO 4 52

Figura 1. Temperaturas máximas (T ^oC Max) e mínimas (T ^oC Min) e umidade relativa do ar máxima (U% Max) e mínima (U% Min) diárias obtidas no interior da casa de vegetação durante o período experimental (novembro de 2019 a fevereiro de 2020). 55

Figura 2. Taxa de assimilação líquida (*A*, μmol m^{-2} s^{-1}), transpiração (*E*, mmol m^{-2} s^{-1}), condutância estomática (g_s, mol m^{-2} s^{-1}), CO_2 intracelular (Ci, μmol mol^{-2}), potencial hídrico foliar 1 (no período antemanhã, -MPa) e potencial hídrico foliar 2 (ao meio dia, -MPa) em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliados aos 35, 70 e 105 dias após imposição dos regimes hídricos. 59

Figura 3. Conteúdo (mg g^{-1}) de clorofila a (Chl^{-a}), clorofila b (Chl^{-b}), clorofilas a+b (Chl a+b) e carotenoides (Cx+c) em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliados aos 35, 70 e 105 dias após imposição dos regimes hídricos. 60

Figura 4. Conteúdos de malondialdeído (MDA, mmol.g^{-1} FM) em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliados aos 35, 70 e 105 dias após imposição dos regimes hídricos. 61

Figura 5. Conteúdos de prolina (mmol.g^{-1} FM) em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliados aos 35, 70 e 105 dias após imposição dos regimes hídricos. 62

Figura 6. Comportamento da Altura (cm), diâmetro ao nível do solo (mm), número de folhas, área foliar (cm^2) e massa seca (g) de raízes, de caule+ramos e de folhas de plantas de *C. citriodora* submetidas a cincos regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliados aos 35, 70 e 105 dias após imposição dos regimes hídricos. 63

Figura 7. Comportamento da massa seca (g) de raízes, de caule+ramos e de folhas de plantas de C. citriodora submetidas a cincos regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliados aos 35, 70 e 105 dias após imposição dos regimes hídricos. 64

CAPÍTULO 5 73

Figura 1. Temperaturas máximas (T ºC Max) e mínimas (T ºC Min) e umidade relativa do ar máxima (U% Max) e mínima (U% Min) diárias obtidas no interior da casa de vegetação durante o período experimental (dezembro de 2018 a junho de 2019). 78

Figura 2. Equações que estimam a germinação (G, %) e índice de velocidade de germinação (IVG) de sementes de *Z. tuberculosa* submetidas a déficit hídrico induzido por PEG 6000, a 25 e 30 °C. (* - indica potenciais hídricos onde houve diferenças significativas ($p<0,05$) entre as temperaturas). 82

Figura 3. Equações que estimam a germinação (G, %) e índice de velocidade de germinação (IVG) de sementes de *Z. tuberculosa* submetidas a déficit salino induzido por NaCl, a 25 e 30 °C. (* - indica potenciais hídricos onde houve diferenças significativas ($p<0,05$) entre as temperaturas).....82

Figura 4. Taxa de assimilação líquida (*A*, μmol m^{-2} s^{-1}), transpiração (*E*, mmol m^{-2} s^{-1}), condutância estomática (g_s, mol m^{-2} s^{-1}) e CO_2 intracelular (Ci, μmol mol^{-2}), potencial hídrico foliar 1 (no período antemanhã, MPa) e potencial hídrico foliar 2 (ao meio dia, MPa) em plantas de *Z. tuberculosa* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), aos 185 dias após imposição dos regimes hídricos. 84

Figura 5. Taxa de assimilação líquida (*A*, μmol m^{-2} s^{-1}), transpiração (*E*, mmol m^{-2} s^{-1}), condutância estomática (g_s, mol m^{-2} s^{-1}), CO_2 intracelular (Ci, μmol mol^{-2}) em plantas de *Z. tuberculosa* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), aos 185 dias após imposição dos regimes hídricos. 85

Figura 6. Comportamento da altura (cm), diâmetro ao nível do solo (mm), número de folhas e área foliar (cm^2) de plantas de *Z. tuberculosa* submetidas a cincos regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), aos 185 dias após imposição dos regimes hídricos. 86

Figura 7. Comportamento da massa seca (g) de raízes, de caule+ramos e de folhas de plantas de *Z. tuberculosa* submetidas a cincos regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), aos 185 dias após imposição dos regimes hídricos. 87

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1 Introdução

A crescente demanda por produtos florestais tem estimulado a expansão do setor florestal para áreas, muitas vezes, com sérias limitações ao crescimento vegetal. Isso representa um desafio para o setor, principalmente, se considerarmos o cenário de mudanças climáticas com previsões de aumentos de temperatura e de períodos de escassez hídrica, o que agrava essa situação (Scolforo et al., 2019).

As espécies florestais apresentam um ciclo maior quando comparadas a outras culturas agrícolas, estando expostas a diversos fatores edafoclimáticos (escassez de chuva, altas temperaturas e salinidade) que podem comprometer o seu crescimento, desenvolvimento e produção ao longo do ciclo. Dentre as espécies florestais, os eucaliptos se destacam por apresentarem um ciclo menor em comparação com as espécies nativas do Brasil, sendo por isso o grupo de espécies mais cultivadas comercialmente no país; o Ipê-felpudo, por outro lado, tem rusticidade e tolerância a certas condições desfavoráveis e, além de potencial econômico, é recomendado para plantios de recomposição ambiental. Em campo, as espécies florestais ficam expostas a múltiplos estresses abióticos, que podem ser combinados entre si, como a associação de altas temperaturas com salinidade e, ou déficit hídrico (Lian et al., 2018; Teshome et al., 2020).

A necessidade por maior produção de recursos naturais, atrelada a expansão do setor para áreas menos favoráveis (Ibá, 2021), é um desafio para os produtores rurais. As sementes e mudas são sensíveis a esses eventos podendo comprometer a regeneração das espécies em ambiente natural, ou mesmo a produção e sobrevivência de mudas em plantações florestais comerciais e, ou de recomposição ambiental.

Estudos para avaliar mecanismos ecofisiológicos em sementes e mudas florestais submetidas a estresses abióticos, podem contribuir para o entendimento do comportamento dessas espécies sob condições desfavoráveis, fornecendo subsídios para implementação de técnicas de manejo mais adequadas frente aos novos cenários de plantios florestais.

O potencial fisiológico das sementes é afetado pela temperatura e pelo potencial hídrico ou osmótico no substrato de germinação (Dürr et al., 2015). Nesse sentido, a germinação ocorre em uma faixa de temperatura que, muitas vezes está associada com as condições encontradas nas áreas de ocorrência da espécie. Na faixa ótima de temperatura para a germinação, ocorre a maior taxa de germinação no menor tempo, sendo que temperaturas abaixo ou acima da faixa ótima podem reduzir ou inibir a germinação (Guo et al., 2020). Potenciais hídricos ou osmóticos mais negativos diminuem a disponibilidade de água para a germinação, constituindo num dos fatores que mais influencia a germinação, pois a água está envolvida em todas as fases do processo germinativo (Marcos Filho, 2015). Tanto o estresse hídrico como o salino, afetam a germinação, o crescimento e o desenvolvimento das plantas, reduzindo a produção agrícola e florestal (Geng et al., 2019; Zhu et al., 2019).

Estudos têm apontado que eventos climáticos estressantes, como seca e temperaturas extremas, podem ser cada vez mais frequentes (Baz et al., 2020), comprometendo toda a cadeia produtiva do agronegócio. Nesse sentido, o presente trabalho objetivou avaliar os efeitos dos estresses térmico, hídrico e salino na germinação de sementes e do estresse hídrico no crescimento de mudas de *Corymbia citriodora*, uma espécie exótica com interesse comercial crescente no Brasil, e *Zeyheria tuberculosa*, uma espécie nativa do Brasil com potencial econômico e para uso em trabalhos de recomposição ambiental.

2 Revisão de Literatura

2.1 Setor florestal

O Brasil aparece em destaque na produção florestal, tendo eficiência e alta produtividade, frente o cenário mundial (Oliveira et al., 2020). Atualmente, o país é o maior exportador e o segundo maior produtor de celulose do mundo, e as florestas plantadas ocupam uma área de aproximadamente 9,55 milhões de hectares cultivadas, principalmente, com espécies de eucalipto, com 78% da área, e pinus com 18% (Ibá, 2021). A produtividade média de eucalipto, no ano de 2020, foi 36,8 m^3 ha^{-1} ano^{-1} (Ibá, 2021) tendo-se observado uma redução na produtividade nos últimos anos, o que pode estar relacionada com a expansão do setor para área menos favoráveis à produção e a eventos

climáticos estressantes, posto que regiões tropicais são mais susceptíveis a estresses abióticos (Gonçalves et al., 2017).

O Brasil apresenta condições climáticas favoráveis para produção de espécies florestais, tendo uma alta produtividade baseada na sustentabilidade ambiental, com potencial para expansão originada da demanda por produtos de origem florestal (Cunha et al., 2021), podendo suprir as necessidades da população (Elli et al., 2019). Um dos fatores que preocupam produtores e cientistas são as mudanças climáticas e como essas mudanças poderão impactar negativamente a produção das culturas agrícolas (Jesus et al., 2018).

A expansão do setor florestal para áreas com menor precipitação, aliada às mudanças climáticas, tem influenciado na produção florestal e na capacidade de restauração de áreas degradadas. Com o constante crescimento populacional e iminente mudanças climáticas, a pressão para atendimento da demanda por produtos agrícolas e florestais irá aumentar nos próximos anos (Fitton et al., 2019). As mudanças climáticas podem ser um dos principais fatores que contribuíram para a redução da produtividade de eucaliptos e pinus nos últimos anos (Ibá, 2021). Diante disso, pesquisas voltadas ao entendimento dos mecanismos das plantas associados a maior ou menor tolerância a fatores estressantes, como baixa disponibilidade hídrica, temperaturas extremas e salinidade dos solos, tornam-se imprescindíveis para o desenvolvimento de uma silvicultura moderna e capaz de atendar a demanda por produtos de origem florestal.

2.2 *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson

O eucalipto é cultivado em todo o mundo, fornecendo matéria-prima para múltiplos produtos, como para produção de celulose, madeira, ornamentação, cosméticos e uso medicinal (Mechergui et al., 2019). Pela sua boa adaptação a diferentes condições edafoclimáticas, aliada a alta produtividade, seu cultivo contribue para minimizar a pressão ambiental sob florestas nativas (Azevedo et al., 2016). *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson), anteriormente denominado como *Eucalyptus citriodora*, é cultivado por pequenos e médios produtores e, atualmente, tem despertado o interesse de grandes empresas do setor florestal (Souza et al., 2020). Trata-se de uma

espécie nativa de Queensland, Austrália, tolerante à seca e com crescimento moderado (Lin et al., 2017).

A espécie tem sido cultivada em diversos países, sendo uma das mais importantes espécies de eucalipto. Foi introduzida no país pela sua adaptação, crescimento e valor comercial da madeira (Reis et al., 2013), sendo utilizada para construção civil, por apresentar boa resistência mecânica, tolerância a rachaduras e boa durabilidade (Bernardi et al., 2012), apresenta, ainda, alta densidade e capacidade de brotação (Luz et al., 2018). Das suas folhas extrai-se o óleo essencial que é utilizado na produção de produtos de limpeza e aromatização de ambientes (Silva et al., 2012), bem como na indústria de cosméticos e perfumaria (Salem et al., 2018).

2.3 *Zeyheria tuberculosa* (Vell.) Bureau ex Verl.

Conhecida popularmente como bucho-de-boi, ipê-preto ou ipê-felpudo, *Zeyheria tuberculosa* (Vell.) Bureau ex Verl*.* é uma espécie pioneira, utilizada para recuperação de áreas degradadas, tendo um crescimento rápido, adaptada a estiagem e a solos com baixa fertilidade (Carvalho, 2005). Apresenta potencial silvicultural, com madeira de boa qualidade e, apesar de trabalhos de melhoramento serem incipientes, pesquisas têm sido conduzidas para avaliar o seu desempenho em sistemas agroflorestais, e o melhoramento genético está em fase inicial (Garuzzo et al., 2021).

O manejo silvicultural de ipê-felpudo pode suprir a demanda por madeira, preservar florestas e biodiversidade local, de forma que estudos para a compreensão do seu crescimento e desenvolvimento, principalmente, sob estresses abióticos são importantes (Mendonça et al., 2018). O Ipê-felpudo tem madeira com valor comercial, usada na construção civil, fabricação de móveis e no paisagismo (Lorenzi et al., 1998), o valor médio do m^3 em 2014/2015 variou entre R$103,00 e R$370,00 (Campos Filho e Sartorelli, 2015). No Brasil, é usada na medicina tradicional em tratamentos de câncer, dermatoses (Bastos et al., 2009) e tendo atividade curativa para cicatrizações (Sarmento et al., 2014). A espécie tem tolerância à secas temporárias e rápida velocidade de crescimento (Campos Filho e Sartorelli, 2015).

A espécie é encontrada em matas ciliares, ocorrendo distribuição espacial em áreas remanescentes próximas a plantações agrícolas, e pode ser utilizada para recuperação ambiental em áreas contaminadas com herbicida 2,4-D+ (Barroso et al., 2021), entretanto, a espécie é sensível às áreas com glifosato (Silva et al., 2020). *Z. tuberculosa* apresenta potencial para ser utilizada em áreas de reflorestamento (Pagano e Scotti, 2010) e em sistemas agroflorestais, e apresenta boa adaptação a condições adversas. Sua altura pode atingir entre 15 e 23 m, sendo propagada via sementes (Gonzales e Valeri, 2010). A espécie está na lista vermelha das espécies ameaçadas de extinção (Martinelli e Moraes, 2013).

2.4 Estresses abióticos na germinação de sementes florestais

As sementes estão expostas a estresses isolados ou combinados, que podem afetar a sua germinação, comprometendo o desenvolvimento, uniformidade e estabelecimento. Estudos conduzidos nos últimos anos com sementes florestais submetidas a estresses abióticos apontam que cada espécie possui sua particularidade, apresentando limites de tolerância variáveis em função do agente estressor e das condições a que são submetidas (Pereira et al., 2020).

A germinação de sementes é uma etapa complexa, sendo um processo em que o eixo embrionário retoma seu desenvolvimento originando uma plântula que, posteriormente, estabelecer-se-á no ambiente (Romero-Rodríguez et al., 2019). O estabelecimento é uma fase crítica para as plântulas, pois elas são vulneráveis a condições ambientais adversas (Gommers e Monte, 2018).

Diversos fatores podem influenciar o potencial fisiológico das sementes. Entre esses fatores, a temperatura influencia o total de germinação, a velocidade e a uniformidade do processo germinativo (Carvalho e Nakagawa, 2012), sendo que para cada espécie existe uma faixa ótima de temperatura (Matos et al., 2014), a qual é dependente das condições de ocorrência natural da espécie (Medeiros et al., 2017; Santos et al., 2017). Nessa faixa ótima, a porcentagem de germinação é maximizada em um menor período (Fallahi et al., 2015; Televičiūtė et al., 2020).

A salinidade do solo (ou do substrato de germinação) ou da água, também, influencia o processo germinativo e desenvolvimento de plântulas. Estima-se que 20% da área destinada a cultivos agrícolas, ou seja, mais 900 milhões de hectares têm problemas por salinidade (Zhu et al., 2019). A água é um dos fatores mais importantes no processo germinativo, estando envolvida em todas as fases da germinação e ativando as vias metabólicas para que o processo germinativo possa ocorrer (Marcos Filho, 2015).

Os estresses salino e hídrico apresentam semelhanças pois, na célula vegetal, limitam a absorção de água pela semente (Tavili et al., 2009). Para simular estresse hídrico, em geral, tem-se utilizado o polietilenoglicol 6000 (PEG 6000) o qual evita a absorção de água pela parede celular, devido ao seu elevado peso molecular (6.000 ou 8.000 g/mol) (Tabatabai et al., 2022), ocasionando um estado de seca fisiológica (Čanak et al., 2020).

Soluções com concentrações salinas elevadas impõem potenciais hídricos menores, e podem resultar em efeitos tóxicos de Na^+ e Cl^-, que são danosos às sementes e plântulas, dificultando a absorção de água e nutrientes essenciais (Subramanyam et al., 2011; Vicente et al., 2020). Ambientes salinos afetam mais sementes e plântulas em germinação do que mudas em crescimento (Din et al., 2019). As plantas podem se adaptar a altos níveis de sais no ambiente reduzindo o potencial osmótico do tecido, onde acumulam os solutos osmóticos (Munns e Tester, 2008). Ambientes salinos representam um desafio para pesquisadores e governos de todo o mundo, pois limitam a possibilidade de cultivo de várias espécies vegetais, podendo comprometer a oferta de produtos agrícolas e florestais para a população em crescimento.

Estudos sob germinação e crescimento inicial de mudas, podem elucidar diferenças sob o vigor das sementes e como elas se comportam para tolerar o estresse abiótico (Prazeres e Coelho, 2020). O déficit hídrico pode retardar ou inibir a germinação e comprometer o crescimento de mudas, dificultando o estabelecimento e uniformidade dos plantios, ocasionando redução na sobrevivência e produtividade das culturas (Baz et al., 2020). O processo germinativo das sementes é crítico para as espécies vegetais e o déficit hídrico durante esse processo afeta a porcentagem de germinação e o vigor do lote de sementes (Patanè et al., 2016).

A compreensão dos mecanismos que conferem a algumas espécies a capacidade de germinar sob condições críticas, como de estresse hídrico é essencial (Marcos Filho, 2015) para o manejo adequado das culturas e, pesquisas relacionadas à ecofisiologia de sementes, simulando estresses abióticos, de forma isolada e, ou combinada, são importantes pois permitem entender o comportamento das espécies e seus limites de tolerância, sobrevivência e adaptação à essas condições (Guedes et al., 2013).

2.5 Estresse hídrico em mudas florestais durante o estabelecimento inicial

A demanda por mudas florestais tem crescido e com isso há a necessidade de maximizar a produção de mudas destinadas a plantios comerciais ou de recomposição ambiental. Após o plantio, em campo ou em vasos, o déficit hídrico afeta o crescimento e desenvolvimento das mudas, sendo um dos estresses abióticos mais importantes (Bahmani et al, 2018) nesse estágio inicial. A escassez de água é o mais importante fator abiótico que afeta a fotossíntese e a produção de biomassa em plantas (Zlobin et al., 2018) e, quando submetidas ou expostas a estresses bióticos e, ou abióticos, as plantas usam mecanismos ou reações de defesas, em resposta ao fator estressante, ativando mecanismos fisiológicos, bioquímicos e, ou moleculares (Ghanbary et al., 2018).

Os mecanismos de defesas das plantas em respostas ao déficit hídrico são complexos, dependem da duração e intensidade do estresse e do estágio de desenvolvimento da planta (Dalal e Tripathy, 2018). Sob escassez de água as plantas respondem, por exemplo, através do fechamento estomático, acúmulo de solutos, redução da fotossíntese e de produção de biomassa (Hasanuzzaman et al., 2018). Temperaturas elevadas aumentam a evapotranspiração, diminuindo o potencial hídrico da planta e aumentando a severidade do estresse hídrico (Wu et al., 2018), durante o período de escassez das chuvas é comum se ter altas temperaturas em condições de clima tropical.

Para minimizar a perda de água, as plantas fecham os estômatos, reduzindo as trocas gasosas (Giordano et al., 2021), podendo ocorrer ajuste osmótico e ativação do metabolismo antioxidante, para minimizar o estresse

oxidativo (Mukarram et al., 2021). Também, aumentam a pressão osmótica para sustentar o fluxo de água com a redução do potencial hídrico do solo, produzem osmólitos como defesa, desviando os carboidratos que seriam utilizados no crescimento e alocação de biomassa (Polle et al., 2019)

Sob estresse hídrico, as plantas podem acumular espécies reativas de oxigênio (EROS), e iniciar processos oxidativos, degradação da clorofila, peroxidação lipídica e oxidação de proteínas (Sarker e Oba, 2018). Entretanto, as células vegetais têm mecanismo de defesa, como um sistema antioxidante para atenuar danos ocasionados por EROS, que auxilia na eliminação de EROS e mitiga seus impactos (Ahanger et al., 2017). Em ambientes sob déficit hídrico, as plantas aumentam os solutos, como a prolina, o que ajuda a regular a estabilidade da membrana e a manter o turgor (Hereme et al., 2020).

Esses mecanismos e estratégias de defesa podem influenciar na produção e no crescimento, sendo que a planta aloca carboidratos para minimizar e se adaptar ao nível do estresse, comprometendo o seu crescimento. Reduzir o crescimento é uma das primeiras estratégias da planta quando submetidas ao déficit hídrico (Giordano et al., 2021).

3 Referências

Ahanger MA, Tomar NS, Tittal M, Argal S, Agarwal RM. (2017) Plant growth under water/salt stress: ROS production; antioxidants and significance of added potassium under such conditions. **Physiology and Molecular Biology of Plants** 23:731-744. DOI: 10.1007/s12298-017-0462-7

Azevedo GTDOS, Azevedo GB, Souza AM, Mews CL, Sousa JRL (2016) Effect of hydrogel doses in the quality of Corymbia citriodora Hill & Johnson seedlings. **Nativa** 4:244-248. DOI: 10.31413/nativa.v4i4.3273

Bahmani M, Naghdi R, Kartoolinejad D (2018) Milkweed seedlings tolerance against water stress: Comparison of inoculations with Rhizophagus irregularis and Pseudomonas putida. **Environmental Technology & Innovation** 10:111-121. DOI: 10.1016/j.eti.2018.01.001

Barroso GM, Ferreira MG, Santos EA, Ferreira EA, Titon M, Xavier PVS, Francino DMT, Santos JBD (2021) Mabea fistulifera and Zeyheria tuberculosa can be indicated for phytoremediation programs of soils contaminated with hormonal herbicides. **International Journal of Phytoremediation**, p. 1-8, 2021. DOI:10.1080/15226514.2021.1991267

Bastos MLA, Lima MRF, Conserva LM, Andrade VS, Rocha EM, Lemos RP (2009). Studies on the antimicrobial activity and brine shrimp toxicity of *Zeyheria tuberculosa* (Vell.) Bur. (Bignoniaceae) extracts and their main constituents. **Annals of Clinical Microbiology and Antimicrobials** 8:1-6. DOI: 10.1186/1476-0711-8-16

Baz H, Creech M, Chen J, Gong H, Bradford K, Huo H (2020) Water-Soluble Carbon Nanoparticles Improve Seed Germination and Post-Germination Growth of Lettuce under Salinity Stress. **Agronomy** 10:1192. DOI: /10.3390/agronomy10081192

Bernardi MR, Sperotto Junior M, Daniel O, Vitorino, ACT (2012) Crescimento de mudas de *Corymbia citriodora* em função do uso de hidrogel e adubação. **Cerne**, 18:67-74. DOI: 10.1590/S0104-77602012000100009

Campos Filho EM, Sartorelli PAR (2015). **Guia de árvores com valor econômico**. São Paulo: Agroicone 139p.

Čanak et al. (2020). Is drought stress tolerance affected by biotypes and seed size in the emerging oilseed crop camelina?. **Agronomy** 10(12): 1856. DOI: 10.3390/agronomy10121856

Carvalho NM, Nakagawa J (2012) Sementes: ciência, tecnologia e produção. 5.ed. Jaboticabal: FUNEP, p.590.

Carvalho PER. (2005). Ipê-Felpudo. Embrapa Florestas-Circular Técnica (INFOTECA-E), p.8. < https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/290793/1/circtec112.pdf>

Cunha TQG, Santos AC, Novaes E, Hansted A LS, Yamaji FM, Sette Jr CR (2021) Eucalyptus expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers. **Biomass and Bioenergy** 144:105900. DOI: /10.1016/j.biombioe.2020.105900

Dalal VK Tripathy BC (2018) Water-stress induced downsizing of light-harvesting antenna complex protects developing rice seedlings from photo-oxidative damage. **Scientific reports** 8:1-16. DOI: 10.1038/s41598-017-14419-4

Din BU et al. (2019) Mechanistic elucidation of germination potential and growth of wheat inoculated with exopolysaccharide and ACC-deaminase producing Bacillus strains under induced salinity stress. **Ecotoxicology and environmental safety** 183:109466. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.109466

Dürr C, Dickie JB, Yang XY, Pritchard HW (2015) Ranges of critical temperature and water potential values for the germination of species worldwide: contribution to a seed trait database. **Agricultural and forest meteorology**, v. 200, p. 222-232, 2015. DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.09.024

Elli EF, Sentelhas PC, Freitas CH, Carneiro RL, Alvares CA (2019) Intercomparison of structural features and performance of Eucalyptus simulation models and their ensemble for yield estimations. **Forest Ecology and Management** 450:117493. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117493

Fallahi HR, Mohammadi M, Aghhavani-Shajari M, Ranjbar F (2015) Determination of germination cardinal temperatures in two basil (*Ocimum basilicum* L.) cultivars using non-linear regression models. **Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants** 2:140-145. DOI: 10.1016/j.jarmap.2015.09.004

Fitton N et al. (2019) The vulnerabilities of agricultural land and food production to future water scarcity. **Global Environmental Change** 58:101944. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2019.101944

Garuzzo MDSPB, Nunes ACP, Santos AP, Marques FG (2021) Genetic progress in the breeding population of *Zeyheria tuberculosa* (Ipê-felpudo): from theoretical predictions to clonal recombination orchard assembly. **Scientia Forestalis** 49:1-14. DOI: 10.18671/scifor.v49n131.18

Geng X, Zhang Y, Wang L, Yang X (2019) Pretreatment with high-dose gamma irradiation on seeds enhances the tolerance of sweet osmanthus seedlings to salinity stress. **Forests** 10:406. DOI: 10.3390/f10050406

Ghanbary E, Kouchaksaraei MT, Guidi L, Mirabolfathy M, Etemad V, Sanavi SAMM, Struve D (2018) Change in biochemical parameters of Persian oak (*Quercus brantii* Lindl.) seedlings inoculated by pathogens of charcoal disease under water deficit conditions. **Trees** 32:1595-1608. DOI: 10.1007/s00468-018-1736-6

Giordano M, Petropoulos SA, Cirillo C, Rouphael Y (2021) Biochemical, physiological, and molecular aspects of ornamental plants adaptation to deficit irrigation. **Horticulturae** 7:107. DOI: 10.3390/horticulturae7050107

Gommers CM, Monte E (2018) Seedling establishment: a dimmer switch-regulated process between dark and light signaling. **Plant physiology** 176:1061-1074. DOI: 10.1104/pp.17.01460

Gonçalves JL, Alvares CA, Rocha JH, Brandani CB, Hakamada R (2017) Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests: a Journal of Forest Science** 79:69-183. DOI: 10.2989/20702620.2016.1255415

Gonzales JLS, Valeri SV (2011) Prueba de la conductividad eléctrica en la evaluación fisiológica de la calidad de semillas *en Zeyheria tuberculosa*. **Bosque (Valdivia)** 32:197-202. DOI: /10.4067/S0717-92002011000200010

Guedes RS, Alves EU, Viana JS, Gonçalves EP, Lima CRD, Santos SDRND (2013) Germinação e vigor de sementes de *Apeiba tibourbou* submetidas ao estresse hídrico e diferentes temperaturas. **Ciência Florestal** 23:45-53.

Guo C, Shen Y, Shi F (2020) Effect of temperature, light, and storage time on the seed germination of Pinus bungeana Zucc. ex Endl.: The role of seed-covering layers and abscisic acid changes. **Forests** 11:300. DOI: 10.3390/f11030300

Hasanuzzaman M, Mahmud JA, Anee TI, Nahar K, Islam MT (2018) Drought stress tolerance in wheat: omics approaches in understanding and enhancing antioxidant defense. Abiotic stress-mediated sensing and signaling in **plants: an omics perspective**. p. 267-307.

Hereme R, Morales-Navarro S, Ballesteros G, Barrera A, Ramos P, Gundel PE, Molina-Montenegro MA (2020) Fungal endophytes exert positive effects on Colobanthus quitensis under water stress but neutral under a projected climate change scenario in Antarctica. **Frontiers in microbiology**11:264. DOI: 10.3389/fmicb.2020.00264

Indústria Brasileira De Árvores (IBÁ) – Relatório IBÁ, Dados setoriais (2021) 176p Disponível em < https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>

Jesus MS, Napoli A, Trugilho PF, Abreu ÁA, Martinez CLM, Freitas TP (2018) Energy and mass balance in the pyrolysis process of eucalyptus wood. **Cerne** 24:288-294. DOI: 10.1590/01047760201824032561

Lian C, Li Q, Yao K, Zhang Y, Meng S, Yin W, Xia X (2018) Populus ;trichocarpa PtNF-YA9, a multifunctional transcription factor, regulates seed germination, abiotic stress, plant growth and development in *Arabidopsis*. **Frontiers in plant Science** 9:954. DOI: 10.3389/fpls.2018.00954

Lin Y, Liu S, Luo J, Liu X, Lu W, Wang C, Arnold, RJ. (2017) Landrace origins and phenotypic diversity through seedling morphology in *Corymbia citriodora* subsp. citriodora. **Australian Forestry** 80:43-56. DOI: 10.1080/00049158.2016.1275494

Lorenzi H (1998). Arvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa. SP Plantarum.

Luz ODSL, Honório ABM, Fidelis RR, Nascimento IRD, Moraes CBD, Lea, TCADB (2018). Características para a seleção de matrizes de *Corymbia citriodora* visando a produção de madeira e óleo essencial. **Revista Árvore** 42:1-8. DOI: 10.1590/1806-90882018000100018

Marcos Filho J (2015) **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Londrina: Abrates, 2015. P. 659.

Martinelli G, Moraes MA (2013) **Livro vermelho da flora do Brasil**. - 1. ed. - Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 1100p. < https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/comunicacao/publicacoes/publicacoes-diversas/livro_vermelho_2018_vol1.pdf>

Matos ACB, Borges EEDL, Sekita, MC (2014) Production of reactive oxygen species in *Dalbergia nigra* seeds under thermal stress. **Journal of Seed Science** 36:282-289. DOI: 10.1590/2317-1545v36n3973

Mechergui K, Naghmouchi S, Alsubeie M, Khouja ML (2019). Micromorphological observation of eucalyptus seeds, multivariate statistical analyses and modeling of their germination under salt stress and osmotic constraint. **Cerne**. 25:156-171. DOI: 10.1590/01047760201925022635

Medeiros RLS, Souza VC, Azerêdo GA, Neto MAB, Silva Barbosa, A, Silva Oliveira IS (2017) Seed vigor and germination of facheiro plants (*Pilosocereus catingicola* (Gurke) Byles & Rowley Subsp. *Salvadorensis* (Werderm.) Zappi (Cactaceae) at different temperatures. **Semina: Ciências Agrárias** 38:2873-2885. DOI: 10.5433/1679-0359.2017v38n5p2873

Mendonça AR, Silva JC, Aozai TS, Silva ER, Santos JS, Binoti DHB, Silva GF (2018). Estimação da Altura Total de Árvores de Ipê Felpudo Utilizando Modelos de Regressão e Redes Neurais**. REVISTA BRASILEIRA DE BIOMETRIA** 36(1): 128-139. DOI: 10.28951/rbb.v36i1.154

Mukarram M, Choudhary S, Kurjak D, Petek A, Khan MMA (2021) Drought: Sensing, signalling, effects and tolerance in higher plants. **Physiologia Plantarum** 172:1291-1300. DOI: 10.1111/ppl.13423

Munns R, Teste M (2008) **Mechanisms of salinity tolerance**. Annu. Rev. Plant Biol., 59, 651-681.

Oliveira ALD, Borges LAC, Coelho MG, Barros DAD, Coelho LM (2020) Forest Replacement in Brazil: A Fundamental Policy for Forestry. **Floresta e Ambiente** 27:1-12. DOI: 10.1590/2179-8087.002118

Pagano MC, Scotti MR (2010) Effect of phosphorus fertilization on arbuscular mycorrhizal colonization of *Zeyheria tuberculosa* a native species in Brazil's forest. **Middle-East J Sci Res** 6:604-11.

Patanè C, Saita A, Tubeileh A, Cosentino SL, Cavallaro V (2016) Modeling seed germination of unprimed and primed seeds of sweet sorghum under PEG-induced water stress through the hydrotime analysis. **Acta Physiologiae Plantarum** 38:1-12. DOI: 10.1007/s11738-016-2135-5

Pereira TM, Santos HOD, Cunha ARD, Pelissari F, Pereira WV, Melo LAD. (2020) Does nitric oxide protect Eucalyptus urophylla seeds under salt stress conditions?. **Journal of Seed Science** 42. DOI: 10.1590/2317-1545v42236272

Polle A, Chen SL, Eckert C, Harfouche A (2019) Engineering drought resistance in forest trees. **Frontiers in Plant Science** 9:1875. DOI: 10.3389/fpls.2018.01875

Prazeres CS, Coelho CMM (2020). Osmolyte accumulation and antioxidant metabolism during germination of vigorous maize seeds subjected to water deficit. **Acta Scientiarum. Agronomy** 42. DOI: 10.4025/actasciagron.v42i1.42476

Reis CA., Assis TF, Santos AM, Paludzyszyn Filho E (2013) *Corymbia citriodora*: estado da arte de pesquisas no Brasil. Embrapa Florestas-Documentos (INFOTECA-E). < https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/974349/1/Doc.255ReisAinfo1.pdf>

Romero-Rodríguez MC, Jorrín-Novo JV, Castillejo MA (2019) Toward characterizing germination and early growth in the non-orthodox forest tree species Quercus ilex through complementary gel and gel-free proteomic analysis of embryo and seedlings. **Journal of proteomics** 197:60-70. DOI: 10.1016/j.jprot.2018.11.003

Salem MZ, Elansary HO, Ali HM, El-Settawy AA, Elshikh MS, Abdel-Salam E M, Skalicka-Woźniak K (2018) Bioactivity of essential oils extracted from *Cupressus macrocarpa* branchlets and *Corymbia citriodora* leaves grown in Egypt. **BMC complementary and alternative medicine** 18:1-7. DOI: 10.1186/s12906-018-2085-0

Santos MM, Ataíde GDM, Souza GAD (2017) Germination of seeds of *Melanoxylon brauna* Schott. under heat stress: production of reactive oxygen species and antioxidant activity. **Forests** 8: 405. DOI: 10.3390/f8110405

Sarker U, Oba S. (2018) Drought stress effects on growth, ROS markers, compatible solutes, phenolics, flavonoids, and antioxidant activity in Amaranthus tricolor. **Applied biochemistry and biotechnology** 186:999-1016. DOI: 10.1007/s12010-018-2784-5

Sarmento PA, Rocha Ataíde T, Barbosa APF, Araújo-Júnior JX, Lúcio IML, Assis Bastos ML (2014) Evaluation of the extract of Zeyheria tuberculosa with a view to products for wound healing. **Revista Latino-Americana de Enfermagem** 22:165. DOI: 10.1590/0104-1169.3143.2385

Scolforo HF. Mctague JP, Burkhart H, Roise J., Campoe, O, Stape, JL (2019) Eucalyptus growth and yield system: Linking individual-tree and stand-level growth models in clonal Eucalypt plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management** 432:1-16. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.08.045

Silva LDF, Castro NDE, Campos da Silva L (2021) Morphoanatomical and biochemical changes in *Zeyheria tuberculosa* exposed to glyphosate drift. **Botany** 99:91-98. DOI: 10.1139/cjb-2020-0150

Silva PHMD, Poggiani F, Ferraz ADV, Sixel RMDM, Brito JO (2012) Balanço nutricional, produção de óleo essencial e madeira de *Corymbia citriodora* Hill & Johnson com aplicação de lodo de esgoto e fertilizante mineral. **Ciência Florestal** 22:821-831. DOI: 10.5902/198050987563

Souza BM et al. (2020) Genotype-by-environment interaction in Corymbia citriodora (Hook.) KD Hill, & LAS Johnson progeny test in Luiz Antonio, Brazil. **Forest Ecology and Management** 460:117855. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117855

Subramanyam K, Sailaja KV, Subramanyam K, Rao DM, Lakshmidevi K (2011) Ectopic expression of an osmotin gene leads to enhanced salt tolerance in transgenic chilli pepper (*Capsicum annum* L.). **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)** 05:181-192. DOI: 10.1007/s11240-010-9850-1

Tabatabai SMT, Goshasbi F, Bakhshi B (2022). Evaluation of the effect of polyethylene glycol (PEG) on germination and morphological characteristics of bread wheat. **Cereal Research Communications**. DOI: 10.1007/s42976-022-00242-9

Tavili A, Zare S, Enayati A (2009) Hydropriming, ascorbic and salicylic acid influence on germination of Agropyron elongatum Host. seeds under salt stress. **Research Journal of Seed Science**2:16-22. DOI: 10.3923/rjss.2009.16.22

Televičiūtė D, Tarasevičienė Ž, Danilčenko H, Barčauskaitė K, Kandaraitė M, Paulauskienė A (2020) Changes in chemical composition of germinated leguminous under abiotic stress conditions. **Food Science and Technology** 40:415-421. DOI: 10.1590/fst.23019

Teshome DT, Zharare GE, Naidoo S (2020). The threat of the combined effect of biotic and abiotic stress factors in forestry under a changing climate. **Frontiers in plant Science** 11:1874. DOI: 10.3389/fpls.2020.601009

Vicente MJ, Martínez-Díaz E, Martínez-Sánchez JJ, Franco JA, Bañón S, Conesa E (2020) Effect of light, temperature, and salinity and drought stresses on seed germination of *Hypericum ericoides*, a wild plant with ornamental potential. **Scientia Horticulturae** 270:109433. DOI: 10.1016/j.scienta.2020.109433

Wu Guilin et al. (2018) Differential responses of stomata and photosynthesis to elevated temperature in two co-occurring subtropical forest tree species. **Frontiers in plant Science** 9:467. DOI: 10.3389/fpls.2018.00467

Zhu G, An L, Jiao X, Chen X, Zhou G, Mclaughlin, N (2019) Effects of gibberellic acid on water uptake and germination of sweet sorghum seeds under salinity stress. **Chilean journal of agricultural research** 79:415-424. DOI: 10.4067/S0718-58392019000300415

Zlobin IE, Ivanov YV, Kartashov AV, Sarvin BA, Stavrianidi AN, Kreslavski VD, Kuznetsov VV (2019) Impact of weak water deficit on growth, photosynthetic primary processes and storage processes in pine and spruce seedlings. **Photosynthesis research** 139:307-323. DOI: 10.1007/s11120-018-0520-1

CAPÍTULO 2 - Estresses hídrico e salino afetam diferencialmente a germinação de sementes de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson dentro da faixa ótima de temperatura para o processo germinativo

Resumo – *Corymbia citriodora* é propagado, principalmente via sementes, dada a dificuldade de propagação vegetativa em escala comercial. É uma espécie que tem potencial para plantio em regiões de menor pluviosidade e, atualmente, o interesse pela espécie é crescente no Brasil. É previsto que a ocorrência de estresses abióticos será cada vez mais frequente, o que pode limitar a germinação de sementes e o desenvolvimento de plantas em condições naturais e, ou de plantios. O déficit hídrico é o principal fator estressor que causa a redução no desenvolvimento do eucalipto, mas os estresses salino e térmico também devem ser considerados. Assim, o objetivo da pesquisa foi avaliar os efeitos dos estresses térmico, hídrico e salino no processo germinativo de sementes de *C. citriodora*. Três experimentos foram realizados em laboratório submetendo-se as sementes à germinação sob: 1) diferentes temperaturas: 20, 25, 30, 35 e 40 ºC, 2) sob déficit hídrico simulado com polietilenoglicol (PEG 6000) nas temperaturas de 25 e 30 ºC e 3) sob estresse salino simulado com NaCl nas temperaturas de 25 e 30 ºC. De acordo com os resultados, as temperaturas de 25 e 30 ºC foram adequadas para a germinação de sementes; a porcentagem e a velocidade de germinação diminuíram com o aumento do estresse hídrico e salino, mas de forma mais acentuada sob déficit hídrico a 30 ºC. O limite de tolerância das sementes ao déficit hídrico está entre -0,6 e -0,8 MPa, tanto a 25 quanto a 30 ºC, e ao estresse salino entre -1,4 e -1,6 MPa, a 25 ºC, e entre -1,2 e -1,4 MPa, a 30 ºC. Portanto, a germinação de sementes de *C. citriodora* tem sensibilidade diferenciada ao déficit hídrico e salino, sendo mais prejudicada pelo déficit hídrico.

Palavras-chave: eucalipto, potencial fisiológico, abióticos, plântulas.

1 Introdução

No Brasil, a área de florestas comerciais de eucaliptos representa 78,2% dos 9,55 milhões de hectares (Ibá, 2021). Este grupo de espécies apresenta vantagens em comparação às espécies nativas e sobre outras espécies exóticas, tendo passado por constantes processos de melhoramento genético desde a sua introdução no Brasil (Gonçalves et al., 2017). Empresas de grande e médio porte utilizam a propagação vegetativa para acelerar a produção de mudas, entretanto, algumas espécies apresentam resistência ao enraizamento, resultando em baixa formação de mudas clonais (Lima et al., 2021), a exemplo de *Corymbia citriodora*.

C. citriodora tem importância econômica no mundo, sendo usada para produção de madeira maciça, energia, madeira para tratamento (mourões e postes) e construção civil (Abraf, 2010). Das folhas, são extraídos óleos essenciais, vastamente empregados na indústria química e farmacêutica (Lin et al., 2019). No Brasil, a espécie é mais difundida entre pequenos produtores, mas o interesse pela mesma tem aumentado, principalmente, como fonte de tolerância à seca (Silva et al., 2018). Também, no Brasil há condições favoráveis ao crescimento de *C. citriodora* e de outras espécies do gênero (Silva et al., 2022). Contudo, a espécie apresenta dificuldade de enraizamento na propagação por estacas, o que restringe essa forma de multiplicação em escala comercial e, assim, estudos sobre o comportamento germinativo e desempenho de plantas sobre condições adversas tornam-se importantes.

Diversos fatores podem influenciar o processo germinativo, sendo que a habilidade de germinar em uma faixa ampla de condições é definida como potencial fisiológico das sementes (Simoni et al., 2011). Sob condições estressantes, como de déficit hídrico, salinidade e temperaturas adversas, as plantas ativam mecanismos de defesa buscando adaptação e sobrevivência (Wang et al., 2019).

A temperatura afeta o potencial fisiológico, influenciando na absorção de água pela semente que, por consequência, regula uma série de reações metabólicas envolvidas não apenas no processo germinativo, mas, também, no desenvolvimento pós-seminal (Carvalho e Nakagawa, 2012). Temperaturas acima do ideal, associadas ao déficit hídrico, têm efeitos prejudiciais potencializados sobre o desenvolvimento vegetal (Hu et al., 2018; Jumrani e Bhatia, 2018). A falta de água limita o crescimento e pode ameaçar o estabelecimento das mudas no campo (Soares et al., 2022). A salinização ocorre com maior frequência em regiões tropicais de clima quente e seco, caracterizado por elevadas taxas de evapotranspiração (Valladares, 2009). Estima-se que 20% do planeta e mais de 50% das terras serão salinizadas até 2050, incluindo planícies costeiras (Jamil et al., 2011).

Nos ambientes com salinidade, ocorre uma indução do déficit hídrico com a redução do potencial hídrico, associado ao acúmulo de Na^+ e Cl^- que limitam a germinação de sementes e comprometem a sobrevivência das

plantas, as quais desenvolvem estratégias fisiológicas para a eficiência do uso da água e redução do estresse oxidativo (Causin et al., 2020). Concentrações elevadas de NaCl originam estresse hiperiônico e hiperosmótico, através do acúmulo de Na+, ocasionando a perda de turgor, reduzindo o crescimento, a inativação do transporte fotossintético de elétrons, interrupção das atividades enzimáticas com aumento de H_2O_2 e peroxidação lipídica (Jajoo, 2013).

Estudos com combinação de estresses são importantes, pois representam melhor as condições reais nas quais as sementes são expostas (Borjas-Ventura et al., 2019). Isto é ainda mais relevante no caso de espécies perenes, como as florestais, que devido ao ciclo longo são expostas a diferentes condições e fatores estressantes ao longo do ciclo produtivo.

Uma das técnicas utilizadas em laboratórios para simular as condições de estresse hídrico é o uso de soluções aquosas com diferentes potenciais osmóticos, que podem ocasionar redução, atraso ou inibição na germinação e/ou crescimento das plântulas. Diversos compostos químicos têm sido utilizados na simulação de estresses abióticos, dentre eles o NaCl, agente osmótico, que ocasiona a restrição hídrica, dependendo da concentração (Pereira et al., 2020; Sá-Martins et al., 2019). Para simular o estresse hídrico na germinação, tem sido utilizado o polietilenoglicol (PEG), o qual associado ao seu alto peso molecular (6.000 ou 8.000 g/mol), impede a absorção de água e que ela penetre na parede celular (Tabatabai et al., 2022).

Estudos sobre germinação de sementes de *C. citriodora* sob condições simuladas de estresses térmico, hídrico e salino, são relativamente escassos. Compreender a capacidade das sementes da espécie em germinar sob condições adversas pode ser vantajoso para a seleção de genótipos tolerantes à essas condições. A nossa hipótese é que a capacidade germinativa de sementes de *Corymbia citriodora* é afetada diferencialmente em função do tipo de estresse abiótico e com isto, o objetivo da pesquisa foi avaliar os efeitos do estresse térmico, hídrico e salino na germinação e estabelecer os limites de tolerância aos estresses hídrico e salino, durante o processo germinativo.

2 Material e Métodos

Sementes de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson foram coletadas de árvores remanescentes de um teste de progênies de polinização aberta, com 40 anos de idade, instalado no município de Jaboticabal, Estado de São Paulo (21°15' S, 48°19' W, 605 M A.S.L.), cuja classificação climática de Köppen para a região é Cwa (Alvares et al., 2013). O teste de progênie passou por uma seleção fenotípica individual, restando as 150 melhores árvores.

Após a colheita de frutos em 15 dessas árvores, esses foram secos em ambiente semi-sombreado para posterior extração e beneficiamento manual das sementes. Amostras dessas sementes foram misturadas e homogeneizadas para a formação de um único lote de sementes. Inicialmente, determinou-se o grau de umidade das sementes pelo método da estufa a 105 ± 3 °C por 24 horas (Brasil, 2009), em cinco amostras de 50 sementes.

2.1 Experimento 1 - visando determinar a temperatura ótima para o processo germinativo da espécie as sementes foram submetidas à germinação nas temperaturas constantes de 20, 25, 30, 35 e 40 °C. As sementes foram distribuídas sobre duas folhas de papel mata-borrão, umedecidas com água deionizada ao equivalente a 2,5 vezes a massa do papel não hidratado, acondicionadas em caixas de plástico transparentes (11 x 11 x 3 cm) que foram envoltas em sacos de plástico para a manutenção da umidade do substrato. Cada tratamento foi constituído de quatro repetições de 50 sementes, mantidas em câmaras de germinação reguladas para as temperaturas desejadas com fotoperíodo de 8 horas. Foram realizadas contagens diárias das sementes germinadas, entre o 3º e o 14º dia após a instalação do teste (Brasil, 2009).

Ao final do teste, determinou-se a porcentagem de germinação; índice de velocidade de germinação (IVG) de acordo com Maguire (1962); comprimento da raiz, da parte aérea e total de plântulas e a massa seca das plântulas, de acordo com Labouriau e Valadares (1976).

2.2 Experimento 2 – As sementes de *C. citriodora* foram submetidas à germinação sob seis potenciais hídricos (0,0; -0,2; -0,4; -0,6; -0,8 e -1,0 MPa)

nas temperaturas constantes de 25 e 30 ºC, consideradas ótimas para o processo germinativo com base nos resultados do Experimento 1. Os potenciais hídricos estudados foram obtidos com o uso de soluções aquosas de polietilenoglicol (PEG 6000), preparadas segundo recomendações de Villela et al. (1991). Foram usadas quatro repetições de 50 sementes por tratamento, e o experimento seguiu os mesmos procedimentos do Experimento 1, mas, avaliando-se ao final a porcentagem e a velocidade de germinação.

2.3 Experimento 3 - As sementes de *C. citriodora* foram colocadas para germinar em substrato umedecido com soluções aquosas de cloreto de sódio (NaCl) para simular o estresse salino, nos seguintes potenciais osmóticos: 0,0 (controle), - 0,2; - 0,4; - 0,6; - 0,8; - 1,0; - 1,2; - 1,4 e – 1,6 MPa. Para obtenção da solução de NaCl foi utilizada a equação de van't Hoff:

$$\Psi s = -iRTC$$

em que:

i = fator de dissociação (para NaCl, i = 2)

R = constante dos gases (R = 8,32 J mol^{-1} K^{-1});

T = temperatura absoluta, em graus Kelvin;

C = concentração de solutos na solução, expressa como osmolalidade (moles de solutos totais dissolvidos por litro de água - mol L^{-1}).

O experimento foi conduzido com quatro repetições de 50 sementes por tratamento, seguindo-se os mesmos procedimentos do Experimento 1 e avaliando-se ao final a porcentagem e a velocidade de germinação.

2.4 Análise dos dados

Os três experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições de 50 sementes por tratamento. No experimento 1, os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, com o uso do software AgroEstat® (Barbosa e Maldonado Júnior, 2015).

Nos experimentos 2 e 3, os dados foram submetidos à análise de variância e comparação de médias entre temperaturas, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, com o auxílio do software AgroEstat® (Barbosa e

Maldonado Júnior, 2015), e regressão não linear, com o auxílio do software Microcal Origin® versão 8.0 para os efeitos de potenciais hídricos ou salinos.

Para descrever o comportamento germinativo e IVG em função dos potenciais hídricos, utilizou-se um modelo logístico não linear (logística 1), conforme apresentado em Azerêdo et al. (2016):

$$y = a/(1 + e^{-k(x-xc)})$$

em que:

y= valor da característica para um determinado valor de x (potencial hídrico);

a= valor máximo da característica y;

k= taxa relativa de crescimento (no caso presente de redução de y);

xc= valor de x (potencial hídrico) que proporciona uma redução no valor máximo da característica em 50%.

3 Resultados

As sementes apresentaram grau de umidade de 11,6%. No experimento 1, as temperaturas de 20, 25 e 30 ºC mostraram-se adequadas para a germinação das sementes de *C. citriodora*, a qual reduziu significativamente a 35 ºC e foi totalmente inibida a 40 ºC (Tabela 1). Entretanto, as temperaturas de 25 e 30 ºC proporcionaram maiores velocidade de germinação (IVG) em relação às demais temperaturas. Os comprimentos da parte aérea (CPA), da raiz (CRaiz) e total das plântulas (CTP) foram maiores na faixa de 20 a 30 °C, mas a massa seca de plântulas (MSP) foi superior a 25 ºC, embora sem diferir da temperatura de 30 °C.

Tabela 1. Germinação (%), índice de velocidade de germinação (IVG), comprimento (mm plântula^{-1}) de raiz (CRaiz), da parte aérea (CPA) e total de plântulas (CTP) e massa seca das plântulas (MSP, g plântula^{-1}) obtidos a partir de sementes de *C. citriodora* submetidas a diferentes temperaturas.

	Temperaturas (°C)					
	20	25	30	35	40	CV(%)
Germinação	87a	88a	88[a]	52b	0c	9,49
IVG	8,85b	20,92a	21,84[a]	9,84 b	0c	16,05
CRaiz	19,69a	22,66a	20,85[a]	10,98b	0c	10,80
CPA	22,40a	22,31a	24,47[a]	14,11b	0c	7,34
CTP	42,09a	44,97a	45,32[a]	25,09b	0c	6,58
MSP	0,0033b	0,0058a	0,0037ab	0,0029b	0c	31,71

Médias seguidas por letras iguais, para cada característica, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV (%) – coeficiente de variação experimental.

A interação temperaturas e potenciais hídricos foi significativa para porcentagem e velocidade de germinação, observando-se redução nessas duas características à medida que o potencial hídrico diminuiu, mas de forma mais acentuada para o IVG a 30 °C (Figura 1).

A porcentagem de germinação foi de, aproximadamente, 90% nos potenciais hídricos de 0,0, -0,2 e -0,4 MPa, mas com diferença significativa entre as temperaturas apenas a -0,6 MPa, em que a temperatura de 25 ºC proporcionou maior porcentagem de germinação que a temperatura de 30º C. A 25 ºC, observou-se germinação até -0,8 MPa, ao passo que a 30 ºC a germinação ocorreu até -0,6 MPa. Em ambas as temperaturas, a redução na germinação ocorreu a partir de -0,4 MPa, mas de forma mais intensa a 30 °C. Os potenciais de -0,6 MPa, para a temperatura de 30 °C, e -0,7 MPa a 25°C, proporcionaram redução de 50% na porcentagem máxima de germinação, observada a 0,0 MPa.

A temperatura de 30 ºC favoreceu o IVG no tratamento controle (0,0 MPa), porém com o aumento do estresse hídrico essa temperatura foi mais prejudicial que a de 25 ºC, proporcionando queda expressiva no IVG já a -0,2 MPa. A -0,2 e -0,4 MPa, a temperatura de 25 ºC proporcionou maior IVG que a temperatura de 30º C. De forma geral, o IVG mostrou maior sensibilidade ao estresse hídrico, comparativamente à porcentagem de germinação, independentemente da temperatura. Os potenciais de -0,2 MPa, para a temperatura de 30 °C, e -0,4 MPa em 25°C, proporcionaram redução de 50% no IVG máximo observado a 0,0 MPa.

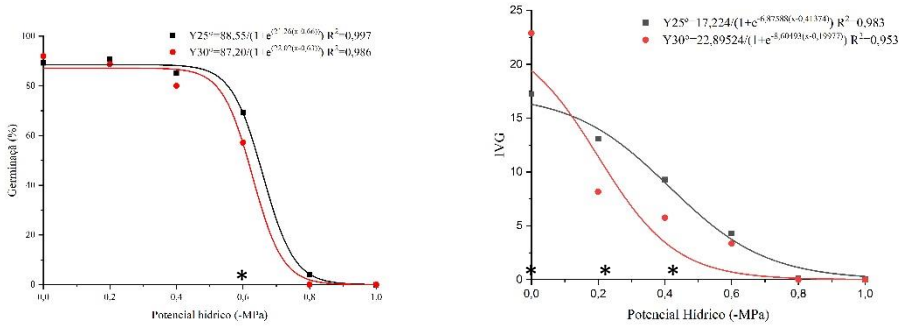

Figura 1. Equações que estimam a germinação (G, %) e índice de velocidade de germinação (IVG) de sementes de *C. citriodora* submetidas a déficit hídrico induzido por PEG 6000, a 25 e 30 °C. (* - indica potenciais hídricos onde houve diferenças significativas ($p<0,05$) entre as temperaturas).

Sob estresse salino, a interação entre temperaturas e potenciais osmóticos foi significativa apenas para porcentagem de germinação. De forma diferenciada ao observado sob estresse hídrico, diferenças entre temperaturas, quando observadas, foram favoráveis à temperatura de 30 ºC. A germinação foi superior a 90% a 0,0 MPa e manteve-se próxima a 90% até -0,4 MPa, com queda acentuada a partir de -0,6 MPa. A temperatura de 30 ºC proporcionou germinação superior a de 25º C nos potenciais -0,6, -0,8 e -1,0 MPa. Os potenciais osmóticos de -0,8 MPa, para a temperatura de 25 °C, e -1,0 MPa a 30 °C, proporcionaram redução de 50% na germinação máxima, observada a 0,0 MPa (Figura 2), sendo que o limite de tolerância ao estresse salino está entre -1,4 e -1,6 MPa a 25 ºC e entre -1,2 e -1,4 MPa a 30 ºC.

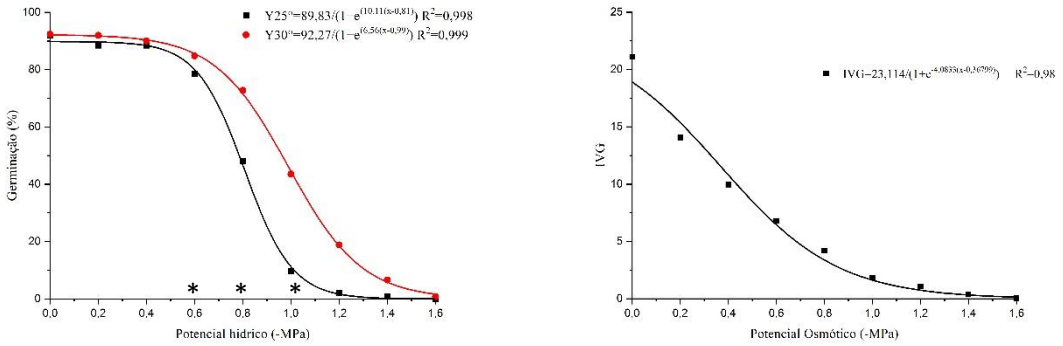

Figura 2. Equações que estimam a germinação (G, %) e índice de velocidade de germinação (IVG) de sementes de *C. citriodora* submetidas a estresse salino induzido por NaCl, a 25 e 30 °C. (* - indica potenciais hídricos onde houve diferenças significativas ($p<0,05$) entre as temperaturas).

O IVG foi influenciado apenas pelos potenciais osmóticos, mas não pelas temperaturas (Figura 2), e reduziu à medida que o estresse salino aumentou, sendo essa redução mais expressiva até -0,6 MPa, na média das duas temperaturas. O potencial osmótico de -0,4 MPa proporcionou redução de 50% no valor máximo do IVG. Assim, tanto no experimento com estresse hídrico como no de estresse salino, o IVG foi mais afetado e demonstrou-se mais sensível que a porcentagem de germinação, com a queda expressiva a partir de -0,2 MPa.

4 Discussão

As sementes são fundamentais para a regeneração e reprodução das plantas (Commander et al., 2017), porém podem estar expostas a diferentes fatores estressantes, a exemplo de extremos de temperatura, que afetam a velocidade, uniformidade e o total da germinação. O IVG é um atributo essencial que pode proporcionar um benefício competitivo às sementes (Jiménez-Alfaro et al., 2016), sendo que lotes de sementes com maior IVG podem ter vantagens, como germinar em condições adversas e se estabelecer. Espécies que têm a capacidade de germinação das sementes em condições de estresses abióticos, apresentam algumas vantagens ecológicas em relação a outras mais sensíveis (Martins et al., 2014), como estabelecimento das plântulas, maior uniformidade e a sua capacidade de sobreviver as adversidades.

As sementes de *C*. *citriodora* apresentaram comportamentos diferentes nas temperaturas avaliadas, sendo as temperaturas de 25 e 30 °C as mais adequadas, resultado um pouco diferente do reportado por Afonso et al. (2018), que relataram que a faixa ótima de temperatura de sementes de espécies de eucalipto é entre 25 e 35 °C. As exigências quanto à temperatura para germinação das sementes podem variar de acordo com as temperaturas encontradas na região de ocorrência da planta matriz, podendo, também, estar associadas ao grau de maturidade e às condições climáticas durante o processo de formação da semente.

A temperatura de 35 ºC proporcionou redução no IVG e a de 40 ºC inibiu por completo o processo germinativo, o que corrobora com as afirmações de Yang et al. (2019) de que temperaturas elevadas podem inibir ou iniciar a dormência secundária em sementes, reduzindo a germinação ou desacelerando o crescimento da radícula, dificultando a absorção de água pela plântula. Altas temperaturas podem inativar as enzimas, danificar as membranas e afetar a síntese de proteínas, resultando em menor germinação e estabelecimento de plantas (Fahad et al., 2017).

O maior IVG constatado nas temperaturas de 25 e 30 °C, em relação ao observado na temperatura de 20 °C, provavelmente se deve a maior manifestação do potencial fisiológico das sementes, uma vez que temperaturas

mais baixas diminuem a atividade metabólica. Cochrane (2017) estudou o impacto de temperaturas na germinação de 26 espécies de eucalipto e verificou que a temperatura ótima média para germinação de grande parte das espécies está na faixa de 15 a 30 °C. Apesar de a germinação acontecer numa faixa de temperatura, em temperatura ótima as sementes manifestam o seu máximo potencial fisiológico, proporcionando maiores velocidades, uniformidade e porcentagem de germinação (Sbrussi e Zucareli, 2014; Dürr et al., 2015).

Temperaturas mais elevadas ou mais baixas, em relação às ótimas tendem a diminuir o potencial fisiológico das sementes retardando o processo de germinação (Barros et al., 2017). Sementes que conseguem germinar mais rapidamente têm, portanto, maior probabilidade de sobreviver no campo (Lucchese et al., 2018).

Ainda, dentro de certos limites, temperaturas mais elevadas proporcionam maior velocidade do processo germinativo, porém esse aumento nem sempre está associado a maior porcentagem de germinação. Alguns estudos indicam que um aumento de temperatura pode afetar diversos processos bioquímicos e, ou fisiológicos nas sementes, alterando o potencial fisiológico (Martins et al., 2017). As espécies de eucalipto germinam em uma ampla faixa térmica, o que sugere que essas espécies têm ampla adaptação à variação climáticas (Cochrane, 2017).

Temperaturas mais elevadas podem aumentar a velocidade de germinação em sementes vigorosas, mas a porcentagem de germinação pode ser menor em temperaturas superiores (Carvalho e Nakagawa 2012). Temperaturas ótimas estimulam o processo de germinação, enquanto temperaturas baixas ou elevadas prejudicam o metabolismo das sementes. Neste estudo, as temperaturas de 25 e 30 °C proporcionaram maior potencial fisiológico e por isto foram escolhidas para os ensaios sob estresse hídrico e salino.

O déficit hídrico tem se tornado cada vez mais frequente nos últimos anos, pela escassez de chuvas ou pelo aumento de solutos no solo, ocasionando perdas na produtividade de muitas espécies cultivadas. Quando o mesmo ocorre durante o processo germinativo, pode provocar perda total ou

parcial do lote de sementes, pois essas são sensíveis ao estresse hídrico (Chamorro e Moreno, 2019). Os limites de tolerância ao déficit hídrico na germinação são variáveis entre as espécies vegetais. Martins et al. (2014) observaram queda expressiva na germinação de sementes de *C. citriodora* a partir de -0,4 MPa e com inibição total da germinação a -0,8 MPa, resultados semelhantes aos obtidos no presente trabalho.

Esta queda na germinação pode ser devida à falta de água que afeta as reações bioquímicas, quebra hidrolítica de proteínas, lipídios e carboidratos nos tecidos de armazenamento de sementes em germinação (Abido e Zsombik, 2018). O estresse hídrico pode aumentar o acúmulo de ácido abscísico nas sementes, o que pode resultar na redução da germinação, inibição do crescimento radicular e da absorção de água (Liu et al., 2019).

Assim como o déficit hídrico, a salinidade dos solos, também, é crescente nas áreas agrícolas, devido principalmente à presença de sais na água de irrigação ou nos fertilizantes, afetando diversos processos fisiológicos de crescimento e desenvolvimento das plantas. Estudos têm demonstrado que a germinação de sementes de algumas espécies de eucaliptos é menos afetada pela salinidade do que pelo estresse hídrico (Cleiton José et al., 2016; Mechergui et al., 2019), embora esta resposta dependa da intensidade do estresse. De fato, Martins et al. (2014) não observaram diferença significativa entre os agentes osmóticos (PEG 6000 e NaCl) na germinação de *C. citriodora*.

No presente estudo, o estresse hídrico afetou mais a germinação do que o estresse salino, o que, de acordo com Lucchese et al. (2018), pode estar relacionado à natureza química do PEG-6000 e a sua influência sobre a parede celular, já que suas moléculas são grandes e não passam facilmente pela parede celular, diminuindo a absorção de água pela semente e retardando a ativação do metabolismo comprometendo a germinação (Cavallaro et al., 2016).

O NaCl atua de duas formas durante a germinação: com inibição total do processo de germinação, com níveis de salinidade que extrapolam os limites de tolerância, ou, retardando a germinação com níveis de salinidade abaixo desse limite (Laghmouchi et al., 2017). O índice velocidade de germinação foi mais afetado do que a germinação, seja pelo estresse salino ou pelo hídrico.

Isso está de acordo com o observado por Andréo-Souza et al. (2010), que citam que a velocidade de germinação pode ser considerada como a primeira variável afetada pela escassez de água. Dessa forma, embora o total de germinação não seja tão afetado, com a redução da velocidade de germinação as sementes serão expostas por mais tempo a fatores bióticos e abióticos de estresse (Martins et al., 2014), o que poderá comprometer o estande de plantas nos campos de produção ou a regeneração das espécies em ambientes naturais. Também, por reduzir o potencial fisiológico, no campo as sementes ficam mais expostas a patógenos.

Níveis mais elevados de estresse induzidos por NaCl não comprometeram a germinação pela barreira osmótica externa que impedia a absorção de água, mas possivelmente em decorrência do efeito tóxico pelo acúmulo de íons de Na+ e Cl- (Cavallaro et al., 2016). Para sustentar o crescimento e desenvolvimento, é essencial manter os níveis reduzidos de íons de sódio (Zhang et al., 2012). Em ambientes com altas concentrações salinas, as células podem armazenar o Na^+ nos vacúolos, minimizando a toxidade iônica e reduzindo o potencial osmótico celular (Guo et al., 2019), o que pode retardar a germinação, mas se a concentração de Na^+ for alta, a germinação poderá ser totalmente inibida.

5 Conclusão

A germinação de sementes de *Corymbia ciriodora* é favorecida nas temperaturas de 25 e 30 ºC, as quais proporcionam maior potencial fisiológico. Os estresses hídrico e salino afetam a germinação das sementes de *C citriodora*, e de maneira mais expressiva em temperaturas mais elevadas (30 ºC), mesmo dentro da faixa ótima de temperatura para o processo germinativo. O estresse hídrico é mais prejudicial ao processo germinativo do que o estresse salino e o limite de tolerância das sementes de *C. citriodora* para germinação sob estresse hídrico está entre -0,6 e -0,8 MPa, a 25 ou a 30 ºC, e sob estresse salino entre -1,4 e -1,6 MPa a 25 ºC e entre -1,2 e -1,4 MPa a 30 ºC, mas potenciais hídricos de -0,6 MPa e salino de -0,6 a -0,8 MPa, proporcionam redução de 50% na capacidade máxima de germinação de sementes.

6 Referências

Abido WAE, Zsombik L (2018) Effect of water stress on germination of some Hungarian wheat landraces varieties. **Acta Ecologica Sinica** 38: 422-428. DOI: 10.1016/j.chnaes.2018.03.004

Abraf – Associação Brasileira dos Produtores de Florestas Plantadas. Anuário Estatístico - 2010. Ano base 2009. Brasília, DF: ABRAF. 140p. < http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3906/anuario-ABRAF-2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Affonso CE, Silva GZD, Jeromini TS, Martins CC (2018). Germination test of *Eucalyptus phaeotricha* seeds. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 22: 653-657. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n9p653-657

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Moraes Gonçalves JL, Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift** 22: 711-728. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507

Andréo-Souza YARA, Pereira AL, Silva FFSD, Riebeiro-Reis RC., Evangelista MRV, Castro RDD, Dantas BF (2010) Efeito da salinidade na germinação de sementes e no crescimento inicial de mudas de pinhão-manso. **Revista Brasileira de Sementes** 32: 83-92. DOI: 10.1016/j.chnaes.2018.03.004

Azerêdo GD, Paula RC, Valeri SV (2011) Temperatura e substrato para a germinação de sementes de *Piptadenia moniliformis* Benth. **Scientia Forestalis** 39(92): 479-488. DOI: 10.5902/1980509821112

Barbosa JC, Maldonado Junior W (2015) **Agroestat**: sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos. Jaboticabal, FCAV/UNESP*:* 396p.

Barros RTD, Martins CC, Silva GZD, Martins D (2017) Origin and temperature on the germination of beggartick seeds. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 21: 448-453. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v21n7p448-453

Borjas-Ventura R, Ferraudo AS, Martínez CA, Gratão PL (2020) Global warming: Antioxidant responses to deal with drought and elevated temperature in *Stylosanthes capitata*, a forage legume. Journal of Agronomy and Crop Science 206(1): 13-27. DOI: 10.1111/jac.12367

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária., 2009. Regras para análise de sementes 399p.

Carvalho NM, Nakagawa J (2012) Sementes: ciência, tecnologia e produção. 5.ed. Jaboticabal: FUNEP, 590p.

Causin HF, Bordón DA, Burrieza H (2020) Salinity tolerance mechanisms during germination and early seedling growth in *Chenopodium quinoa* Wild. Genotypes with different sensitivity to saline stress**. Environmental and Experimental Botany** 172: 103995. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2020.103995

Cavallaro V, Barbera AC, Maucieri C, Gimma G, Scalisi C, Patanè C (2016) Evaluation of variability to drought and saline stress through the germination of different ecotypes of carob (*Ceratonia siliqua* L.) Using a hydrotime model. **Ecological Engineering** 95: 557-566. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.06.040

Chamorro D, Moreno JM (2019) Effects of water stress and smoke on germination of *Mediterranean shrubs* with hard or soft coat seeds. **Plant Ecology** 220(4-5): 511-521. DOI: 10.1007/s11258-019-00931-2

Cleiton José A, Silva NCN, Faria JMR, Pereira WVS (2016). Influence of priming on *Eucalyptus* spp seeds' tolerance to salt stress. **Journal of Seed Science** 38(4):329-334. DOI: 10.1590/2317-1545v38n4165060

Cochrane A (2017) Modelling seed germination response to temperature in *Eucalyptus* L'Her. (Myrtaceae) species in the context of global warming. **Seed Science Research** 27: 99. DOI: 10.1017/S0960258517000010

Commander LE, Golos PJ, Miller BP, Merritt DJ (2017) Seed germination traits of desert perennials. **Plant Ecology** 218:1077-1091. DOI: 10.1007/s11258-017-0753-7

de Sá-Martins R, Cleiton-José A, Rocha-Faria JM, de Melo LA (2019). Effect of water and salt stress on seeds germination and vigor of different eucalyptus species**. Journal Of Tropical Forest Science** 31(1): 12-18. DOI: 10.26525/jtfs2019.31.1.012018

Dürr C, Dickie JB, Yang XY Pritchard HW (2015). Ranges of critical temperature and water potential values for the germination of species worldwide: contribution to a seed trait database. **Agricultural and forest meteorology** 200: 222-232. DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.09.024

Fahad et al. (2017). Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. Frontiers in plant science, 1147. DOI: 10.3389/fpls.2017.01147

Gonçalves JL, Alvares CA, Rocha JH, Brandani CB, Hakamada R (2017) Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests: a Journal of Forest Science** 79: 169-183. DOI: 10.2989/20702620.2016.1255415

Guo J, Dong X, Han G, Wang B (2019) Salt-enhanced reproductive development of *Suaeda salsa* L. coincided with ion transporter gene upregulation in flowers and increased pollen K+ content. **Frontiers in plant Science** 10. DOI: 10.3389/fpls.2019.00333

Hu L, Xie Y, Fan S, Wang Z, Wang F, Zhang B, Haosheng L, Jie S, Kong L (2018) Comparative analysis of root transcriptome profiles between drought-tolerant and susceptible wheat genotypes in response to water stress**. Plant Science** 272:276-293. DOI: 10.1016/j.plantsci.2018.03.036

Ibá - Indústria Brasileira de Árvores (2021). **Relatório anual Ibá** 176p. < https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf**>**

Jajoo A (2013) Changes in photosystem II in response to salt stress. In Ecophysiology and responses of plants under salt stress (pp. 149-168). Springer, New York, NY.

Jamil A, Riaz S, Ashraf M, Foolad MR (2011). Gene expression profiling of plants under salt stress. **Critical Reviews in Plant Sciences** 30: 435-458. DOI: 10.1080/07352689.2011.605739

Jiménez-Alfaro B, Silveira FA, Fidelis A, Poschlod P, Commander LE (2016) Seed germination traits can contribute better to plant community ecology. **Journal of Vegetation Science** 27: 637-645. DOI: 10.1111/jvs.12375

Jumrani K, Bhatia VS (2018) Impact of combined stress of high temperature and water deficit on growth and seed yield of soybean. **Physiology and Molecular biology of Plants** 24:37-50. DOI: 10.1007/s12298-017-0480-5

Labouriau LG, Valadares MB (1976) On the physiology of seed of *Calotropis procera*. **Anais da Academia Brasileira de Ciência** 42: 235-264.

Laghmouchi Y, Belmehdi O, Bouyahya A, Senhaji NS, Abrini J (2017). Effect of temperature, salt stress and ph on seed germination of medicinal plant *Origanum compactum*. **Biocatalysis and agricultural biotechnology** 10:156-160. DOI: 10.1016/j.bcab.2017.03.002

Lima MS, Araujo MM, Berghetti ÁLP, Aimi SC, Costella C, Griebeler AM, Somavilla LM, Santos OP, dos Reis Teixeira Valente, BM (2022). Mini-cutting technique application in Corymbia and Eucalyptus: effects of mini-tunnel use across seasons of the year. **New Forests** 53(1): 161-179. DOI: 10.1007/s11056-021-09851-4

Lin L, Chen W, Li C, Cui H (2019) Enhancing stability of *Eucalyptus citriodora* essential oil by solid nanoliposomes encapsulation. **Industrial Crops and Products** 140:111615. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111615

Liu J, Hasanuzzaman M, Wen H, Zhang J, Peng T., Sun H, Zhao Q (2019) High temperature and drought stress cause abscisic acid and reactive oxygen species accumulation and suppress seed germination growth in rice. **Protoplasma** 256(5):1217-1227. DOI: 10.1007/s00709-019-01354-6

Lucchese JR, Bovolini MP, Hilgert MA, Brose CB, Avrella ED, Lazarotto M (2018) Estresse salino e hídrico na germinação e crescimento inicial de plântulas de *Toona ciliata* M. Roem. Var. *Australis*. **Ciência Florestal** 28: 141-149. DOI: 10.5902/1980509831633

Maguire JD (1962) Speeds of germination-aid selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, Madison.2: 176-177.

Martins CC, Pereira MRR, Lopes MTG (2014) Germinação de sementes de eucalipto sob estresse hídrico e salino. **Bioscience Journal** 30: 318-329.

Martins RS, José AC, Faria JMR, Oliveira LC (2017) Proteomic analysis of osmoprimed and heat-shock-treated *Eucalyptus urophylla* seeds. **Trees** 31(1): 313-324. DOI 10.1007/s00468-016-1485-3

Mechergui K, Naghmouchi S, Alsubeie M, Khouja ML (2019) MICROMORPHOLOGICAL OBSERVATION OF EUCALYPTUS SEEDS, MULTIVARIATE STATISTICAL ANALYSES AND MODELING OF THEIR GERMINATION UNDER SALT STRESS AND OSMOTIC CONSTRAINT. **Cerne** 25:156-171. DOI: 10.1590/01047760201925022635

Pereira TM, Santos HOD, Cunha Neto ARD, Pelissari F, Pereira WV, Melo LAD (2020) Does nitric oxide protect Eucalyptus urophylla seeds under salt stress conditions?. **Journal of Seed Science** 42. DOI: 10.1590/2317-1545v42236272

Sbrussi CAG, Zucareli C (2014) Germinação de sementes de milho com diferentes níveis de vigor em resposta à diferentes temperaturas. **Semina: Ciências Agrárias** 35: 215-226. DOI: 10.5433/1679-0359.2014v35n1p215

Silva PH, Lee DJ, Amancio MR, Araujo MJ (2022) Initiation of breeding programs for three species of Corymbia: Introduction and provenances study. **Crop Breeding and Applied Biotechnology** v. 22: e40012211. DOI: 10.1590/1984-70332022v22n1a01

Silva PHM, Paula RC, Moraes MLT (2018) **Melhoramento de populações de eucaliptos/Improvement of eucalipts populations**. Piracicaba: IPEF. 108p.

Simoni FD, Costa RS, Fogaça CA., Gerolineto E (2011) Sementes de *Sorghum bicolor* L.-Gramineae, submetidas ao estresse hídrico simulado com PEG (6000). **Revista de Biologia e Ciências da Terra, Pernambuco** 11:188-192.

Soares PPDS, Cairo PAR, da Silva LD, Matsumoto SN, do Bonfim RAA, Barbosa MP Carriço Sá M, Almeida MF, Mesquita NLS (2022). Mitigating water stress by increasing NO_3^-: NH_4^+ ratio in young *Eucalyptus urophylla* plants. **Trees** 36(1): 81-91. DOI: 10.1007/s00468-021-02183-y

Tabatabai SMT, Goshasbi F, Bakhshi B (2022). Evaluation of the effect of polyethylene glycol (PEG) on germination and morphological characteristics of bread wheat. **Cereal Research Communications**.

Valladares GS (2009) Caracterização química e granulométrica de solos do Golfão maranhense. **Acta Amazonica** 39: 923-933.

Villela FA, Doni Filho L, Sequeira EL (1991). Tabela de Potencial Osmótico em Função da Concentração de Polietilleno Glicol 6.000 e da Temperatura. **Pesq. Agropec. Bras 26**:1957-1968.

Wang Y, Yan H, Qiu Z, Hu B, Zeng B, Zhong C, Fan C (2019) Comprehensive analysis of snrk gene family and their responses to salt stress in *Eucalyptus grandis*. **International journal of molecular sciences** 20:2786. DOI: 10.3390/ijms20112786

Yang W, Chen Z, Huang Y, Chang G, Li P, Wei J, Yuan X, Huang j, Hu, X (2019). Powerdress as the novel regulator enhances Arabidopsis seeds germination tolerance to high temperature stress by histone modification of SOM locus. **Plant Science** 284:91-98. DOI: 10.1016/j.plantsci.2019.04.001

Zhang J, Liu H, Sun J, Li B, Zhu Q, Chen S, Zhang H (2012) Arabidopsis fatty acid desaturase FAD2 is required for salt tolerance during seed germination and early seedling growth. **Plos one** 7(1): e30355. DOI:10.1371/journal.pone.0030355

CAPÍTULO 3 - Deficiência hídrica induz alterações no metabolismo primário e secundário em mudas de *Corymbia citriodora*

Resumo - *Corymbia citriodora* é uma espécie de importância comercial, plantada por pequenos e médios produtores, que produz madeira de boa qualidade e vem atraindo a atenção do mercado florestal. A ocorrência de estresses abióticos será cada vez mais frequente, o que pode limitar o desenvolvimento de plantas, sendo o déficit hídrico o principal fator de redução da produtividade do eucalipto. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar os efeitos do estresse hídrico no desenvolvimento de plantas de *C. citriodora*. As mudas foram cultivadas em vasos e submetidas a cinco regimes de irrigação (20, 35, 50, 65 e 80% da capacidade máxima de retenção de água no solo) durante 110 dias em casa de vegetação. Ao final desse período foram avaliados o crescimento das plantas, as trocas gasosas, potencial hídrico foliar, teores de clorofila, de carotenoides, de prolina e a peroxidação lipídica pelo conteúdo de Malondialdeído (MDA). Observou-se que a diminuição da disponibilidade hídrica proporcionou aumento nos teores de clorofila, carotenoides, prolina e MDA e redução no potencial hídrico foliar, nos parâmetros de trocas gasosas e crescimento nas plantas. As mudas de *C. citriodora* apresentaram redução significativa no crescimento quando cultivadas em níveis inferiores a 50% da capacidade máxima de retenção de água no solo.

Palavras-chave: sensibilidade à seca, eucalipto, troca gasosa, desenvolvimento de mudas, estresse oxidativo.

1 Introdução

O gênero *Eucalyptus* abrange as espécies florestais cultivadas mais importantes do Brasil e ocupa 78% dos 9,55 milhões de hectares de plantações florestais com fins industriais (Ibá, 2021). Este gênero apresenta vantagens em comparação às espécies nativas e sobre outras espécies exóticas, tendo passado por constantes processos de melhoramento genético desde a sua introdução no Brasil (Gonçalves et al. 2017).

Corymbia citriodora (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson é uma espécie com importância econômica no mundo, usada para produção de madeira maciça, energia, madeira para tratamento (mourões e postes) e construção civil (Abraf 2010). Das folhas, são extraídos óleos essenciais, vastamente empregados na indústria química e farmacêutica (Lin et al. 2019).

Espécies florestais apresentam um ciclo longo e, por isso, estão mais sujeitas a múltiplos estresses, bióticos e, ou abióticos. A deficiência hídrica é a principal causa de estresse abiótico às culturas agrícolas e florestais, não

existindo um mecanismo único de tolerância à seca, a qual envolve, por exemplo, interações complexas de ordens fisiológicas, bioquímicas e anatômicas das plantas (Matos et al., 2014; Martins et al., 2018; Noia junior et al., 2019).

O déficit hídrico pode alterar os metabolismos primário e secundário nas espécies vegetais. No primeiro ele afeta as relações hídricas e troca gasosas, em um nível mais acentuado pode afetar determinados componentes celulares e integridades funcionais (Souden et al., 2020), sendo que alterações no metabolismo primário podem ocasionar modificações no metabolismo secundário. Dessa forma, o estresse hídrico altera o metabolismo primário provocando o fechamento estomático com diminuição na absorção de CO_2 e redução na taxa fotossintética (Nóia Júnior et al., 2019; Ripoll et al., 2016), podendo resultar em aumento significativo das espécies reativas de oxigênio (EROS) (Fanciullino et al., 2014; Mitller, 2017), que afetam de forma negativa o crescimento, desenvolvimento e produtividade das plantas, sobretudo nas regiões áridas e semiáridas (Pulavarty et al., 2015, Suzuki e Katano 2018).

O conhecimento dos mecanismos envolvidos na tolerância das plantas à seca é essencial para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável e para a seleção de plantas com maior probabilidade de sucesso frente às mudanças climáticas (Martins et al., 2020). Entretanto, apesar de haver vários trabalhos com espécies de eucalipto, estudos com *C. citriodora* são escassos, principalmente, avaliando as respostas fisiológicas e bioquímicas de plantas sob estresse hídrico. Assim, nossa hipótese é que sob diferentes condições de disponibilidade hídrica as plantas de *C. citriodora* desenvolvem mecanismos que induzem respostas fisiológicas e bioquímicas para tolerar o estresse hídrico e, nesse sentido, o objetivo da pesquisa foi avaliar os efeitos do estresse hídrico no comportamento de plantas de *C. citriodora* cultivadas em vasos.

2 Material e Métodos

Para a produção de mudas, foram usadas sementes de *C. citriodora* coletadas de árvores remanescentes de um teste de progênies de polinização aberta, com 40 anos de idade, instalado no município de Jaboticabal, Estado

de São Paulo (21°15’ S, 48°19’ W, 605 M A.S.L.), cuja classificação climática de Köppen para a região é Cwa (Alvares et al., 2013). O teste de progênie passou por uma seleção fenotípica individual, restando as 150 melhores árvores.

Após a colheita de frutos em 15 dessas árvores, eles foram secos em ambiente semi-sombreado para posterior extração e beneficiamento manual, sendo posteriormente homogeneizadas em um único lote de sementes.

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, entre os meses de dezembro de 2018 e março de 2019, totalizando 110 dias de duração, com as mudas de *Corymbia citriodora* submetidas a cinco regimes hídricos. A casa de vegetação é coberta com filme de plástico transparente de 150 µm de espessura e as laterais revestidas com telas com capacidade de interceptação de 30% da luz solar. Durante o período experimental foram monitoradas no interior da casa de vegetação as temperaturas e umidade relativa do ar, máximas e mínimas (Figura 1).

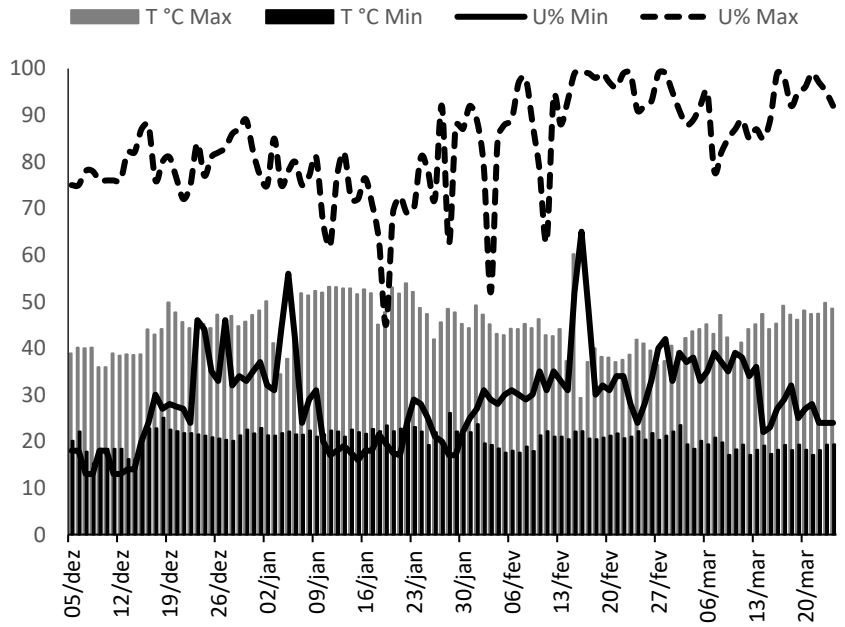

Figura 1. Temperaturas máximas (T ºC Max) e mínimas (T ºC Min) e umidade relativa do ar máxima (U% Max) e mínima (U% Min) diárias obtidas no interior da casa de vegetação durante o período experimental (dezembro de 2018 a março de 2019).

As mudas foram produzidas a partir de sementes germinadas em tubetes de 50 cm^3, contendo substrato comercial Plantmax® e areia. As plântulas excedentes foram, posteriormente, eliminadas, deixando-se apenas a mais central e de melhor desenvolvimento. As mudas permaneceram em tubetes por 90 dias, quando atingiram porte adequado para o plantio em vasos.

As mudas foram plantadas em vasos de plástico preenchidos com 7 kg de uma amostra de solo da região de Jaboticabal, classificado como Latossolo Vermelho Eutrófico, típico, textura muito argilosa (Santos et al., 2018), cuja análise de caracterização química do solo está na Tabela 1. O solo, seco e peneirado, foi devidamente corrigido de forma a elevar a saturação por bases a 60% utilizando a relação 3:1 de Ca:Mg. No mesmo procedimento foi realizada a adubação fosfatada aplicando-se 100 mg dm^{-3} de P, utilizando superfosfato simples tendo como base as recomendações para a cultura propostas por Gonçalves et al. (1997).

Tabela 1. Caracterização química do solo utilizado no experimento**.**

pH	MO	P-resina	K	Ca	Mg	H+Al	SB	T	V
$CaCl_2$	g dm^{-3}	mg dm^{-3}	$mmol_c$ dm^{-3}						%
5,6	4	4	1,8	9	3	12	13,8	25,8	53

M.O. matéria orgânica; SB - Soma de bases; T - Capacidade de troca catônica, V - Saturação por bases

Após o plantio nos vasos as mudas foram aclimatadas por sete dias, antes da imposição dos regimes hídricos, que consistiram na manutenção diária da umidade do solo em 20% (RI1), 35% (RI2), 50% (RI3), 65% (RI4) e 80% (RI5) da capacidade máxima de retenção de água pelo substrato, também denominada como capacidade de campo (Silva et al., 2014).

Os tratamentos correspondentes aos níveis de umidade do solo foram mantidos por 110 dias, quando o experimento foi finalizado. A reposição da água evapotranspirada foi feita diariamente, pelo método gravimétrico, visando repor a quantidade de água suficiente para manter a umidade desejada dos tratamentos. O delineamento utilizado foi em blocos casualizados, com oito repetições de duas plantas por vaso, totalizando 80 plantas, em 40 vasos.

2.1 Trocas gasosas e potencial hídrico foliar - Aos 110 dias após a imposição dos regimes hídricos, foram avaliadas a intervalos de 2 horas, no

período entre 8 e 16 h, a taxa de assimilação líquida (*A,* μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), a transpiração (*E*, mmol H_2O m^{-2} s^{-1}) a condutância estomática (*gs*, mol H_2O m^{-2} s^{-1}) e CO_2 intracelular (*Ci*, μmol mol^{-2}), com um analisador de gases por infravermelho (IRGA), modelo LCPro+ (ADC BioScientific Ltd.®) acoplado a uma fonte de luz artificial, regulada para fornecer fluxo de fótons fotossinteticamente ativo de 1000 μmol m^{-2} s^{-1} e sob concentração de CO_2 ambiente (400 ± 10 μmol m^{-2} s^{-1}). Essas avaliações foram realizadas em folhas totalmente expandidas no terço superior da copa.

O potencial hídrico foliar foi determinado no período antemanhã e ao meio-dia, pelo método estabelecido por Scholander et al. (1965), em folhas que foram destacadas da planta e colocadas na câmara de pressão.

2.2 Pigmentos fotossintéticos - Os teores de carotenoides e clorofilas foram determinados seguindo a metodologia descrita por Lichtenthaler (1987). Para tanto, foram coletados em uma planta de cada repetição por tratamento, discos foliares com 0,025 g a 0,030 g de massa fresca que foram colocados em Eppendorf com 2 ml de acetona 80%, conservados por 48 horas em resfriamento nas temperaturas entre 6 e 10 °C, com posterior leitura em espectrofotômetro, a 470, 647 e 663 nm. Os resultados das análises foram interpolados em uma curva padrão para determinar a quantidade desses compostos (mg g^{-1} de massa fresca de folhas).

2.3 Solutos orgânicos - Ao final do experimento (110 dias após imposição dos regimes hídricos), foram determinados os teores de malondialdeído (MDA) e prolina em amostras vegetais coletadas de uma planta por vaso, nas oito repetições.

O teor de MDA foi estimado pelo conteúdo de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS). Para determinar a concentração de MDA, foram macerados 0,2 g de folhas em ácido tricloroacético (TCA) e depois centrifugado a 10.000 rpm por 15 minutos a -4 °C. Ao sobrenadante se agregou TBA (Thiobarbituric Acid Reactive). A mistura foi colocada em banho seco a 95 ºC por 30 minutos e depois a solução foi clarificada. A concentração de equivalentes de MDA foi calculada usando um coeficiente de extinção de 1,55 x

10^{-5} mol^{-1} cm^{-1}, com leituras a 535 e 600 nm e os resultados foram expressos em µmol mg^{-1} de massa fresca (Gratão et al., 2012).

A quantificação dos teores de prolina foi realizada de acordo com a metodologia de Bates et al. (1973), pelo procedimento que consiste na homogeneização manual em gral de porcelana de 0,5 g de massa fresca de material vegetal, com 10 ml de ácido sulfosalicílico a 3% e filtragem. Os teores de prolina foram calculados para a curva padrão e com base na massa fresca, sendo expressos em µmoles de prolina/g^{-1} massa fresca.

2.4 Biometria, área foliar e massa das plantas - Ao final do experimento, foram determinadas as variáveis: altura da planta (cm) - medida com régua graduada em mm; diâmetro do coleto (mm) - determinado com paquímetro digital; número de folhas – pela contagem manual do número de folhas por planta; área foliar (cm^2) - determinada com o analisador de área foliar Li-Cor 3100; massa seca de componentes da planta (g) – determinada em balança analítica (0,001 g) após submeter folhas, caule + ramos e raízes à secagem em estufa de circulação de ar a 65 ± 3 ºC, até massa constante. A biomassa das plantas foi determinada em quatro repetições por tratamento.

2.5 Análise de dados - Os dados foram submetidos à análise de variância, seguida de regressão polinomial para expressar as características avaliadas em função dos regimes hídricos. Essas análises foram realizadas no software AgroEstat® (Barbosa e Maldonado Júnior 2015) e os gráficos foram elaborados no software origin 9®.

3 Resultados

Houve variação significativa na taxa de assimilação líquida (*A*, µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), transpiração (*E*, mmol H_2O m^{-2} s^{-1}), condutância estomática (*gs*, mol H_2O m^{-2} s^{-1}) e CO_2 intracelular (Ci, µmol mol^{-2}), em função dos regimes de irrigação (Figura 2). Essas características aumentaram à medida que a disponibilidade hídrica se tornou maior, apresentando comportamento quadrático para taxa de assimilação líquida e CO_2 intracelular e linear para transpiração e condutância estomática. Em termos percentuais, a condutância

estomática foi mais prejudicada pela diminuição na disponibilidade hídrica no substrato, atingindo redução de 64% no regime RI1 em relação ao RI5, do que a transpiração (redução de 54%) e a taxa de assimilação líquida (redução de 35%).

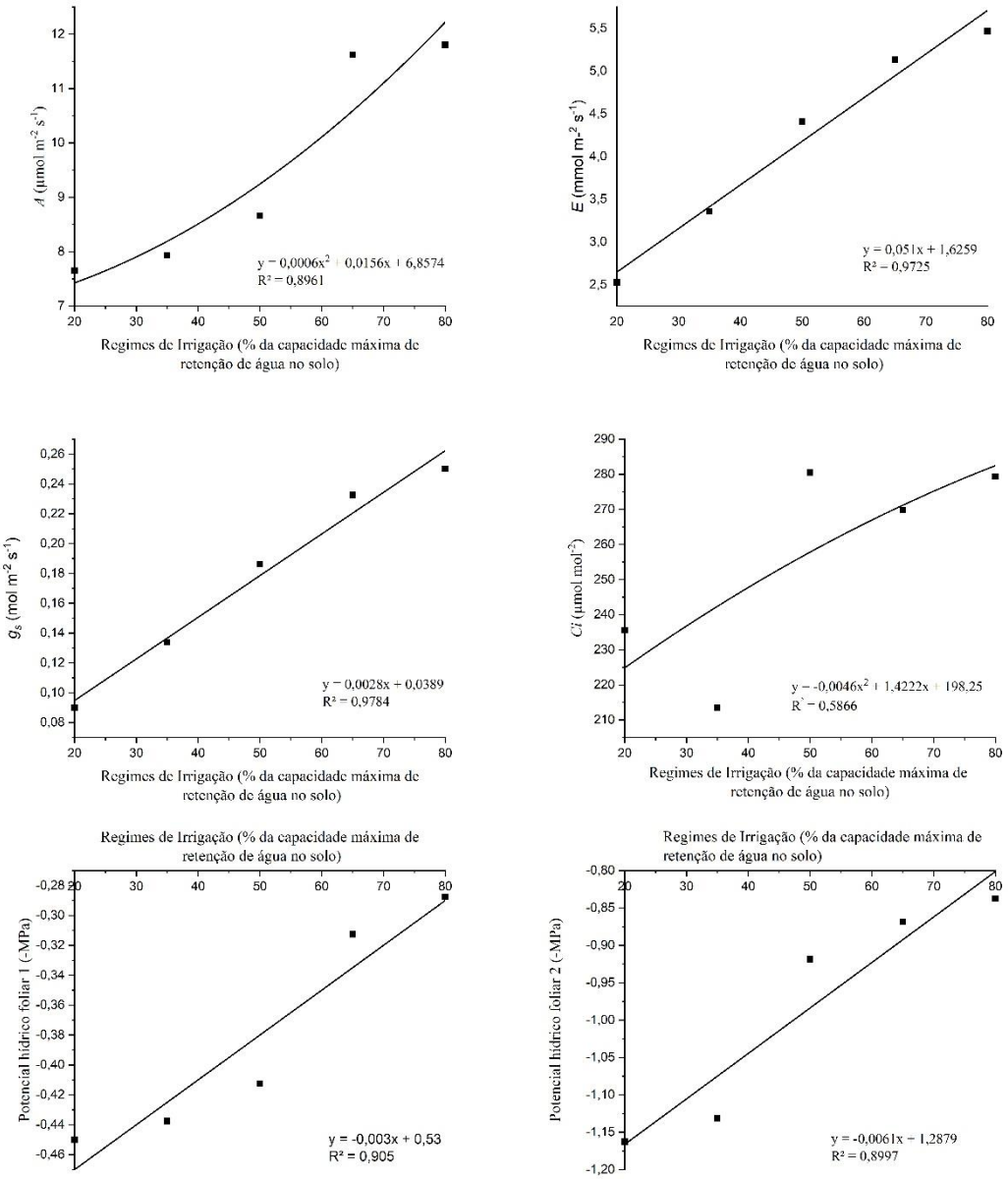

Figura 2. Taxa de assimilação líquida (*A*, µmol m^{-2} s^{-1}), transpiração (*E*, mmol m^{-2} s^{-1}), condutância estomática (g_s, mol m^{-2} s^{-1}), CO_2 intracelular (Ci, µmol mol^{-2}), potencial hídrico foliar 1 (no período antemanhã, -MPa) e potencial hídrico foliar 2 (ao meio dia, -MPa) em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliado aos 110 dias após imposição dos regimes hídricos.

O potencial hídrico foliar, tanto na antemanhã quanto ao meio-dia, aumentou à medida que a disponibilidade de água foi maior, mas os valores observados ao meio-dia foram inferiores àqueles observados na antemanhã (Figura 2).

As trocas gasosas mensuradas ao longo do dia indicam que a taxa de assimilação líquida (*A*), condutância estomática (*gs*) e transpiração (*E*) foram máximas entre 8 e 10 h, com redução ao longo do dia (Figura 3), porém, de forma mais expressiva para os regimes hídricos mais restritivos ao crescimento das plantas (RI1 e RI2). A concentração intracelular de CO_2 também foi máxima entre 8 e 10 h, apresentando queda até 14 h com aumento às 16 h para todos os regimes hídricos.

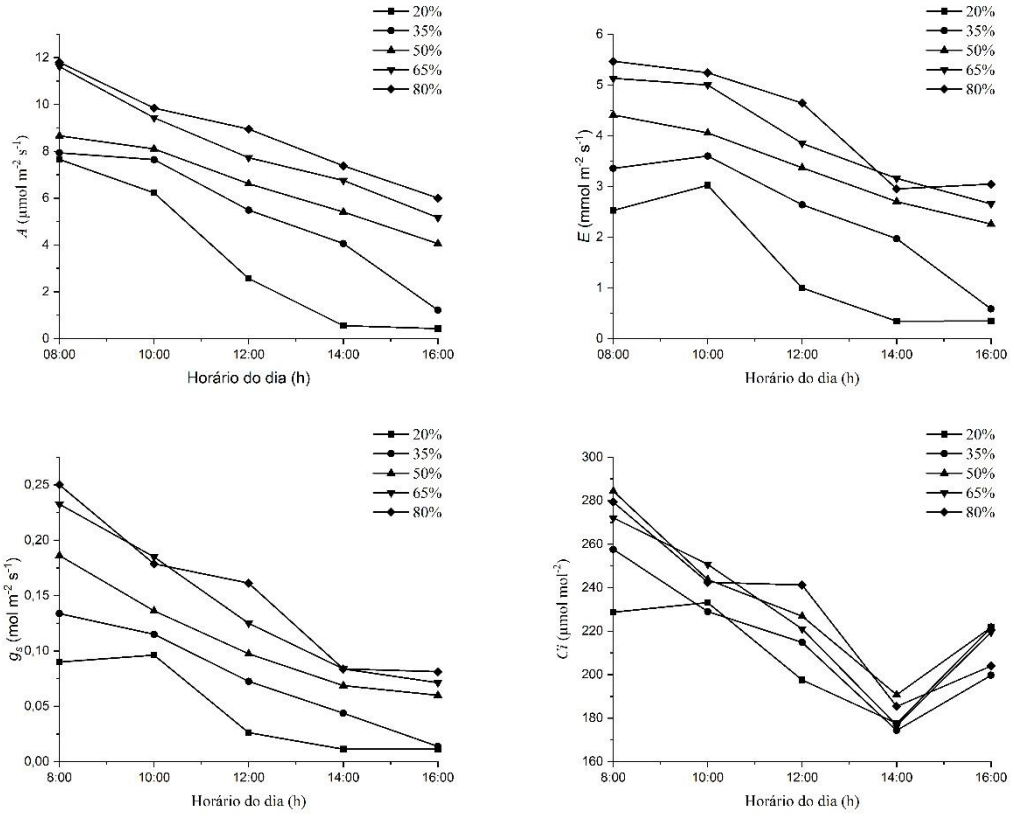

Figura 3. Taxa de assimilação líquida (*A*, µmol m^{-2} s^{-1}), transpiração (*E*, mmol m^{-2} s^{-1}), condutância estomática (g_s, mol m^{-2} s^{-1}) e CO_2 intracelular (Ci, µmol mol^{-2}) em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliado aos 110 dias após imposição dos regimes hídricos.

Os teores de clorofila a, clorofila b e clorofila a+b se ajustaram a uma equação quadrática decrescente com o aumento da disponibilidade hídrica, porém com tendência de estabilização a partir do regime hídrico 3 (RI3). Para os teores de carotenoides, os menores valores também foram observados nos regimes hídricos menos restritivos ao crescimento das plantas (RI3, RI4 e RI5), se assemelhando aos resultados obtidos para os teores de clorofila (Figura 4).

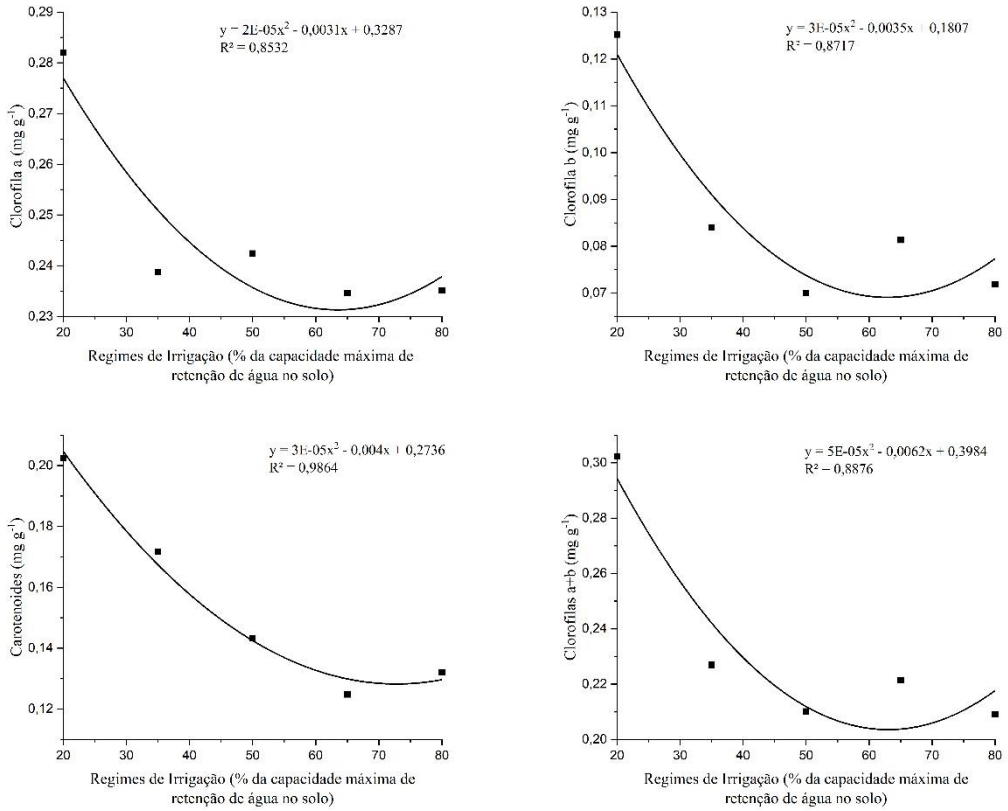

Figura 4. Conteúdo (mg g^{-1}) de clorofila a (Chl^{-a}), clorofila b (Chl^{-b}), clorofilas a+b (Chl a+b) e carotenoides (Cx+c) em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliado aos 110 dias após imposição dos regimes hídricos.

O aumento do estresse hídrico aumentou a peroxidação lipídica, expressa pelo teor de MDA, que apresentou redução linear com o aumento na disponibilidade hídrica. O RI1 proporcionou incremento de 31,57% no teor de MDA em relação ao RI5.

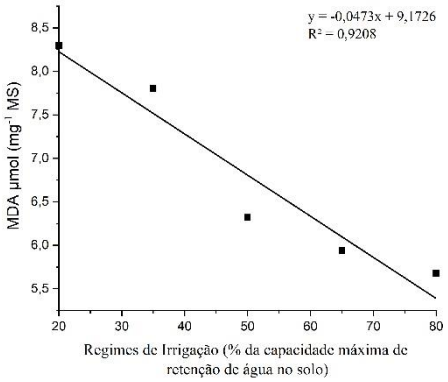

Figura 5. Conteúdo de MDA (malondialdeído) em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliado aos 110 dias após imposição dos regimes hídricos.

Os teores de prolina também foram mais elevados nos regimes hídricos mais restritivos às plantas, porém com tendência à estabilização nos dois regimes de maior disponibilidade hídrica (Figura 5). O RI1 proporcionou aumento no conteúdo do indicador de estresse (prolina) em 47,32% em relação ao RI5.

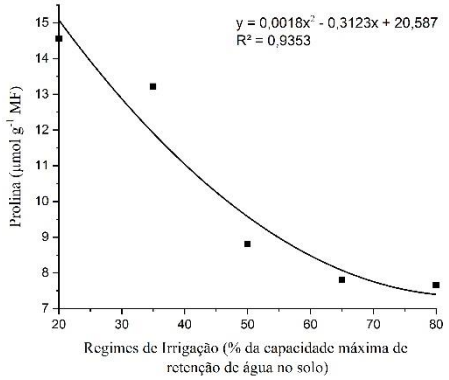

Figura 6. Conteúdo de prolina em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliado aos 110 dias após imposição dos regimes hídricos.

As variáveis de crescimento foram favorecidas com o aumento da disponibilidade hídrica, com exceção do número de folhas cuja variação foi não significativa (Figura 6 e 7). Para altura, diâmetro ao nível do solo (DNS), massa

seca de raízes (MSR) e área foliar (AF) o aumento foi linear e para massa seca de caule+ramos (MSC) e de folhas (MSF) a resposta foi quadrática com tendência de estabilização nos três regimes com maior disponibilidade hídrica (RI3, RI4 e RI5).

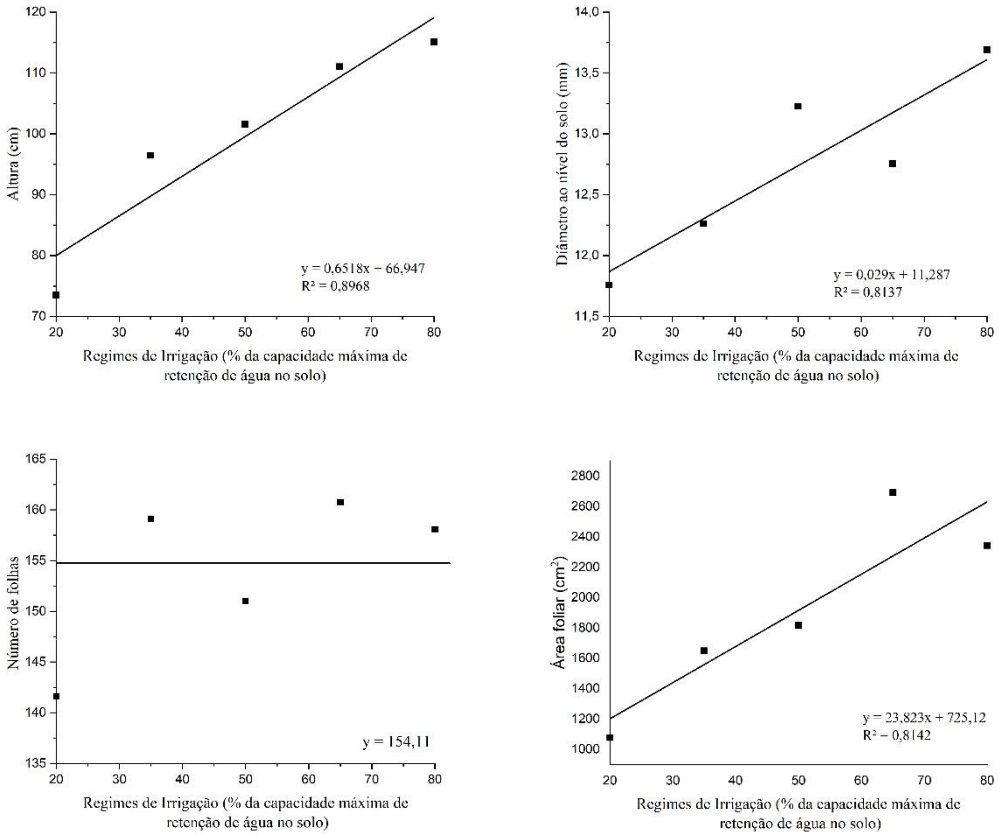

Figura 7. Comportamento da Altura (cm), diâmetro ao nível do solo (mm), número de folhas, área foliar (cm^2) de plantas de *C. citriodora* submetidas a cincos regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliados aos 110 dias após imposição dos regimes hídricos.

Em termos de porcentagem média de redução nas diferentes características estudadas, especificamente do regime hídrico RI1 em relação ao RI5, observou-se que essa foi de 36% em altura e 14% em diâmetro do coleto; o acúmulo de matéria seca em raízes (MSR) e em folhas (MSF) foram as características mais prejudicadas com o déficit hídrico induzido, respectivamente, com redução em torno de 80 e 60%.

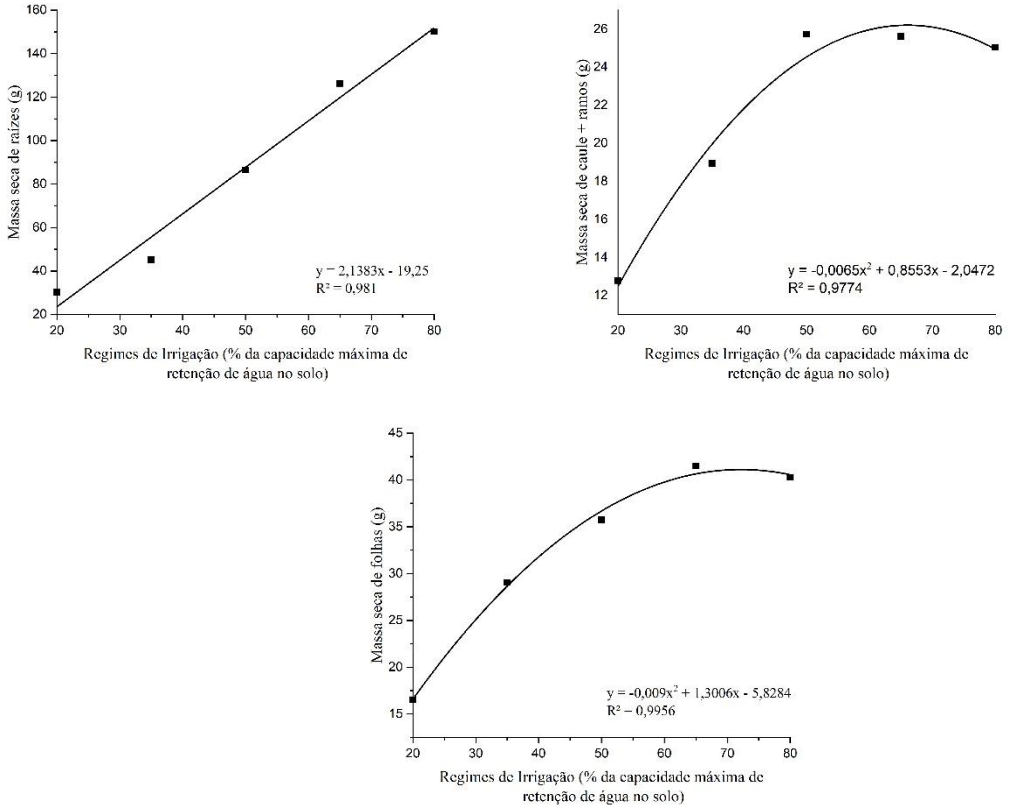

Figura 8. Comportamento da massa seca (g) de raízes, de caule+ramos e de folhas de plantas de *C. citriodora* submetidas a cincos regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliados aos 110 dias após imposição dos regimes hídricos.

A MSR foi, também, comprometida em cerca de 70 e 42%, nos regimes hídricos RI2 e RI3 em relação ao RI5, denotando alta sensibilidade mesmo sob estresse hídrico menos intenso. A área foliar, com 54% de redução no regime RI1 em relação ao regime RI5, foi a terceira característica mais prejudicada pela baixa disponibilidade hídrica, apesar do número de folhas não ter sido afetado.

4 Discussão

A disponibilidade hídrica no solo afeta diretamente as trocas gasosas e o potencial hídrico foliar, sendo essa relação influenciada pelas condições climáticas (Tonello e Teixeira Filho 2012). Sob déficit hídrico mais intenso, a planta não consegue absorver água do solo na mesma magnitude que ela

perde pela transpiração, resultando no fechamento estomático com queda na condutância e redução do potencial hídrico (Xavier et al., 2019), que são estratégias para a planta manter o turgor.

Os regimes de irrigação mais restritivos (RI1 e RI2) proporcionaram redução nas trocas gasosas, porém de maneira mais expressiva na condutância estomática (g_s) e na taxa de transpiração (*E*), em relação à taxa de assimilação líquida (*A*), tendo uma maior eficiência do uso da água. No estágio inicial do déficit hídrico, pode ocorrer uma diminuição na condutância estomática; assim, a quantidade de CO_2 que entra nos estômatos pode diminuir a níveis que não atende às demandas da fotossíntese, o que leva à redução na taxa de assimilação líquida (Song et al., 2020). A temperatura máxima em torno de 40 ºC causa outro estresse (térmico) nas plantas, o que pode contribuir para alterações para adaptações fisiológicas.

Os regimes de irrigação RI1 e RI2 proporcionaram as menores taxas de concentração interna de CO_2 (*Ci*) e de condutância estomática (g_s), indicando maior estresse sofrido pelas plantas. Umas das estratégias mais importantes das plantas ao déficit hídrico é o fechamento dos estômatos, sendo esta uma forma de reduzir a perda de água e melhorar a eficiência de uso da mesma (Hsieh et al., 2010). Xavier et al. (2019), estudando dois genótipos comerciais de *E. urophylla x E. grandis*, afirmaram que a redução recorrente na disponibilidade de água afetou o potencial hídrico foliar e as trocas gasosas em mudas.

Nas avaliações de trocas gasosas ao longo do dia, nota-se uma relação entre *A*, *E*, *Ci* e g_s, tendo-se observado maiores valores no início do dia, ainda com temperaturas mais amenas e com maior disponibilidade hídrica, e com redução gradual nessas características, principalmente nos horários de maior demanda evaporativa. Osakabe et al. (2014) afirmam que sob déficit hídrico as plantas apresentam menor potencial hídrico foliar, menores valores de *A*, *E*, g_s e *Ci*, reduzindo, portanto, a assimilação de CO_2 e, consequentemente, proporcionando menor produção de biomassa. Conforme relatado por Cano et al. (2014), a diminuição da g_s ocasiona a redução do C*i*, em plantas sob déficit hídrico, limitando a fotossíntese o que, também, está de acordo com Zhong et

al. (2017) de que a seca pode reduzir de maneira acentuada a g_s, causando diminuição do *Ci.*

O *Ci* representa o carbono intracelular que pode ser usado pela planta para a fotossíntese (Tominaga et al., 2018), porém, essa variável pode ser afetada por fatores externos como a temperatura e escassez de água. De fato, neste experimento o C*i* às 16:00 h apresentou uma elevação em comparação às 14:00 h, o que pode ter ocorrido por um aumento de temperatura. Nos horários com incidência mais elevada da temperatura, as plantas podem ter fechado os estômatos, ocasionando redução da absorção de CO_2. Temperaturas superiores a 33 ºC foram registradas de forma recorrente na casa de vegetação.

A menor capacidade fotossintética relacionada aos regimes hídricos mais restritivos (RI1 e RI2), assim como o aumento nos níveis de MDA e prolina indicam que o sistema de defesa, sob menor disponibilidade de água pode ter favorecido o incremento dos mecanismos de defesa e de espécies reativas de oxigênio – EROS, o aumento nos níveis de prolina sob menor RI não foram suficientes para evitar danos.

Em plantas sob estresse oxidativo, há um acúmulo de MDA, resultante da oxidação lipídica (Pompelli et al., 2010; Silva et al., 2010; Arcoverde et al., 2011; Jesus et al., 2015; Yalcinkaya et al., 2019) o que indica que o sistema de defesa antioxidante, tanto enzimático como não enzimático, pode ter sido afetado pelo déficit hídrico, o que pode estar associado com a redução da fotossíntese e com o aumento dos teores de clorofila totais registrado neste experimento. Os teores de MDA, indicam que houve estresse e que os mecanismos de defesa não foram suficientes para mitigar o seu teor. Outros mecanismos de defesa podem estar envolvidos para mitigar o impacto do déficit hídrico.

Os maiores teores de MDA foram observados sob menor disponibilidade hídrica (RI1 e RI2), concordando com os resultados obtidos por Berenguer et al. (2018), com mudas de *E. globulus* Labill. e *E. globulus* x *E. cypellocarpa*, e de Jesus et al. (2015), com mudas de *E. globulus*, o que indica a ocorrência de estresse oxidativo sob limitação da disponibilidade hídrica.

De forma semelhante ao observado para os teores de MDA, a prolina, que é um osmólito compatível, também se acumulou nas plantas sob menor disponibilidade hídrica, concordando com as afirmações de Hongying et al. (2009) e Kaur e Asthir (2015), de que esse osmólito tende a se acumular em plantas sob estresses abióticos. Resultados do presente estudo estão de acordo com os encontrados por Cha-um et al. (2014), ao estudarem 8 genótipos de eucaliptos submetidos a déficit hídrico. Para Cha-um e Kirdmanee (2010), o aumento nos teores de prolina é um dos indicadores bioquímicos mais sensíveis em plantas sob déficit hídrico.

Sob menor disponibilidade hídrica (regime RI1) houve maiores teores de clorofila e carotenoides, o que está de acordo com os resultados obtidos por Jesus et al. (2015) com plantas de *E. globulus* submetidas a déficit hídrico. A clorofila é o principal elemento dos complexos pigmento-proteínas e exerce um papel importante na fotossíntese (Chen et al., 2018). O aumento no teor de clorofila sob déficit hídrico pode estar relacionado com a diminuição da área foliar, com um papel protetor dos carotenoides ou de outros mecanismos, que resguardam esses pigmentos da degradação para proteger a capacidade fotossintética (Jesus et al., 2015), com a redução do volume celular, pode ter ocorrido a concentração de pigmentos.

O crescimento de plantas de eucalipto está fortemente relacionado à disponibilidade hídrica (Stape et al., 2010; Silva, Bouillet e Paula 2016; Otto et al., 2017; Araujo et al., 2019), sendo que o déficit hídrico é mais crítico quando atinge as plantas nas primeiras etapas de crescimento afetando significativamente a produção de biomassa aérea e radicular (Hsiao e Xu, 2000).

Apesar do número de folhas não ter diferido entre os regimes de irrigação, houve redução na área foliar com o aumento da restrição hídrica, o que indica menor expansão foliar nos regimes de menor disponibilidade de água. Como resposta à deficiência hídrica, as plantas diminuem a área foliar, o que reduz a transpiração, diminuindo a perda de água. Essa redução na área foliar ocorreu de forma mais intensa que a redução na taxa de assimilação líquida, corroborando com a afirmação de Nóia Junior et al. (2019) de que a expansão foliar é reduzida antes que a fotossíntese seja afetada. Em um

estudo com 16 táxons de eucaliptos, em mudas com 70 dias submetidas a dois regimes hídricos (20% e 60% da capacidade de retenção de água do solo), foram observadas alterações no crescimento e em parâmetros fisiológicas entre os táxons e regimes hídricos (Silva et al., 2016).

Na fase de mudas ou em início de estabelecimento no campo, as plantas de eucalipto apresentam grande área foliar o que se altera nas idades mais avançadas. Assim, nessa fase, a área foliar e a massa seca de folhas estão entre as características mais afetadas pelo estresse hídrico (Noia Junior et al., 2019), conforme observado em nosso trabalho. Aumentar a eficiência do uso da água e reduzir a biomassa é uma estratégia para diminuir os impactos do estresse hídrico. O eucalipto pode mitigar o impacto da escassez de água, com maior desenvolvimento do sistema radicular (Christina et al., 2017).

Plantas de *C. citriodora* apresentaram redução significativa de crescimento e de acúmulo de biomassa quando cultivadas em níveis inferiores a 50% da capacidade máxima de retenção de água no solo. Nessa condição, o aparato fotossintético e, consequentemente, as trocas gasosas são comprometidas causando a intensificação da peroxidação lipídica (Noia Junior et al., 2019; Correia et al., 2013).

5 Conclusão

O estresse hídrico afeta o metabolismo primário e secundário de plantas de *Corymbia citriodora*, na fase inicial de estabelecimento, reduzindo a condutância estomática, transpiração e fotossíntese e aumentando os teores de clorofila, de carotenoides, MDA e prolina, com diminuição do crescimento.

6 Referências

Abraf - Associação Brasileira dos Produtores de Florestas Plantadas. Anuário Estatístico - 2010. Ano base 2009. Brasília, DF: ABRAF. 140p. < http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3906/anuario-ABRAF-2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Moraes Gonçalves JL, Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22: 711-728. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507

Araujo MJ, Paula RC, Campoe OC, Carneiro RL (2019) Adaptability and stability of eucalypt clones at different ages across environmental gradients in Brazil. **Forest Ecology and Management** 454: 117631. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117631

Arcoverde GB, Rodrigues BM, Pompelli MF, Santos MG (2011) Water relations and some aspects of leaf metabolism of Jatropha curcas young plants under two water deficit levels and recovery. **Brazilian Journal of Plant Physiology** 23: 123-130. DOI: 10.1590/S1677-04202011000200004

Barbosa JC, Maldonado Junior W (2015) **Agroestat**: sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos. Jaboticabal, FCAV/UNESP*:* 396p.

Bates LS, Waldren RP, Teare ID (1973) Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and soil** 39: 205-207.

Berenguer HD., Alves A, Amaral J, Leal L, Monteiro P, Jesus C, Pinto G (2018) Differential physiological performance of two Eucalyptus species and one hybrid under different imposed water availability scenarios. **Trees** 32: 415-427. DOI: 10.1007/s00468-017-1639-y

Cano FJ, Lopez, R, Warren CR (2014) Implications of the mesophyll conductance to CO_2 for photosynthesis and water-use efficiency during long-term water stress and recovery in two contrasting Eucalyptus species. **Plant, Cell & Environment** 37: 2470-2490. DOI: /10.1111/pce.12325

Cha-um S, Kirdmanee C (2010) Effects of water stress induced by sodium chloride and mannitol on proline accumulation, photosynthetic abilities and growth characters of eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.). **New forests** 40: 349-360. DOI 10.1007/s11056-010-9204-1

Cha-Um S, Somsueb S, Samphumphuang T, Kirdmanee C (2014) Screening of eight Eucalypt genotypes (Eucalyptus sp.) For water deficit tolerance using multivariate cluster analysis. **Applied biochemistry and biotechnology** 173: 753-764. DOI: 10.1007/s12010-014-0888-0

Chen Z, Wang Z, Yang Y, Li M, Xu B (2018) Abscisic acid and brassinolide combined application synergistically enhances drought tolerance and photosynthesis of tall fescue under water stress. **Scientia Horticulturae** 228: 1-9. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.10.004

Christina M, Nouvellon Y, Laclau JP, Stape JL, Bouillet JP, Lambais GR, Le Maire G (2017). Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. **Functional Ecology** 31(2): 509-519. DOI: 10.1111/1365-2435.12727

Correia B, et al. (2014). Water stress and recovery in the performance of two Eucalyptus globulus clones: physiological and biochemical profiles. **Physiologia Plantarum** 150(4): 580-592. DOI: 10.1111/ppl.12110

Fanciullino AL, Bidel LPR, Urban L (2014) Carotenoid responses to environmental stimuli: integrating redox and carbon controls into a fruit model. **Plant, cell & environment** 37: 273-289. DOI: 10.1111/pce.12153

Gonçalves JDM, Raij BV, Gonçalves JC (1997) Florestais. *RAIJ, BV et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**, 2: 247-259.

Gonçalves JL, Alvares CA, Rocha JH, Brandani CB, Hakamada R (2017) Eucalypt plantation management in regions with water stress**. Southern Forests: a Journal of Forest Science** 79: 169-183. DOI: 10.2989/20702620.2016.1255415

Gratão PL, Monteiro CC, Carvalho RF, tezottot, Piotto FA, Peres, LE, Azevedo, RA (2012) Biochemical dissection of diageotropica and Never ripe tomato mutants to Cd-stressful conditions. **Plant Physiology and Biochemistry** 56: 79-96. DOI: 10.1016/j.plaphy.2012.04.009

Hongying H, Guojiang DXDBW, Changlian P (2009) Responses of Different Secondary Provenances of Jatropha curcas to Heat Stress. **Scientia Silvae Sinicae** 07 (45): 150-155. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20090726

Hsiao TC, Xu LK (2000) Sensitivity of growth of roots versus leaves to water stress: biophysical analysis and relation to water transport. **Journal of experimental botany** 51: 1595-1616. DOI: 10.1093/jexbot/51.350.1595

Hsieh TH, Li CW, Su RC, Cheng CP, Tsai YC., Chan MT (2010) A tomato bzip transcription factor, slareb, is involved in water deficit and salt stress response. **Planta** 231z 1459-1473. DOI: 10.1007/s00425-010-1147-4

Ibá - Indústria Brasileira de Árvores (2021). **Relatório anual Ibá** 176p. < https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf**>**

Jesus C, Meijón M, Monteiro P, Correia B, Amaral J, Escandón M, Cañal MJ, Pinto G (2015) Salicylic acid application modulates physiological and hormonal changes in *Eucalyptus globulus* under water deficit. **Environmental and Experimental Botany** 118: 56-66. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2015.06.004

Kaur G, Asthir BJBP (2015) Proline: a key player in plant abiotic stress tolerance. **Biologia plantarum** 59: 609-619. DOI: 10.1007/s10535-015-0549-3

Lichthentaler HK (1987) Chlorophyll and carotenoids-pigments of photosynthetic biomembranes,-In: Colowick, SP., Kaplan, NO (ed): Methods in Enzymology 148.

Lin L, Chen W, Li C, Cui H (2019) Enhancing stability of *Eucalyptus citriodora* essential oil by solid nanoliposomes encapsulation. **Industrial Crops and Products** 140: 111615. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111615

Martins GS, Freitas NC, Máximo WPF, Paiva LV (2018) Gene expression in two contrasting hybrid clones of *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus urophylla* grown under water deficit conditions. **Journal of plant physiology** 229:122-131. DOI: 10.1016/j.jplph.2018.07.007

Martins RS, Faria JMR, Rossini BC, Marino CL, Santos LD, José AC (2020) Proteomic analyses unraveling water stress response in two Eucalyptus species originating from contrasting environments for aridity. **Molecular Biology Reports** 47: 5191-5205. DOI: 10.1007/s11033-020-05594-1

Matos FS, Junior HDT, Rosário Rosa V, Freitas Santos PG, Oliveira Borges LF, Ribeiro RP, Neves TG, Cruvinel CKL (2014) Estratégia morfofisiológica de tolerância ao déficit hídrico de mudas de pinhão manso. **Magistra** 26:19:327.

Mittler R (2017) ROS are good. **Trends in plant science** 22: 11-19. DOI: 10.1016/j.tplants.2016.08.002

Nóia Júnior RDS, Amaral GC, Pezzopane JEM, Fonseca MDS, Silva APC, Xavier TMT (2019) Ecophysiological acclimatization to cyclic water stress in Eucalyptus. **Journal of Forestry Research** 31:797–806. DOI: 10.1007/s11676-019-00926-9

Osakabe Y, Osakabe K, Shinozaki K, Tran LSP (2014) Response of plants to water stress. Frontiers in plant science 86: 1-8. DOI: 10.3389/fpls.2014.00086

Otto MSG, Francisco JG., Gonsalez BT, Almeida Calvo L, Mattos EM, Almeida M, Moral RA., Demétrio CCB, Stape JL, Oliveira, RF (2017) Changes in γ-aminobutyric acid concentration, gas exchange, and leaf anatomy in Eucalyptus clones under drought stress and rewatering. **Acta Physiologiae Plantarum** 39: 1-13. DOI: 10.1007/s11738-017-2507-5

Pompelli MF, Barata-Luís R, Vitorino HS, Gonçalves ER, Rolim EV, Santos MG, Almeida-Cortez JS, Ferreira VM, Lemos EE, Endres L (2010) Photosynthesis, photoprotection and antioxidant activity of purging nut under drought deficit and recovery. **Biomass and bioenergy** 34: 1207-1215. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.03.011

Pulavarty A, Kukde S, Shinde VM, Sarangi BK (2016) Morphological, physiological and biochemical adaptations of *Eucalyptus citriodora* seedlings under nacl stress in hydroponic conditions. **Acta physiologiae plantarum** 38: 20. DOI: 10.1007/s11738-015-2042-1

Ripoll J, Urba L, Brunel B, Bertin N (2016) Water deficit effects on tomato quality depend on fruit developmental stage and genotype. **Journal of Plant Physiology** 190: 26-35.

Santos HG. et al. (2018**) Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed (rev. e ampl), Brasília, DF, Embrapa, p.356.

Scholander PF, Bradstreet ED, Hemmingsen EA, Hammel HT (1965) Sap pressure in vascular plants: negative hydrostatic pressure can be measured in plants. **Science** 148(3668): 339-346.

Silva CD, Nascimento JS, Scarpinati EA, Paula RC (2014) Classification of *Eucalyptus urograndis* hybrids under different water availability based on biometric traits. **Forest Systems** 23: 209-215. DOI: 10.5424/fs/2014232-03528

Silva EN, Ferreira-Silva SL, de Vasconcelos Fontenele A, Ribeiro RV, Viégas RA, Silveira JAG (2010) Photosynthetic changes and protective mechanisms against oxidative damage subjected to isolated and combined drought and heat stresses in *Jatropha curcas* plants. **Journal of Plant Physiology** 167: 1157-1164. DOI: 10.1016/j.jplph.2010.03.005

Silva PH, Campoe OC, Paula RC, Lee DJ (2016) Seedling growth and physiological responses of sixteen eucalypt taxa under controlled water regime. **Forests** 7: 110. DOI: 10.3390/f7060110

Silva PHM, Bouillet JP, Paula RC (2016) Assessing the invasive potential of commercial *Eucalyptus* species in Brazil: Germination and early establishment. **Forest Ecology and Management** 374: 129-135. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.05.007

Song X, Zhou G, He Q, Zhou H (2020) Stomatal limitations to photosynthesis and their critical Water conditions in different growth stages of maize under water stress. **Agricultural Water Management** 241: 106330. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106330

Souden S, Ennajeh M, Ouledali S, Massoudi N, Cochard H, Khemira H (2020) Water relations, photosynthesis, xylem embolism and accumulation of carbohydrates and cyclitols in two Eucalyptus species (*E. Camaldulensis* and *E. Torquata*) subjected to dehydration–rehydration cycle. **Trees** 34: 1439-1452. DOI: 10.1007/s00468-020-02016-4

Stape JL, Binkley D, Ryan MG, Fonseca S, Loos RA, Takahashi EN, Lima AM (2010) The Brazil *Eucalyptus* Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management** 259: 1684-1694. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.01.012

Suzuki N, Katano K (2018) Coordination between ROS regulatory systems and other pathways under heat stress and pathogen attack. **Frontiers in plant science** 9: 490. DOI: 10.3389/fpls.2018.00490

Tominaga, J, Shimada, H, Kawamitsu, Y. (2018) Direct measurement of intracellular CO_2 concentration in a gas-exchange system resolves overestimation using the standard method. **Journal of Experimental Botany** 69:1981-1991.

Tonello KC, Teixeira Filho J (2012) Ecofisiologia de três espécies arbóreas nativas da mata atlântica do Brasil em diferentes regimes de água. **Irriga** 17: 85-101. DOI: 10.15809/irriga.2012v17n1p85

Xavier TMT, Pezzopane JEM, Penchel RM, Pezzopane JRM (2019) Leaf water potential and gas exchange of eucalypt clonal seedlings to leaf solar protectant. **Journal of Forestry Research** 30: 57-63. DOI: /10.1007/s11676-018-0602-0

Yalcinkaya T, Uzilday B, Ozgur R, Turkan I, Mano JI (2019) Lipid peroxidation-derived reactive carbonyl species (RCS): their interaction with ROS and cellular redox during environmental stresses. **Environmental and Experimental Botany 165:** 139-149. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.06.004

Zhong C, Cao X, Hu J, Zhu L, Zhang J, Huang J, Jin Q (2017) Nitrogen metabolism in adaptation of photosynthesis to water stress in rice grown under different nitrogen levels. **Frontiers in plant science** 8:1079. DOI: 10.3389/fpls.2017.01079

CAPÍTULO 4 - Como o estresse hídrico afeta plantas de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson) ao longo da fase de crescimento inicial?

Resumo - *Corymbia citriodora* apresenta potencial para ser utilizada na expansão do setor florestal no Brasil, por apresentar maior tolerância aos estresses abióticos que outras espécies comumente cultivadas. Ao longo do seu ciclo as plantas são expostas a diversos eventos de estresse que podem comprometer o seu crescimento e desenvolvimento. O objetivo desse trabalho foi avaliar características fisiológicas, bioquímicas e de crescimento em plantas de *C. citriodora* cultivadas sob diferentes regimes de irrigação, em diferentes idades. Plantas de *C. citriodora*, cultivadas em vasos, foram submetidas a cinco regimes de irrigação (20, 35, 50, 65 e 80% da capacidade máxima de retenção de água no solo) durante 105 dias em casa de vegetação. Ao final desse período foram avaliados o crescimento das plantas, as trocas gasosas, potencial hídrico foliar, teores de clorofila, de carotenoides, de prolina e a peroxidação lipídica pelo conteúdo de MDA. Os regimes de irrigação mais restritivos reduziram o crescimento das mudas. A disponibilidade hídrica afetou os parâmetros fisiológicos, bioquímicos e morfológicos.

Palavras-chave: Trocas gasosas; Eucalipto; mudas florestais; Adaptações morfológicas.

1 Introdução

As florestas plantadas com eucaliptos têm importância significativa na economia de vários países, com possibilidade de usos diversificados como na produção de energia, de celulose, madeira para serraria e chapas de fibras. O rápido crescimento de eucalipto se destaca em comparação com outras espécies florestais. O manejo dessas áreas busca minimizar as restrições ambientais ao crescimento das plantas a exemplo dos fatores climáticos adversos que não podem ser controlados, constituindo, atualmente, um grande desafio para a produção de eucalipto frente às mudanças climáticas (Reis et al., 2021).

Para atender o aumento na demanda por produtos derivados de madeira, o cultivo do eucalipto no Brasil tem-se expandido para áreas com limitações ao crescimento florestal, como de baixa precipitação pluviométrica anual (Ibá, 2021). A baixa disponibilidade hídrica no solo afeta a absorção de água e nutrientes, comprometendo a produtividade florestal (Stape et al.,

2004). Nesse sentido, os programas de melhoramento florestal devem buscar o desenvolvimento de genótipos adaptados às novas áreas de cultivo de forma a obter uma produtividade economicamente viável (Hubbard et al., 2020).

C. citriodora, sinonímia *Eucalyptus citriodora* (Hook.), tem despertado interesse comercial, sendo cultivada por pequenos e médios produtores no Brasil (Souza et al., 2020). Ela apresenta madeira de boa durabilidade e resistente a rachaduras. Não são comuns grandes extensões de áreas cultivadas com *C. citriodora*, sendo que a espécie apresenta um ciclo maior em comparação com espécies de *Eucalyptus*, o que pode ser um dos fatores que contribui para o pequeno número de estudos com a espécie (Cunha et al., 2019). No Brasil, o cultivo do gênero *Corymbia* destina-se, principalmente, para a produção de biomassa lenhosa para energia e madeira para mourões (Brondani et al., 2018) mas pode ser usada para produção de celulose, de óleo essencial, sequestro de carbono, além de demonstrar-se tolerante ao déficit hidrico, pragas e doenças (Healey et al., 2021).

As florestas plantadas apresentam ciclo longo e ficam expostas a fatores adversos durante o mesmo. É esperado, em um futuro próximo, que a constância e extensão do déficit hídrico podem aumentar, afetando a produtividade florestal (Singh et al., 2020). Assim, entender as estratégias que as plantas utilizam para minimizar os impactos de estresses abióticos a nível fisiológico e bioquímico, é importante para a compreensão do comportamento da espécie em ambientes adversos, como de escassez hídrica e aumento da temperatura. As plantas sob déficit hídrico, por exemplo, usam mecanismos para aliviar o impacto causado pelo estresse, eliminando as espécies reativas do oxigênio (ROS), minimizando o efeito degradativo da oxidação (Pan et al., 2018).

O estresse hídrico atinge de maneira diferente as espécies vegetais, reduzindo o potencial hídrico, as trocas gasosas, aumentando o conteúdo de EROS (Osakabe et al., 2014), mas na literatura são escassos os trabalhos que avaliam os efeitos do estresse hídrico em *C. citriodora* numa escala temporal. Nossa hipótese é que o tempo de exposição ao estresse hídrico de mudas recém-plantadas de *C. citriodora* é determinante para que as plantas ativem os mecanismos de adaptação e, dessa forma, o objetivo desse trabalho foi avaliar

características fisiológicas, bioquímicas e de crescimento em plantas de *C. citriodora* cultivadas sob diferentes regimes de irrigação, em diferentes idades.

2 Material e Métodos

Para esse estudo foram usadas mudas obtidas de sementes de *C. citriodora* coletadas de árvores remanescentes de um teste de progênies de polinização aberta, com 40 anos de idade, instalado no município de Jaboticabal, Estado de São Paulo (21°15’ S, 48°19’ W, 605 M A.S.L.), cuja classificação climática de Köppen para a região é Cwa (Alvares et al., 2013). O teste de progênie passou por uma seleção fenotípica individual, restando as 150 melhores árvores. Após a colheita de frutos em 15 dessas árvores, eles foram secos em ambiente semi-sombreado para posterior extração e beneficiamento manual das sementes, as quais foram posteriormente homogeneizadas em um único lote de sementes para a realização do experimento.

2.1 Experimento – conduzido em casa de vegetação, por 105 dias de imposição dos regimes hidricos, entre os meses de novembro de 2019 e março de 2020 submetendo-se, as mudas de *C. citriodora* a cinco regimes hídricos. A casa de vegetação é coberta com filme de plástico transparente de 150 µm de espessura e as laterais revestidas com telas com capacidade de interceptação de 30% da luz. Durante o período experimental foram monitoradas no interior da casa de vegetação as temperaturas e umidades relativas do ar máximas e mínimas (Figura 1). As mudas foram produzidas a partir de sementes germinadas em tubetes 50 cm^3 contendo substrato comercial Plantmax® e areia, cujas plântulas excedentes foram eliminadas deixando-se apenas a mais central e de melhor desenvolvimento. Essas plântulas permaneceram nos tubetes por 90 dias, quando atingiram porte adequado para plantio.

As mudas foram plantadas em vasos de plástico preenchidos com 7 kg de uma amostra de solo da região de Jaboticabal, classificado como Latossolo Vermelho Eutrófico, típico, textura muito argilosa, de acordo com Santos et al. (2018), cuja análise de fertilidade encontra-se na Tabela 1. O solo, seco e peneirado, foi devidamente corrigido de forma a elevar a saturação por bases a

60% utilizando a relação 3:1 de Ca:Mg. No mesmo procedimento foi realizada a adubação fosfatada aplicando-se 100 mg dm^{-3} de P, utilizando superfosfato simples tendo como base as recomendações para a cultura propostas por Gonçalves et al. (1997).

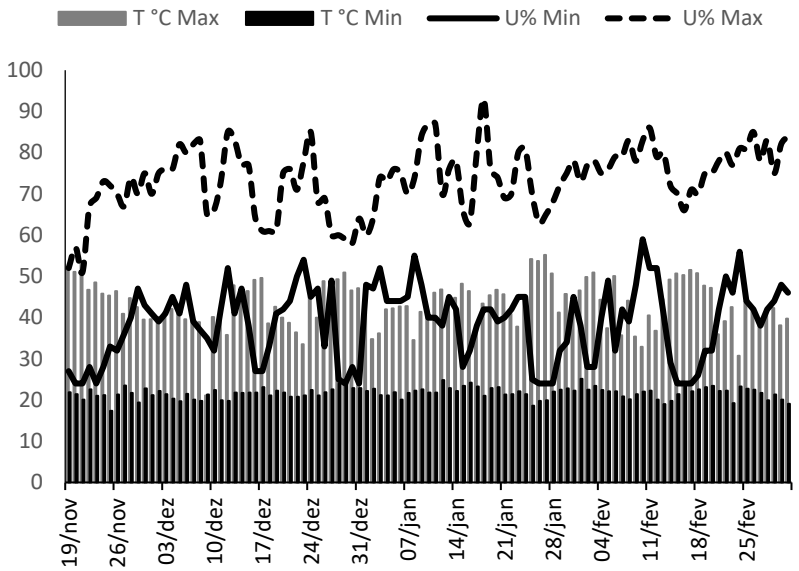

Figura 1. Temperaturas máximas (T ºC Max) e mínimas (T ºC Min) e umidade relativa do ar máxima (U% Max) e mínima (U% Min) diárias obtidas no interior da casa de vegetação durante o período experimental (novembro de 2019 a fevereiro de 2020).

Tabela 1. Caracterização química do solo utilizado no experimento.

pH	MO	P-resina	K	Ca	Mg	H+Al	SB	T	V
$CaCl_2$	g dm^{-3}	mg dm^{-3}	$mmol_c$ dm^{-3}						%
5,6	4	4	1,8	9	3	12	13,8	25,8	53

M.O. matéria orgânica; SB - Soma de bases; T - Capacidade de troca catiônica, V - Saturação por bases

Após o plantio e antes da imposição dos regimes hídricos, as mudas foram aclimatadas por sete dias. Os tratamentos hídricos consistiram na manutenção diária da umidade do solo em 20% (RI1), 35% (RI2), 50% (RI3), 65% (RI4) e 80% (RI5) da capacidade máxima de retenção de água pelo substrato, também denominada como capacidade de campo (Silva et al., 2014). Os tratamentos correspondentes aos níveis de umidade do solo foram mantidos por 105 dias (quando o experimento foi finalizado). A reposição da água evapotranspirada foi feita diariamente, pelo método gravimétrico, visando

repor a quantidade de água suficiente para manter a umidade desejada dos tratamentos. O delineamento utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições de duas plantas por vaso, totalizando 20 vasos e 40 plantas por avaliação.

2.2 Análises fisiológicas

2.2.1 Trocas gasosas e potencial hídrico foliar - Aos 35, 70 e 105 dias após a imposição dos regimes hídricos, no período entre 8 e 10 h, foram avaliadas as taxas de assimilação líquida (*A,* μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), transpiração (*E*, mmol H_2O m^{-2} s^{-1}) e condutância estomática (*gs*, mol H_2O m^{-2} s^{-1}) e o CO_2 intracelular (*Ci*, μmol mol^{-2}), com um analisador de gases por infravermelho (IRGA), modelo LCPro+ (ADC BioScientific Ltd.®) acoplado a uma fonte de luz artificial, regulado para fornecer fluxo de fótons fotossinteticamente ativo de 1000 μmol m^{-2} s^{-1} e sob concentração de CO_2 ambiente (400 ± 10 μmol m^{-2} s^{-1}). Essas avaliações foram realizadas em folhas totalmente expandidas no terço superior da copa.

O potencial hídrico foliar foi determinado no período antemanhã e ao meio-dia, pelo método estabelecido por Scholander et al. (1965), em folhas que foram destacadas da planta e colocadas na câmara de pressão.

2.2.2 Pigmentos fotossintéticos - Os teores de carotenoides e clorofilas foram determinados seguindo a metodologia descrita por Lichtenthaler (1987). Para tanto foram coletados em uma planta de cada repetição por tratamento, discos foliares com 0,025 g a 0,030 g de massa fresca que foram colocados em Eppendorf com 2 ml de acetona 80%, conservado por 48 horas em resfriamento nas temperaturas entre 6 e 10 °C, com posterior leitura em espectrofotômetro, a 470, 647 e 663 nm. Os resultados das análises foram interpolados em uma curva padrão para determinar a quantidade desses compostos (mg g^{-1} de massa fresca de folhas).

2.3 Análises bioquímicas - Foram determinados os teores de malondialdeído (MDA) e prolina em amostras vegetais coletadas ao longo do experimento (35, 70 e 105 dias), de uma planta por vaso, nas quatro repetições.

2.3.1 Teor de MDA - foi estimado pelo conteúdo de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico. Para determinar a concentração de MDA, foi macerado 0,2 g de folhas em ácido tricloroacético depois centrifugada a 10.000 rpm por 15 minutos a -4 °C. Ao sobrenadante se agregou TBA (Thiobarbituric acid reactive). A mistura foi colocada em banho seco a 95 ºC por 30 minutos e depois a solução foi clarificada. A concentração de equivalentes de MDA foi calculada usando um coeficiente de extinção de 1,55 x 10^{-5} mol^{-1} cm^{-1}, com leituras a 535 e 600 nm e os resultados foram expressos em μmol mg^{-1} de massa fresca (Gratão et al., 2012).

2.3.2 Teor de prolina - foi realizada de acordo com a metodologia de Bates et al. (1973), pelo procedimento que consiste na homogeneização manual em gral de porcelana de 0,5 g de massa fresca de material vegetal, com 10 mL de ácido sulfosalicílico a 3% e filtragem. Os teores de prolina foram calculados para a curva padrão e com base na massa fresca, sendo expressos em μmoles de prolina/g massa fresca.

2.4 Análises de crescimento - foram determinadas as variáveis: altura da planta (cm) - medida com régua graduada em mm; diâmetro do coleto (mm) - determinado com paquímetro digital; número de folhas – pela contagem manual do número de folhas por planta; área foliar (cm^2) - determinada com o analisador de área foliar Li-Cor 3100; massa seca de componentes da planta (g) – determinada em balança analítica (0,001 g) após submeter folhas, caule + ramos e raízes à secagem em estufa de circulação de ar a 65 ± 3 ºC, até massa constante. Os parâmetros relativos à biomassa das plantas foram realizados com quatro repetições por tratamento, utilizando 20 unidades experimentais (vasos), com 40 mudas (utilizando a média por unidade experimental).

2.5 Análise de dados - Os dados foram submetidos à análise de variância, seguida de regressão polinomial para expressar as características avaliadas em função dos regimes hídricos. Essas análises foram realizadas no software

AgroEstat® (Barbosa e Maldonado Júnior 2015) e os gráficos elaborados no software Origin®.

3 Resultados

3.1 Características fisiológicas

As trocas gasosas apresentaram variações em respostas aos regimes de irrigação (Figura 2), aumentando à medida que a disponibilidade hídrica foi maior. A taxa de assimilação líquida (*A*, μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), teve ajuste quadrático, com valores mais elevados para as mudas aos 35 dias, seguido pela avaliação aos 105 dias com valores intermediários para os regimes de irrigação RI2, RI3, RI4 e RI5. O CO_2 intracelular (Ci, μmol mol^{-2}) teve ajuste linear, para os regimes hídricos ao longo das avaliações com maiores valores à medida em que a disponibilidade hídrica aumentou e, de maneira diferente ao observado para *A,* os valores de Ci aumentaram com o avanço da idade das mudas.

A transpiração (*E*, mmol H_2O m^{-2} s^{-1}) apresentou ajuste linear nas três épocas de avaliação frente aos regimes de irrigação, aumentando com a maior disponibilidade hídrica e diminuindo com a idade das mudas, porém nos regimes de irrigação mais restritivos (RI1 e RI2) a transpiração foi semelhante nas avaliações aos 70 e 105 dias. A condutância estomática (g_s, mol H_2O m^{-2} s^{-1}), também apresentou ajuste linear, aumentando com a maior disponibilidade hídrica. Os maiores valores foram obtidos aos 35 dias, nas duas outras avaliações os valores foram próximos, com ligeira superioridade para a avaliação aos 105 dias em relação a de 70 dias.

O potencial hídrico foliar (figura 2) na antemanhã apresentou ajuste quadrático em função dos regimes de irrigação nas três épocas de avaliação. Os valores apresentaram tendência de redução com a idade de avaliação e aumento com a maior disponibilidade hídrica, mas com estabilização nos três regimes de irrigação de maior disponibilidade hídrica (RI3, RI4 e RI5). No RI1, o potencial hídrico atingiu valores próximos a -1,2 e -1,4 MPa, ao passo que nos demais regimes de irrigação os valores foram superiores a -0,4 MPa, o que evidência que o RI1 proporcionou limitação hídrica às mudas.

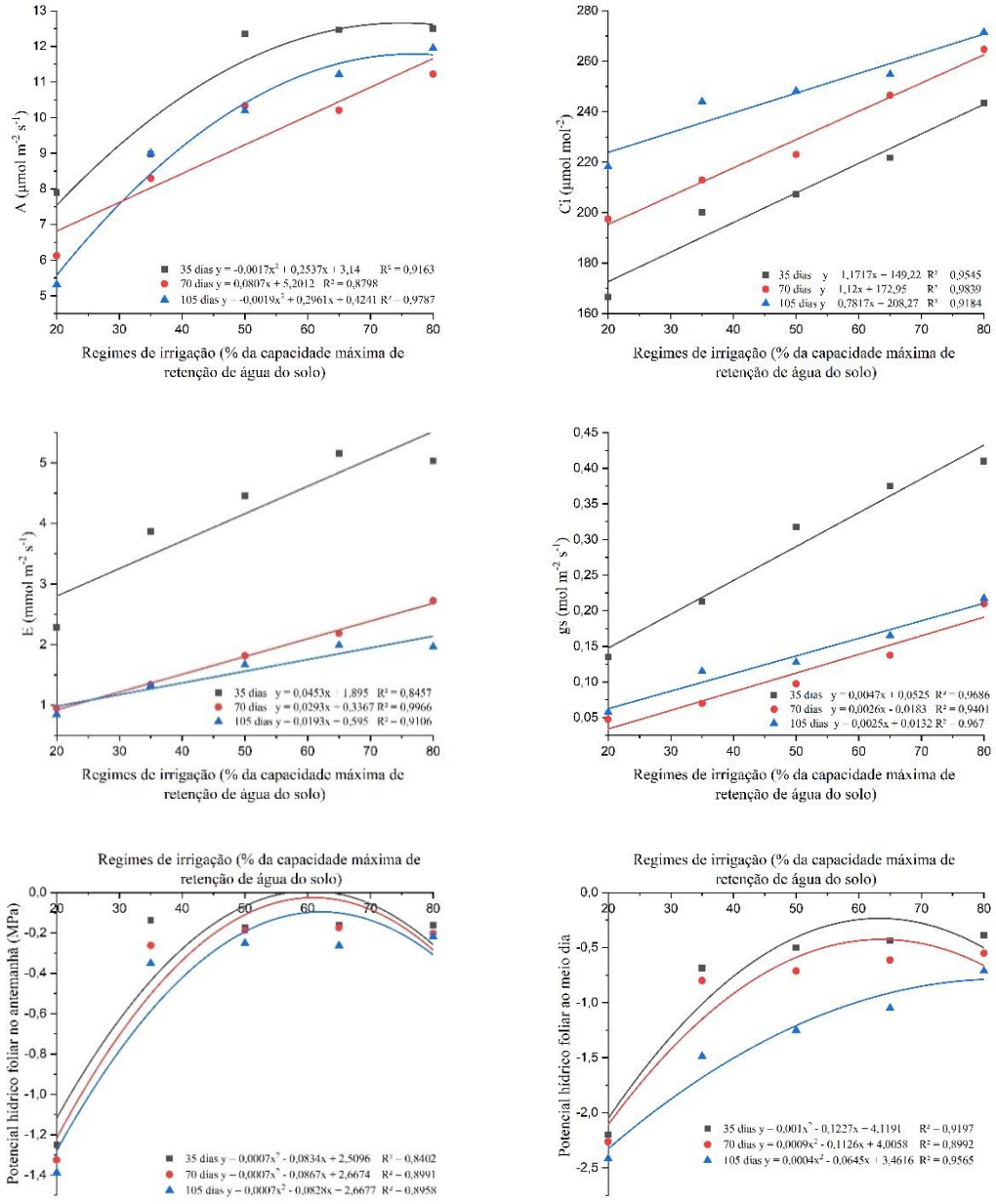

Figura 2. Taxa de assimilação líquida (*A*, µmol m^{-2} s^{-1}), transpiração (*E*, mmol m^{-2} s^{-1}), condutância estomática (g_s, mol m^{-2} s^{-1}), CO_2 intracelular (Ci, µmol mol^{-2}), potencial hídrico foliar 1 (no período antemanhã, -MPa) e potencial hídrico foliar 2 (ao meio dia, -MPa) em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliados aos 35, 70 e 105 dias após imposição dos regimes hídricos.

Na avaliação ao meio-dia, o potencial hídrico foliar atingiu valores mais negativos, porém com comportamento semelhante ao observado na

antemanhã, mas com maior diferenciação entre as épocas de avaliação. O potencial hídrico foliar reduziu com o avanço da idade das plantas e, aos 105 dias, a queda foi mais acentuada que as observadas aos 35 e 70 dias, o acúmulo de biomassa diminuiu o potencial hídrico foliar.

Os conteúdos de clorofilas e de carotenoides reduziram à medida que aumentou a disponibilidade hídrica e a idade das mudas (Figura 3), sendo que as variações dos conteúdos de clorofila a, clorofila b e clorofila a+b tiveram ajustes lineares, em função dos regimes de irrigação, aos 35 e 70 dias, aos 105 dias o ajuste foi quadrático.

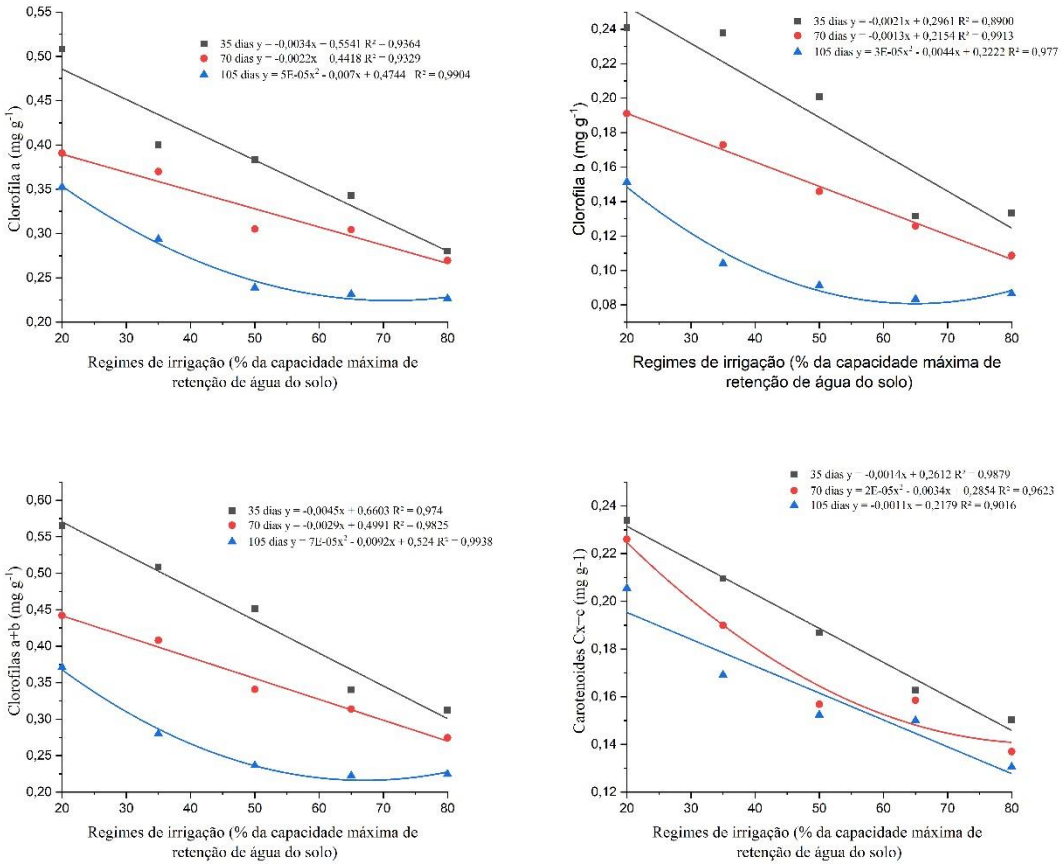

Figura 3. Conteúdo (mg g^{-1}) de clorofila a (Chl^{-a}), clorofila b (Chl^{-b}), clorofilas a+b (Chl a+b) e carotenoides (Cx+c) em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliados aos 35, 70 e 105 dias após imposição dos regimes hídricos.

Os carotenoides tiveram ajuste linear aos 35 dias, quadrático aos 70 e linear aos 105 dias, com tendência à estabilização a partir do RI3 (50% da capacidade de campo), principalmente na avaliação aos 70 dias.

3.2 Características bioquímicas

A peroxidação lipídica, expressa como concentração de malondialdeído (MDA), apresentou ajustes lineares em função dos regimes de irrigação, aos 35 e 70 dias. Aos 105 dias, houve tendência à estabilização nos RI3, RI4 e RI5. Aos 35 dias, o RI1 (tratamento mais restrivo), proporcionou um aumento de 33,14% no conteúdo de MDA. A concentração de MDA aumentou com o avanço na idade das plantas e reduziu à medida que a disponibilidade hídrica aumentou, com tendência de estabilização a partir do regime de irrigação 3 (RI 3 – 50% da capacidade de campo), Figura 4.

O teor de prolina aumentou sob os regimes de irrigação com menor disponibilidade hídrica, independentemente do período avaliado. O teor de prolina teve ajuste linear aos 35 e 70 dias e ajuste quadrático aos 105 dias de imposição dos regimes de irrigação. Aos 35 dias, o RI1 proporcionou um aumento de 45,64% no teor de prolina.

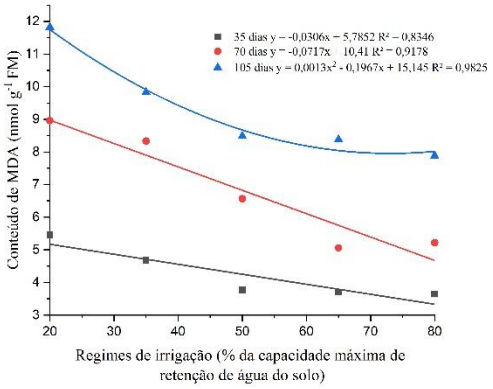

Figura 4. Conteúdos de malondialdeído (MDA, mmol.g^{-1} FM) em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliados aos 35, 70 e 105 dias após imposição dos regimes hídricos.

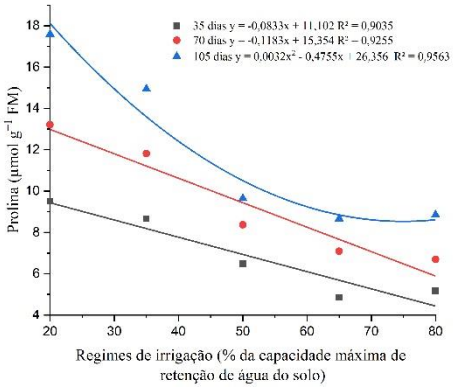

Figura 5. Conteúdos de prolina (mmol.g^{-1} FM) em plantas de *C. citriodora* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliados aos 35, 70 e 105 dias após imposição dos regimes hídricos.

3.3 Características de crescimento

As variáveis de crescimento aumentaram com a idade das mudas, como esperado, e com a disponibilidade hídrica, com ajustes quadráticos para altura, diâmetro ao nível do solo (DNS), massa seca de folhas (MSF), massa seca de caule+ramos (MSC+R), número de folhas e área foliar e ajustes lineares para massa seca de raízes (Figura 5 e 6). A altura, o DNS e o número de folhas apresentaram tendência de estabilização entre os regimes de irrigação RI3 e RI4, com redução em RI5, sugerindo um excesso hídrico nesse regime com 80% da capacidade de campo.

Isto é mais nítido na menor idade (35 dias), em que as plantas eram menores e com menor demanda hídrica. Percebe-se, também, que com o aumento da idade das plantas o incremento nas características frente aos regimes de irrigação é maior. Para a área foliar nas três idades, MSF aos 35 dias, MSC+R aos 35 e 70 dias, a estabilização ocorreu entre nos regimes RI4 e RI5.

A massa seca das raízes teve ajuste linear, com pequeno acréscimo em função do aumento na disponibilidade hídrica aos 35 dias e com respostas maiores aos 75 dias e, principalmente, aos 105 dias.

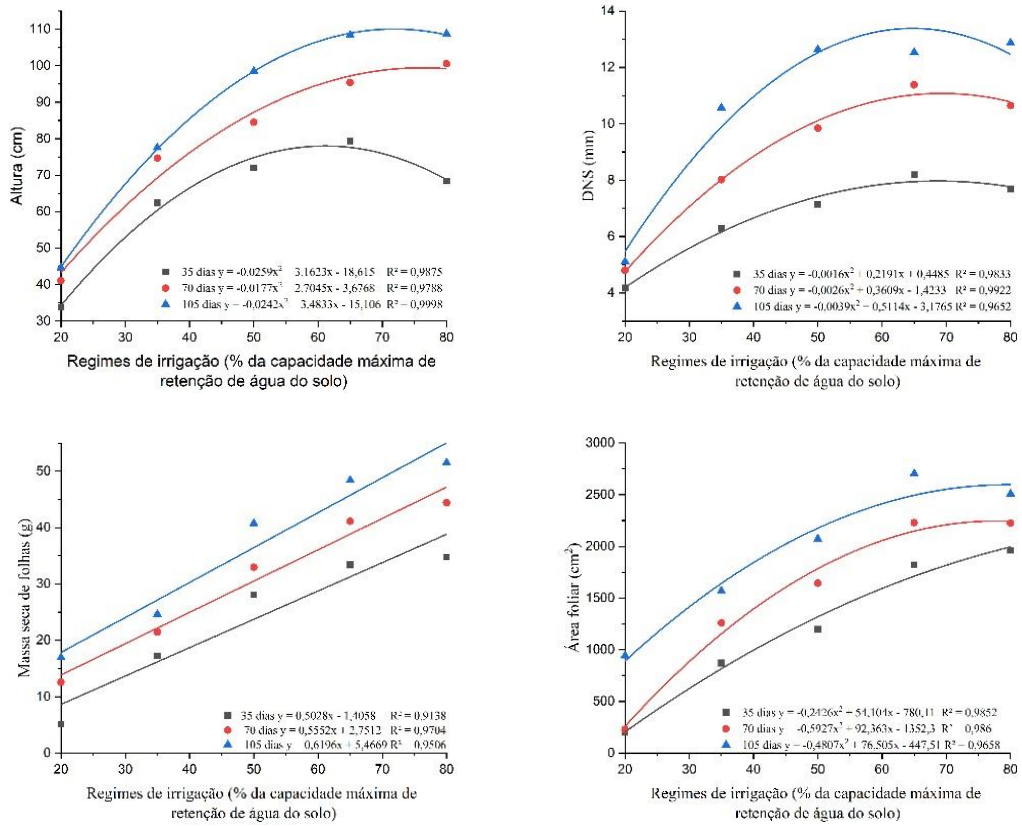

Figura 6. Comportamento da Altura (cm), diâmetro ao nível do solo (mm), número de folhas, área foliar (cm^2) e massa seca (g) de raízes, de caule+ramos e de folhas de plantas de *C. citriodora* submetidas a cincos regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliados aos 35, 70 e 105 dias após imposição dos regimes hídricos.

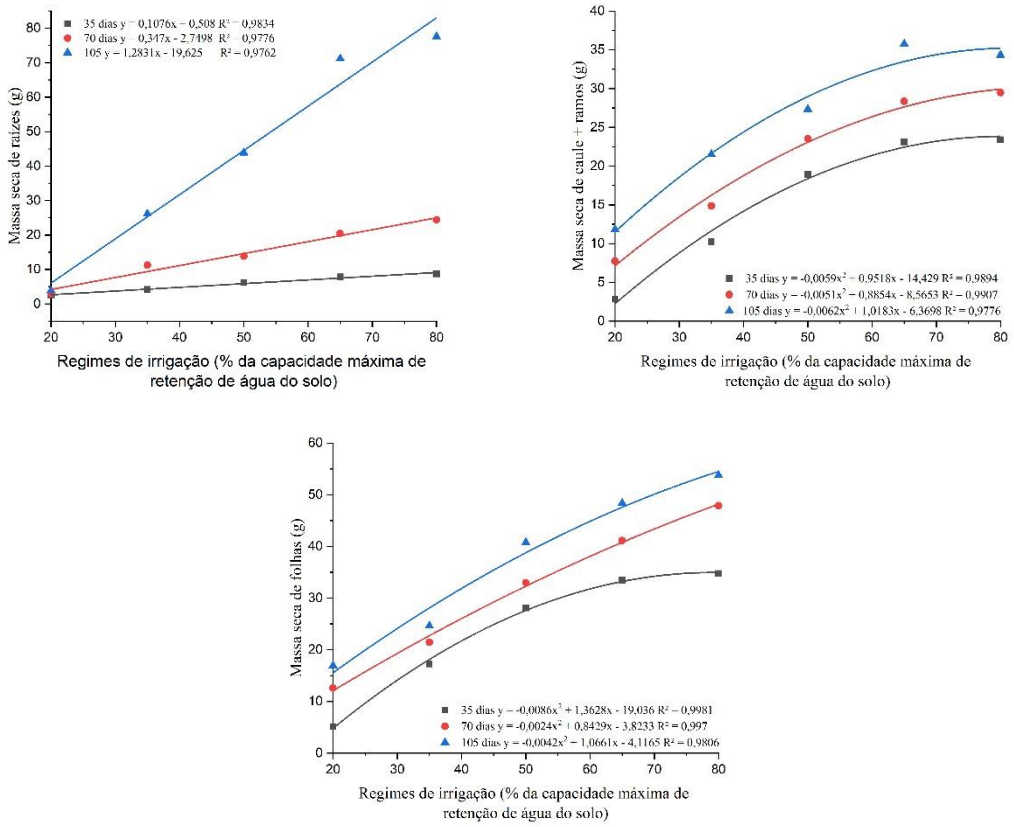

Figura 7. Comportamento da massa seca (g) de raízes, de caule+ramos e de folhas de plantas de C. citriodora submetidas a cincos regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), avaliados aos 35, 70 e 105 dias após imposição dos regimes hídricos.

4 Discussão

4.1 Características fisiológicas

O estresse hídrico altera os mecanismos fisiológicos e bioquímicos em plantas (Souden et al., 2020), e essas alterações variam com a idade. Assim, um mesmo regime hídrico pode proporcionar alterações diferenciadas em função do estádio de desenvolvimento e da demanda hídrica das plantas. As taxas de assimilação líquida (A, μmol m^{-2} s^{-1}), transpiração (E, mmol m^{-2} s^{-1}) e condutância estomática (g_s, mol m^{-2} s^{-1}) foram maiores aos 35 dias, diminuindo nas idades de 70 e 105 dias, pois com o crescimento das mudas houve maior demanda por água para que as plantas mantivessem os mecanismos fisiológicos e bioquímicos. Nóia Junior et al. (2019) afirmam que como

estratégia sob déficit hídrico, as plantas reduzem a expansão foliar, para mitigar o impacto na fotossíntese.

O fechamento estomático afeta as trocas gasosas, reduzindo, por exemplo, a transpiração e o acúmulo de biomassa, sendo esses efeitos dependentes da disponibilidade de água (Utkhao e Yingjajaval ,2015). Em mudas de *Eucalyptus citriodora* (= *C. citriodora*), a taxa de assimilação (*A*) e a condutância estomática (g_s) foram negativamente afetados pelo estresse hídrico (Brilli et al., 2013), corroborando os resultados obtidos aqui nos regimes de irrigação com menor disponibilidade hídrica, principalmente no RI1. O fechamento estomático sob déficit hídrico é uma estratégia adotada pelas plantas para reduzir as perdas de água por transpiração, conforme destacado por Urban et al. (2017).

A variação do potencial hídrico foliar entre os regimes de irrigação foi mais drástica no regime de menor disponibilidade hídrica (RI1), o qual proporcionou potenciais mais negativos, no período antemanhã, com pequenas diferenças nos demais regimes de irrigação. Isso também ocorreu nas avaliações ao meio-dia, porém as alterações foram maiores entre os regimes de irrigação, acentuando-se com o avanço da idade das mudas. Também, da mesma forma como observado para as trocas gasosas, com o aumento da idade das plantas, a demanda hídrica pelas plantas aumenta, o que faz com que o potencial hídrico diminua.

Nas avaliações ao meio-dia, nas idades de 35 e 70 dias, pouca diferença foi observada entre os regimes de irrigação RI3, RI4 e RI5, mas aos 105 dias, houve redução contínua do potencial hídrico com a diminuição na disponibilidade de água para as plantas. A redução do potencial hídrico foliar se acentuou à medida que plantas cresceram, o que se deve a maior demanda hídrica dessas com o acúmulo de biomassa e a expansão da área foliar. Isso leva a uma redução da água disponível, o que reduz o potencial hídrico alterando o turgor e a absorção de água pelas plantas (Dbira et al., 2018), reduzindo a taxa de crescimento nos regimes hídricos mais restritivos.

As clorofilas cumprem funções essenciais na fotossíntese e são sistemas básicos do complexo pigmento-proteína (Chen et al., 2018). Com o avanço da idade e crescimento das mudas, os teores de clorofila e de

carotenoides reduziram, e esses foram menores com o aumento na disponibilidade hídrica. Em plântulas de *E. camaldulensis* Dehnh. submetidas a estresses hídrico mediado por cloreto de sódio e manitol, houve redução nos teores de clorofila e carotenoides (Cha-um e Kirdmanee, 2010), diferentemente do observado no presente trabalho, onde a clorofila aumentou nos menores regimes hídricos.

O déficit hídrico ocasiona danos nos cloroplastos, podendo reduzir os teores de clorofila e produzir espécies reativas de oxigênio - EROS (Flexas et al., 2006). Contudo, observou-se sob menor disponibilidade hídrica, maiores teores de clorofila, o que sugere que as trocas gasosas podem ter sido reduzidas nessas condições pelo fechamento estomático. Os teores de clorofila e carotenoides podem favorecer as membranas do cloroplasto e minimizar a degradação oxidativa (Barros Junior et al., 2021), o que pode, em parte, ter favorecido as mudas nos regimes de irrigação mais restritivos.

4.2 Características bioquímicas

O aumento no conteúdo de MDA nos regimes de irrigação mais restritivos e de forma mais intensa com o aumento da idade das mudas indica degradação na membrana pelo aumento da peroxidação lipídica (Singh et al., 2020). Barros Junior et al. (2021) estudando estresse hídrico em *E. urophylla* encontraram resultados semelhantes. A peroxidação lipídica causa danos irreversíveis à integridade da membrana, aumentando o conteúdo de MDA, constituindo-se num indicador de estresse oxidativo (Ullah et al., 2017). Os maiores conteúdos de MDA observados indicam restrição ao crescimento das plantas causada pela menor disponibilidade hídrica, que acentuou-se com a idade e crescimento das mudas. O conteúdo de MDA e de prolina aos 35 dias, no RI1, indicam um nível de estresse em comparação com os outros regimes hídricos, e com o desenvolvimento das mudas isso se acentuou.

Assim como no MDA, o conteúdo de prolina foi maior nos regimes hídricos mais restritivos (RI e RI2) e com o avanço da idade das mudas. O maior acúmulo de prolina ajuda a manter a pressão no turgor foliar (Tariq et al., 2019) e constitui-se em mecanismo de ajuste osmótico para minimizar o efeito prejudicial do estresse hídrico. Alguns estudos relatam o acúmulo de prolina

sob estresse hídrico em *E. grandis* (Tariq et al., 2019) e *E. tereticornis* (Singh et al., 2020). Esses autores afirmam que regular o potencial osmótico por meio do aumento do conteúdo de prolina, em plantas sob deficiência hídrica, é um tipo de resposta de espécies e, ou genótipos tolerantes ao déficit hídrico (Cha-um et al., 2013). Esse mecanismo de ajuste, pode reduzir o conteúdo de H_2O_2 e MDA, que são produzidos em maior escala sob estresse (Cui et al., 2021), de forma a garantir a sobrevivência das plantas (Rezaei-Chiyaneh et al., 2021).

4.3 Características de crescimento

O crescimento em altura e em diâmetro foram afetados pelos regimes de irrigação, mas em intensidade diferente em função da idade de avaliação. Em plantas mais jovens, portanto, de menor demanda hídrica, as diferenças entre os regimes de irrigação foram menores, as quais aumentaram com o avanço da idade das plantas. Em geral, o crescimento e o acúmulo de biomassa, à exceção da massa seca de raízes, não responderam ao regime de irrigação de 80% da capacidade de campo (RI5), sugerindo um excesso hídrico nessa condição, principalmente na menor idade de avaliação (35 dias). Por outro lado, os regimes de irrigação mais restritivos (RI1 – 20% e RI2 – 35% da capacidade de campo) proporcionaram redução expressiva nos caracteres de crescimento, principalmente com o avanço da idade das plantas.

As reduções no crescimento e no acúmulo de biomassa estão relacionadas às alterações ocorridas nas características fisiológicas e bioquímicas, observadas nos regimes de irrigação mais restritivos às plantas, pois sob déficit hídrico, as plantas regulam o turgor para manter as atividades funcionais que estão em declínio (Farrell et al, 2017). Isso pode ocorrer, por exemplo, mediante o ajuste osmótico (Chen et al., 2020), produção de espécies reativas de oxigênio ou metabolismo oxidativo (Ulloa et al., 2021) e outros mecanismos. Essas características são afetadas antes do crescimento, regulando a tolerância e sobrevivência da planta.

A sensibilidade de espécies de eucaliptos ao estresse hídrico é variável entre as características (Hakamada et al., 2017; Chaín et al., 2020; Reis et al., 2021). Isso pode ser observado nas curvas de respostas aos regimes de irrigação (Figura 5). Por exemplo, a massa seca de raízes foi pouco afetada

pela disponibilidade hídrica aos 35 e 70 dias, provavelmente porque até esse momento a demanda hídrica era pequena e totalmente suprida por um sistema radicular, ainda, pouco desenvolvido. Contudo, aos 105 dias o regime de menor disponibilidade hídrica (RI1), limitou significativamente o desenvolvimento das raízes e o acúmulo de biomassa de raízes apresentou resposta expressiva ao aumento na disponibilidade hídrica. As raízes são efetivas para o sucesso do estabelecimento das mudas, e um sistema radicular bem desenvolvido proporciona melhor acesso à água e nutrientes, garantindo o bom desenvolvimento das plantas (Grossnickle et al., 2005). Por outro lado, o déficit hídrico ocasiona um baixo potencial hídrico no solo, o que dificulta o alongamento das raízes e limita a absorção de água e nutrientes (Chaín et al., 2020), comprometendo o crescimento.

5 Conclusões

Os parâmetros fisiológicos, bioquímicos e de crescimento em plantas de *Corymbia citriodora* são afetados pelos regimes de irrigação, independentemente da idade de avaliação, mas a baixa disponibilidade hídrica torna-se mais prejudicial com o avanço da idade e acúmulo de biomassa.

As alterações manifestadas pelas plantas de *C. citriodora* à baixa disponibilidade hídrica visam garantir a sobrevivência das plantas em detrimento de maior crescimento e acúmulo de biomassa.

6 Referências

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JDM, Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22:711-728. DOI 10.1127/0941-2948/2013/0507

Barbosa JC, Maldonado Junior W (2015) **Agroestat**: sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos. Jaboticabal, FCAV/UNESP, p.396.

Barros Junior UO, Lima MD, Alsahli AA, Lobato AK (2021) Unraveling the roles of brassinosteroids in alleviating drought stress in young Eucalyptus urophylla plants: Implications on redox homeostasis and photosynthetic apparatus. **Physiologia Plantarum**172:748-761. DOI: 10.1111/ppl.13291

Bates LS, Waldren RP, Teare ID (1973) Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and soil** 39:205-207. DOI: 10.1007/BF00018060

Brilli F, Tsonev T, Mahmood T, Velikova V, Loreto F, Centritto M (2013) Ultradian variation of isoprene emission, photosynthesis, mesophyll conductance, and optimum temperature sensitivity for isoprene emission in water-stressed *Eucalyptus citriodora* saplings. **Journal of Experimental Botany** 64:519-528. DOI: 10.1093/jxb/ers353

Brondani GE, Oliveira LS, Konzen ER, Silva ALD, Costa JL (2018) Mini-incubators improve the adventitious rooting performance of Corymbia and Eucalyptus microcuttings according to the environment in which they are conditioned. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** 90:2409-2423. DOI: 10.1590/0001-3765201720170284

Chaín JM, et al. (2020) Growth promotion and protection from drought in Eucalyptus grandis seedlings inoculated with beneficial bacteria embedded in a superabsorbent polymer. **Scientific reports** 10:1-17. DOI: 10.1038/s41598-020-75212-4

Cha-um S, Kirdmanee C (2010) Effects of water stress induced by sodium chloride and mannitol on proline accumulation, photosynthetic abilities and growth characters of eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.). **New forests** 40:349-360. DOI 10.1007/s11056-010-9204-1

Cha-Um S, Somsueb S, Samphumphuang T, Kirdmanee C (2013) Salt tolerant screening in eucalypt genotypes (Eucalyptus spp.) using photosynthetic abilities, proline accumulation, and growth characteristics as effective indices. **In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant** 49:611-619. DOI: 10.1007/s11627-013-9537-5

Chen X, Zhao P, Ouyang L, Zhu L, Ni G, Schäfer KV (2020) Whole-plant water hydraulic integrity to predict drought-induced *Eucalyptus urophylla* mortality under drought stress. **Forest Ecology and Management** 468:118179. DOI: 0.1016/j.foreco.2020.118179

Chen Z, Wang Z, Yang Y, Li M, Xu B (2018) Abscisic acid and brassinolide combined application synergistically enhances drought tolerance and photosynthesis of tall fescue under water stress. **Scientia Horticulturae** 228:1-9. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.10.004

Cui G, Xiao X, Zhang W, Lang D, Li Z, Zhang X (2021) Exogenous silicon relieve drought stress and salt stress of Glycyrrhiza uralensis seedlings by regulating proline metabolism and nitrogen assimilation. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology** 96:1-10. DOI: 10.1080/14620316.2021.1921624

Cunha G M, Gama-Rodrigues AC, Gama-Rodrigues EF, Moreira GR (2019) Nutrient Cycling in Corymbia citriodora in the State of Rio de Janeiro, Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 26, 2019. DOI: 10.1590/2179-8087.020417

Dbira S, Al Hassan M, Gramazio P, Ferchichi A, Vicente O, Prohens J, Boscaiu M (2018) Variable levels of tolerance to water stress (drought) and associated biochemical markers in Tunisian barley landraces. **Molecules** 23:613. DOI: 10.3390/molecules23030613

Farrell C, Szota C, Arndt SK (2017) Does the turgor loss point characterize drought response in dryland plants?. **Plant, cell & environment** 40:1500-1511, 2017. DOI: 10.1111/pce.12948

Flexas J, Bota J, Galmes J, Medrano H, Ribas-Carbó M (2006) Keeping a positive carbon balance under adverse conditions: responses of photosynthesis and respiration to water stress. **Physiologia Plantarum** 127:343-352. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2006.00621.x

Gonçalves JDM, Raij BV, Gonçalves JC (1997) Florestais. *RAIJ, BV et al.* **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**, 2: 247-259.

Gratão PL, Monteiro CC, Carvalho RF, Tezotto T, Piotto FA, Peres LE, Azevedo RA (2012) Biochemical dissection of diageotropica and Never ripe tomato mutants to Cd-stressful conditions. **Plant Physiology and Biochemistry** 56:79-96. DOI: 10.1016/j.plaphy.2012.04.009

Grossnickle SC (2005) Importance of root growth in overcoming planting stress. **New Forests** 30:273-294. DOI: 10.1007/s11056-004-8303-2

Hakamada R, Hubbard RM, Ferraz S, Stape JL, Lemos C (2017) Biomass production and potential water stress increase with planting density in four highly productive clonal Eucalyptus genotypes. **Southern Forests: a Journal of Forest Science** 79:251-257.

Healey AL, et al. (2021). Pests, diseases, and aridity have shaped the genome of Corymbia citriodora. **Communications biology** 4(1): 1-13. DOI: 10.1038/s42003-021-02009-0

Hubbard RM, Carneiro RL, Campoe O, Alvares CA, Figura MA, Moreira GG (2020) Contrasting water use of two Eucalyptus clones across a precipitation and temperature gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management** 475:118407. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118407

Ibá - Indústria Brasileira de Árvores (2021). **Relatório anual Ibá** 176p. < https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf**>**

Lichthentaler HK (1987) **Chlorophyll and carotenoids-pigments of photosynthetic biomembranes**, In: Colowick, SP., Kaplan, NO (ed): Methods in Enzymology, p.148.

Nóia Júnior RDSN, Amaral GC, Pezzopane JEM, Fonseca MDS, Silva APC, Xavier TMT (2019) Ecophysiological acclimatization to cyclic water stress in Eucalyptus**. Journal of Forestry Research** 31:797-806. DOI: 10.1007/s11676-019-00926-9

Osakabe Y, Osakabe K, Shinozaki K, Tran LSP (2014) Response of plants to water stress. Frontiers in plant science 86: 1-8. DOI: 10.3389/fpls.2014.00086

Pan G, Liu W, Zhang H, Liu P (2018) Morphophysiological responses and tolerance mechanisms of *Xanthium strumarium* to manganese stress. **Ecotoxicology and environmental safety** 165:654-661. DOi: 10.1016/j.ecoenv.2018.08.107

Reis LAC, Oliveira JA, Santos Farnese F, Rosado AM, Reis LAC (2021) Chlorophyll fluorescence and water content parameters are good biomarkers for selecting drought tolerant eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management** 481:118682. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118682

Rezaei-Chiyaneh E, Mahdavikia H, Hadi H, Alipour H, Kulak M, Caruso G, Siddique KH (2021) The effect of exogenously applied plant growth regulators and zinc on some physiological characteristics and essential oil constituents of Moldavian balm (*Dracocephalum moldavica* L.) under water stress. **Physiology and Molecular Biology of Plants** 27:2201–2214. DOI: 0.1007/s12298-021-01084-1

Santos HG. et al. (2018**) Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed (rev. e ampl), Brasília, DF, Embrapa, 356p.

Scholander PF, Bradstreet ED, Hemmingsen EA, Hammel HT (1965) Sap pressure in vascular plants: negative hydrostatic pressure can be measured in plants. **Science** 148:339-346. DOI: 10.1126/science.148.3668.339

Silva CD, Nascimento JS, Scarpinati EA, Paula RC (2014) Classification of Eucalyptus urograndis hybrids under different water availability based on biometric traits. **Forest Systems** 23:209-215. DOI: 10.5424/fs/2014232-03528

Singh D, Kaur S, Kumar A (2020) In vitro drought tolerance in selected elite clones of *Eucalyptus tereticornis* Sm. **Acta Physiologiae Plantarum** 42:1-9. DOI: 10.1007/s11738-019-3009-4

Souden S, Ennajeh M, Ouledali S, Massoudi N, Cochard H, Khemira H (2020) Water relations, photosynthesis, xylem embolism and accumulation of carbohydrates and cyclitols in two Eucalyptus species (*E. camaldulensis* and *E. torquata*) subjected to dehydration–rehydration cycle. **Trees** 34:1439-1452, 2020. DOI: 10.1007/s00468-020-02016-4

Souza BM (2020) Genotype-by-environment interaction in *Corymbia citriodora* (Hook.) KD Hill, & LAS Johnson progeny test in Luiz Antonio, Brazil. **Forest Ecology and Management** 460: 117855. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117855

Stape JL, Binkley D, Ryan MG (2004) Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest ecology and management** 193:17-31. DOI: 10.1016/j.foreco.2004.01.020

Tariq A, et al. (2019) Impact of phosphorus application on drought resistant responses of Eucalyptus grandis seedlings. **Physiologia plantarum** 166:894-908. DOI: 10.1111/ppl.12868

Ullah I, Waqas M, Khan MA, Lee IJ, Kim WC (2017) Exogenous ascorbic acid mitigates flood stress damages of *Vigna angularis*. **Applied Biological Chemistry** 60:603-614. DOI: 10.1007/s13765-017-0316-6

Ulloa JL, Aguayo P, Conejera D, Rubilar R, Balocchi C Valenzuela S (2021) Transcriptomic response in foliar and root tissues of a drought-tolerant *Eucalyptus globulus* genotype under drought stress. **Trees**. DOI: 10.1007/s00468-021-02241-5

Urban L, Aarrouf J, Bidel L (2017) Assessing the effects of water deficit on photosynthesis using parameters derived from measurements of leaf gas exchange and of chlorophyll a fluorescence. **Frontiers in plant science** 8:2068. DOI: 10.3389/fpls.2017.02068

Utkhao W, Yingjajaval S (2015) Changes in leaf gas exchange and biomass of *Eucalyptus camaldulensis* in response to increasing drought stress induced by polyethylene glycol. **Trees** 29:1581-1592. DOI: 10.1007/s00468-015-1240-1

CAPÍTULO 5 - Estresse abiótico na germinação de sementes e crescimento de plantas de *Zeyheria tuberculosa (*Vell.) Bureau ex Verl

Resumo – O Ipê-felpudo está na lista de espécies ameaçadas da flora brasileira. Apresenta madeira de boa qualidade e pode ser usado em áreas degradadas e contaminadas com herbicidas. Entretando, estresses abióticos podem prejudicar a germinação de sementes e o desenvolvimento de mudas, de forma que a compreensão do processo germinativo e do desenvolvimento de mudas de espécies arbóreas nativas frente a condições adversas, pode melhorar as estratégias para a conservação da biodiversidade autóctone e fortalecer projetos de reflorestamento. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da temperatura, dos estresses hídrico e salino na germinação de sementes e do estresse hídrico no crescimento de mudas de *Zeyheria tuberculosa.* Três experimentos foram conduzidos em laboratório para avaliar o processo germinativo sob: 1) diferentes temperaturas para germinação: 20, 25, 30, 35 e 40 ºC, 2) diferentes potenciais hídricos simulados com polietilenoglicol (PEG 6000) nas temperaturas de 25 e 30 ºC e 3) diferentes potenciais osmóticos simulados com NaCl nas temperaturas de 25 e 30 ºC; e um experimento em casa de vegetação, submetendo-se mudas da espécie a cinco regimes hídricos (20, 35, 50, 65 e 80% da capacidade máxima de retenção de água no solo). Em laboratório foram avaliadas a germinação, biometria das plântulas e o índice de velocidade de germinação, e em casa de vegetação foram avaliados parâmetros fisiológicos e morfológicos das mudas. As temperaturas de 25 e 30 °C proporcionam maior porcentagem de germinação e plântulas mais vigorosas. A germinação e vigor das sementes diminuem com o aumento dos estresses hídrico e salino. O limite e tolerância do processo germinativo sob estresse hídrico é de -0,6 MPa e de -0,4 MPa sob estresse salino. Os regimes hídricos mais restritivos reduziram os parâmetros fisiológicos e morfológicos das mudas. O desenvolvimento de mudas é comprometido em níveis de umidade inferiores a 50% da capacidade de campo.

Palavras-chave: mudanças climáticas, estresse hidrico, Ipê-preto, Ipê-felpudo.

1 Introdução

Zeyheria e *Tabebuia* são os gêneros mais comuns da família Bignoniaceae (Bastos et al., 2009), sendo que um dos centros de diversidade mais importante da família é o Brasil (Gentry, 1980). *Z. tuberculosa* (Ipê-felpudo) é nativa do Brasil, propagada por via sexuada, podendo chegar até 23 m de altura e 60 cm de diâmetro ao nível do peito (Gonzales e Valeri, 2011). A espécie está na lista vermelha de espécies ameaçadas da flora brasileira

(Martinelli e Moraes, 2013) e na lista de espécies ameaçadas da União Internacional para Conservação da Natureza (Souza et al., 2017), e nos últimos 30 anos a espécie teve uma redução de 30% na sua população (Martinelli e Moraes, 2013). A madeira do Ipê-felpudo é utilizada na construção civil, produção de celulose e fabricação de móveis e a espécie, também, é usada no paisagismo (Lorenzi, 2000).

Os estresses abióticos podem reduzir a germinação das sementes e a sobrevivências das plântulas (Martins et al., 2014). Nesse sentido, estudos com espécies arbóreas tropicais com potencial para uso em reflorestamento ambiental ou comercial são importantes, para compreender como as espécies se comportam frente aos estresses abióticos (Contin et al., 2014). Desses estresses, os causados por déficit hídrico, salinidade e temperaturas adversas têm colocado em alerta os pesquisadores, pois podem comprometer não somente a agricultura, mas também a sobrevivência e perpetuação de espécies em condições naturais (Tardieu et al., 2011; Matos et al., 2018). Esses fatores estressantes têm sido apontados com probabilidades de ocorrência em maior frequência e intensidade, dada às mudanças climáticas globais (Ipcc, 2014).

Essas alterações no clima podem influenciar na germinação e estabelecimento das plântulas, ocasionado ambientes adversos, com elevadas temperaturas, escassez de água e solos salinos. Sementes com maior potencial fisiológico apresentam vantagens ecológicas em condições ambientais adversas, o que pode garantir o estabelecimento em cada ecossistema (Vargas-Figueroa e Torres-González, 2018), de forma que elucidar o comportamento fisiológico de sementes fortalece a compreensão sobre a dinâmica ecológica da espécie. O potencial fisiológico de sementes é afetado pela temperatura, que regula a absorção de água, e influencia as reações bioquímicas (Carvalho e Nakagawa, 2012).

Sob déficit hídrico, as plantas expressam adaptações em suas características anatômicas, morfológicas e fisiológicas (Anton et al., 2020) e conhecer a faixa de tolerância das espécies aos estresses abióticos, pode facilitar o manejo de espécies nativas visando a conservação (Valdovinos et al., 2021). O polietilenoglicol (PEG) tem sido muito utilizado para simular o déficit

hídrico na germinação de sementes e na fase inicial de mudas (Bukhari et al., 2021). O PEG tem alto peso molecular, o que dificulta a absorção da água pela parede celular, e pode-se utilizar diferentes concentrações do mesmo para simular potenciais hídricos distintos durante a germinação (Tabatabai et al., 2021).

O estresse salino induz ao estresse hídrico e pode causar estresse oxidativo, ocasionando danos celulares e adaptações morfológicas (Ma et al., 2017). Além do estresse hídrico, a salinidade diminui o crescimento da planta pela toxidade iônica (Aljasmi et al., 2021). Para minimizar o impacto do estresse salino, as plântulas podem acumular osmólitos, para manter o equilíbrio osmótico (Mickky et al., 2019). Esses sais que se acumulam no citoplasma, podem gerar a deterioração das membranas celulares, com isso favorece a passagem de íons no cloroplasto (Pan et al., 2020). Explorar ambientes com fatores desfavoráveis é um desafio para os produtores, e estudar espécies com potencial frente às condições ambientais adversas, pode ajudar na expansão do setor agrícola.

É importante que o setor florestal no Brasil explore outras espécies, além das tradicionais (eucalipto e pinus), diversificando o setor e possibilitando o cultivo de novas espécies com potencial comercial (Matos et al., 2018). Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de estresses abióticos (térmico, hídrico e salino) na germinação e do estresse hídrico no crescimento de plantas de Z*. tuberculosa.*

2 Material e Métodos

Frutos de *Zeyheria tuberculosa* (ipê-felpudo) foram coletados de 40 árvores de um teste de progênie, com 24 anos de idade, instalado no município de Jaboticabal, Estado de São Paulo (21°15’ S, 48°19’ W, 605 M A.S.L.), cuja classificação climática de Köppen para a região é Cwa (Alvares et al., 2013).

Após a coleta, os frutos foram misturados e colocados para secar à sombra por 48 horas e, posteriormente, as sementes foram extraídas e beneficiadas, constituindo um único lote.

Antes da realização dos experimentos foi determinado o teor de água das sementes pelo método da estufa a 105 ºC ± 3 ºC por 24 horas (Brasil, 2009), com cinco repetições de 20 sementes.

2.1. Experimento 1 – conduzido no delineamento inteiramente casualizado (DIC), com cinco tratamentos, constituídos por cinco temperaturas (20, 25, 30, 35 e 40 °C) para germinação de sementes, fotoperíodo de 8 h e cinco repetições de 20 sementes/tratamento. As sementes foram distribuídas sobre duas folhas de papel mata-borrão, umedecidas com água deionizada em quantidade equivalente a 2,5 vezes a massa do papel não hidratado, acondicionadas em caixas de plástico transparentes (11 x 11 x 3 cm) com tampa, envoltas em sacos de plásticos para a manutenção da umidade do substrato. Foram realizadas contagens diárias das sementes germinadas, entre o terceiro e o vigésimo primeiro dia após a instalação do teste (Brasil, 2009).

Ao final do teste determinou-se a porcentagem de germinação; índice de velocidade de germinação (IVG) de acordo com Maguire (1962); comprimento total de plântulas, da raiz e da parte aérea e massa seca das plântulas de acordo com Labouriau e Valadares (1976). Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, com o uso do software AgroEstat® (Barbosa e Maldonado Júnior, 2015).

2.2 Experimento 2 – sementes de *Z. tuberculosa* foram submetidas à germinação sob seis potenciais hídricos (0,0 (água deionizada); -0,2, -0,4, -0,6, -0,8 e -1,0 MPa) nas temperaturas de 25 e 30 ºC, consideradas ótimas para o processo germinativo, com base nos resultados do Experimento 1. Os potenciais hídricos estudados foram obtidos com o uso de soluções aquosas de polietilenoglicol 6000 (PEG 6000), segundo recomendações de Villela et al. (1991). O experimento foi implantado em DIC, em esquema de parcelas subdivididas, com as parcelas constituídas pelas temperaturas e as subparcelas pelos potenciais hídricos, com cinco repetições de 20 sementes/tratamento, seguindo-se os mesmos procedimentos do Experimento 1, com avaliação da germinação e do IVG.

2.3. Experimento 3 - o experimento foi implantado em DIC, em esquema de parcelas subdivididas, com cinco repetições de 20 sementes/tratamento, seguindo-se os mesmos procedimentos do Experimento 2 com avaliação da germinação e do IVG. As sementes de *Z. tuberculosa* foram submetidas à germinação em substrato umedecido com soluções aquosas de cloreto de sódio (NaCl) para simular o estresse salino, nos seguintes potenciais osmóticos: 0,0 (controle), - 0,2, - 0,4, - 0,6, - 0,8, - 1,0 MPa. Para obtenção das soluções de NaCl, foi utilizada a tabela proposta por Richards (1980), onde se diluiu o reagente, para simulação do potencial osmótico. Os potenciais osmóticos foram confirmados por meio da osmolaridade.

2.4 Experimento 4 – conduzido em vasos em casa de vegetação em delineamento de blocos casualizados, com os tratamentos constituídos por cinco níveis de umidade do solo (20, 35, 50, 65 e 80%), e oito repetições de duas plantas/vaso. A casa de vegetação é coberta com filme de plástico transparente de 150 µm de espessura e as laterais revestidas com telas com capacidade de interceptação de 30% da luz diária. O experimento foi conduzido entre os meses de dezembro de 2018 e junho de 2019, totalizando 185 dias de imposição dos regimes hidrico. Durante o período experimental foram monitoradas no interior da casa de vegetação as temperaturas e umidades relativas do ar máximas e mínimas (Figura 1).

As mudas foram produzidas a partir de sementes germinadas em recipientes contendo substrato comercial Plantmax® e areia, cujas plântulas foram, posteriormente, repicadas para tubetes de 50 cm^3, permanecendo nesses recipientes por 150 dias, quando atingiram porte adequado para o plantio.

As mudas foram plantadas em vasos de plástico preenchidos com 7 kg de uma amostra de solo da região de Jaboticabal, classificado como Latossolo Vermelho Eutrófico, típico, textura muito argilosa, de acordo com Santos et al. (2018a), cuja análise de fertilidade encontra-se na Tabela 1. O solo, seco e peneirado, foi devidamente corrigido de forma a elevar a saturação por bases a 60% utilizando a relação 3:1 de Ca:Mg. No mesmo procedimento foi realizada a

adubação fosfatada aplicando-se 100 mg dm^{-3} de P, utilizando superfosfato simples tendo como base as recomendações de Gonçalves et al. (1997).

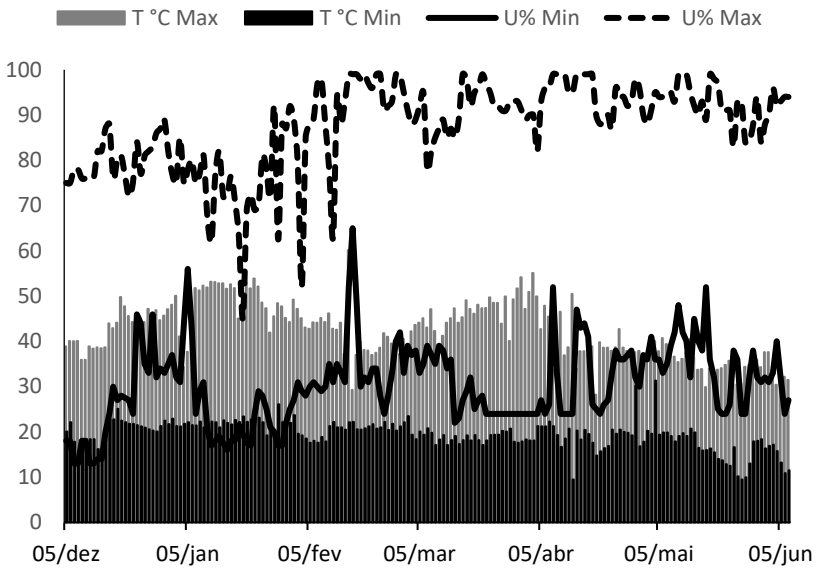

Figura 1. Temperaturas máximas (T ºC Max) e mínimas (T ºC Min) e umidade relativa do ar máxima (U% Max) e mínima (U% Min) diárias obtidas no interior da casa de vegetação durante o período experimental (dezembro de 2018 a junho de 2019).

Tabela 1. Caracterização química do solo utilizado no experimento.

pH	MO	P-resina	K	Ca	Mg	H+Al	SB	T	V
$CaCl_2$	g dm^{-3}	mg dm^{-3}	$mmol_c$ dm^{-3}						%
5,6	4	4	1,8	9	3	12	13,8	25,8	53

M.O. matéria orgânica; SB - Soma de bases; T - Capacidade de troca catiônica, V - Saturação por bases.

Após o plantio e antes da imposição dos regimes hídricos (mudas com 150 dias de idade), as mudas passaram por um período de aclimatação de sete dias. Os tratamentos, constituídos por cinco regimes de irrigação, consistiram na manutenção diária da umidade do solo em 20% (RI1), 35% (RI2), 50% (RI3), 65% (RI4) e 80% (RI5) da capacidade máxima de retenção de água pelo substrato, também denominada como capacidade de campo (Silva et al., 2014). Os tratamentos correspondentes aos níveis de umidade do solo foram mantidos por 185 dias após o período de aclimatação das mudas, quando o experimento foi finalizado. A reposição da água evapotranspirada foi feita

diariamente, pelo método gravimétrico, visando repor a quantidade de água suficiente para manter a umidade desejada dos tratamentos.

2.4.1. Trocas gasosas e potencial hídrico foliar - Aos 180 dias após a imposição dos regimes hídricos, foram avaliadas a intervalos de 2 horas, no período entre 8 e 16 h, a taxa de assimilação líquida (*A,* μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), a transpiração (*E*, mmol H_2O m^{-2} s^{-1}) a condutância estomática (g_s, mol H_2O m^{-2} s^{-1}) e CO_2 intracelular (*Ci*, μmol mol^{-2}), com um analisador de gases por infravermelho (IRGA), modelo LCPro+ (ADC BioScientific Ltd.®) acoplado a uma fonte de luz artificial, regulada para fornecer fluxo de fótons fotossinteticamente ativo de 1000 μmol m^{-2} s^{-1} e sob concentração de CO_2 ambiente (400 ± 10 μmol m^{-2} s^{-1}). Essas avaliações foram realizadas em folhas totalmente expandidas no terço superior da copa.

O potencial hídrico foliar foi determinado no período antemanhã e ao meio-dia, pelo método estabelecido por Scholander et al. (1965), em folhas que foram destacadas da planta e colocadas na câmara de pressão.

2.4.2. Biometria, área foliar e massa das plantas - Ao final do experimento, foram determinadas as variáveis: altura da planta (cm) - medida com régua graduada em mm; diâmetro do coleto (mm) - determinado com paquímetro digital; número de folhas – pela contagem manual do número de folhas por planta; área foliar (cm^2) - determinada com o analisador de área foliar Li-Cor 3100; massa seca de componentes da planta (g) – determinada em balança analítica (0,0001 g) após submeter folhas, caule + ramos e raízes à secagem em estufa de circulação de ar a 65 ± 3 ºC, até massa constante. Os parâmetros relativos à biomassa das plantas foram avaliados em quatro repetições por tratamento.

2.4.3. Análise de dados – Para o experimento 1, os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e comparação de médias entre temperaturas, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, com o uso do software AgroEstat® (Barbosa e Maldonado Júnior, 2015).

No experimento 2, para descrever o comportamento germinativo e IVG em função dos potenciais hídricos, utilizou-se um modelo logístico não linear (logística 1), conforme apresentado em Azerêdo et al. (2016):

$y = a/(1 + e^{-k(x-xc)})$ em que:

y= valor da característica para um determinado valor de x (potencial hídrico);

a= valor máximo da característica y;

k= taxa relativa de crescimento (no caso presente de redução de y);

xc= valor de x (potencial hídrico) que proporciona uma redução no valor máximo da característica em 50%.

No experimento 3, os dados obtidos foram submetidos às mesmas análises estatísticas descritas no experimento anterior (experimento 2).

No experimento 4, os dados foram submetidos à análise de variância, seguida de regressão polinomial para expressar as características avaliadas em função dos regimes hídricos. Essas análises foram realizadas com o uso do software AgroEstat® (Barbosa e Maldonado Júnior, 2015). Os gráficos foram elaborados no software Origin®.

3 Resultados

3.1 Germinação de sementes sob diferentes temperaturas

As sementes apresentaram teor de água de 5,5%. As temperaturas de 25, 30 e 35 ºC foram as mais adequadas para o processo germinativo (Tabela 2), com germinação superior a 90%; mesmo a 20º C, em que a germinação foi inferior às observadas nas temperaturas de 25, 30 e 35 ºC, a germinação foi alta (80%); a temperatura de 40 ºC inibiu totalmente a germinação das sementes. Para o vigor, avaliado pelo índice de velocidade de germinação (IVG), a temperatura de 30 ºC proporcionou valores superiores, seguida pelas temperaturas de 25 e 35 ºC e a temperatura de 20 ºC proporcionou valores inferiores às demais temperaturas.

Tabela 2. Germinação (%), índice de velocidade de germinação (IVG), comprimento de raiz (CRaiz, mm), comprimento da parte aérea (CPA, mm), comprimento total de plântulas (CTP, mm) e massa seca das plântulas (MSP, g plântula^{-1}) obtidos a partir de sementes de *Z. tuberculosa* submetidas a diferentes temperaturas de germinação.

	Temperaturas (°C)					
	20	25	30	35	40	CV (%)
Germinação	80b	94a	93a	90a	0c	7,34
IVG	1,89c	3,98b	6,50a	4,62b	0d	24,22
CRaiz	51,12c	92,63a	70,99b	39,43d	0e	10,79
CPA	26,53b	56,08a	55,10a	57,85a	0c	5,99
CTP	77,64d	148,71a	126,10b	97,28c	0e	8,03
MSP	0,05ab	0,06a	0,05ab	0,05b	0c	7,28

Médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV(%) – coeficiente de variação experimental.

O comprimento da raiz (CRaiz) e total das plântulas (CTP) foram maiores a 25 ºC, o comprimento da parte aérea (CPA) foi superior na faixa de 25 a 35 ºC e a massa seca de plântulas (MSP) a 25 ºC foi superior a observada a 35 ºC, sem diferença entre as demais temperaturas, com exceção de 40 ºC. Com base nesses resultados, as temperaturas de 25 e 30 ºC foram escolhidas para os experimentos de estresse hídrico e salino, pois foram consideradas adequadas para a espécie.

3.2 Germinação de sementes sob estresses hídrico e salino

No Experimento 2, houve interação significativa entre temperaturas e potenciais hídricos para a porcentagem e velocidade de germinação (Figura 2). O tratamento controle proporcionou germinação superior a 90% em ambas as temperaturas. Com a redução do potencial hídrico, o IVG e a germinação apresentaram quedas acentuadas, entretanto o IVG foi superior na temperatura de 30 ºC até -0,4 MPa.

A germinação foi satisfatória (> 80%) até o potencial de -0,4 MPa, a partir desse potencial apresentou uma queda acentuada, sendo praticamente inibida a partir do potencial -0,8 MPa. A germinação foi reduzida em 50% do seu valor máximo no potencial de -0,7 MPa a 25 ºC e -0,6 MPa a 30 °C. O IVG apresentou maior sensibilidade ao estresse hídrico, com redução de 50% do

seu valor máximo em -0,3 MPa na temperatura de 25 ºC e -0,3 MPa na temperatura de 30 °C.

No Experimento 3, observou-se interação significativa entre temperaturas e potenciais osmóticos, tanto para germinação quanto para o IVG (Figura 3). A germinação diferiu entre as temperaturas apenas no potencial de -0,4 MPa com superioridade da temperatura de 30º C, e foi satisfatória (>85%) até o potencial de -0,2 MPa a 25 ºC e -0,4 MPa a 30 ºC. O limite de tolerância da espécie ao estresse salino encontra-se próximo a -1,0 MPa.

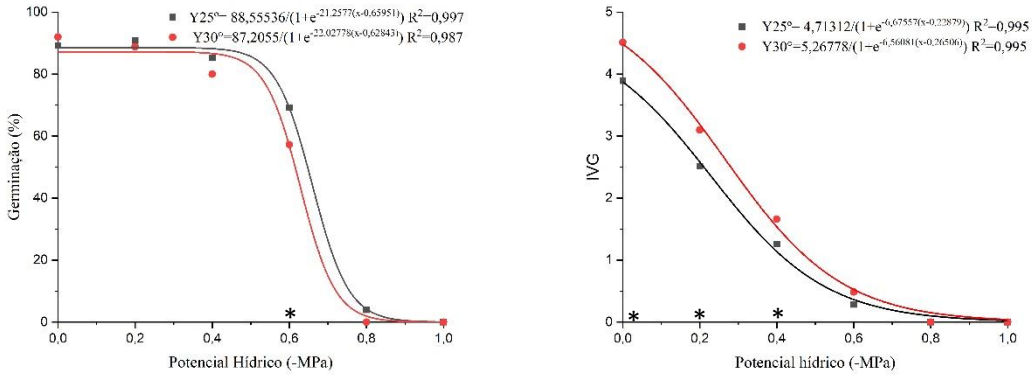

Figura 2. Equações que estimam a germinação (G, %) e índice de velocidade de germinação (IVG) de sementes de *Z. tuberculosa* submetidas a déficit hídrico induzido por PEG 6000, a 25 e 30 °C. (* - indica potenciais hídricos onde houve diferenças significativas (p<0,05) entre as temperaturas).

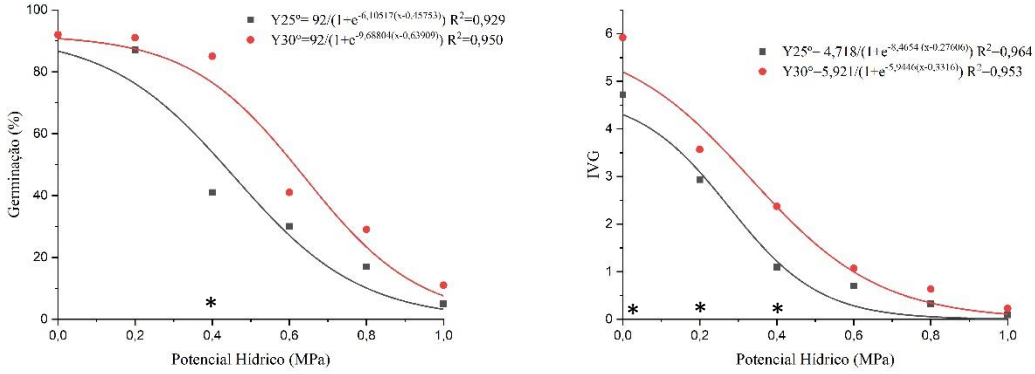

Figura 3. Equações que estimam a germinação (G, %) e índice de velocidade de germinação (IVG) de sementes de *Z. tuberculosa* submetidas a déficit salino induzido por NaCl, a 25 e 30 °C. (* - indica potenciais hídricos onde houve diferenças significativas (p<0,05) entre as temperaturas).

Os potenciais osmóticos de -0,5 MPa a 25 ºC e -0,6 MPa a 30 ºC, proporcionaram redução de 50% no valor máximo da germinação. O IVG foi superior a 30 ºC até -0,4 MPa e o potencial osmótico de -0,3 MPa proporcionou redução de 50% no IVG em ambas as temperaturas.

3.3 Desempenho de plantas sob diferentes regimes de irrigação

Houve redução na taxa de assimilação líquida (*A,* µmol CO2 m^{-2} s^{-1}), transpiração (*E*, mmol H_2O m^{-2} s^{-1}), CO_2 intracelular (*Ci*, µmol mol^{-2}) condutância estomática (g_s, mol H2O m^{-2} s^{-1}) e potencial hídrico foliar (MPa) na antemanhã e ao meio-dia, frente aos regimes de irrigação proporcionados pelos diferentes níveis de umidade do solo (Figura 4). O potencial hídrico foliar, tanto na antemanhã quanto ao meio-dia, aumentou à medida que a disponibilidade de água foi maior, e os valores observados ao meio-dia foram inferiores àqueles observados na antemanhã.

Nas avaliações ao longo do dia (Figura 5) percebe-se, em geral, que as trocas gasosas apresentaram maiores valores às 8 horas, com redução até às 14 horas e com tendência de estabilização às 16 h. Os regimes de irrigação mais restritivos (RI1, RI2 e RI3) proporcionaram os menores valores de trocas gasosas, independentemente do horário de avaliação. As reduções observadas nas trocas gasosas seguiram um padrão dependente da elevação da temperatura até às 14 horas, e posteriormente apresentaram tendência de estabilização.

O aumento na disponibilidade hídrica favoreceu o desenvolvimento das mudas (Figuras 6 e 7), porém foi observada tendência de estabilização na maioria das características de crescimento nos dois ou três regimes de maior disponibilidade hídrica (RI3, RI4 e RI5, respectivamente 50, 65 e 80% de umidade do solo).

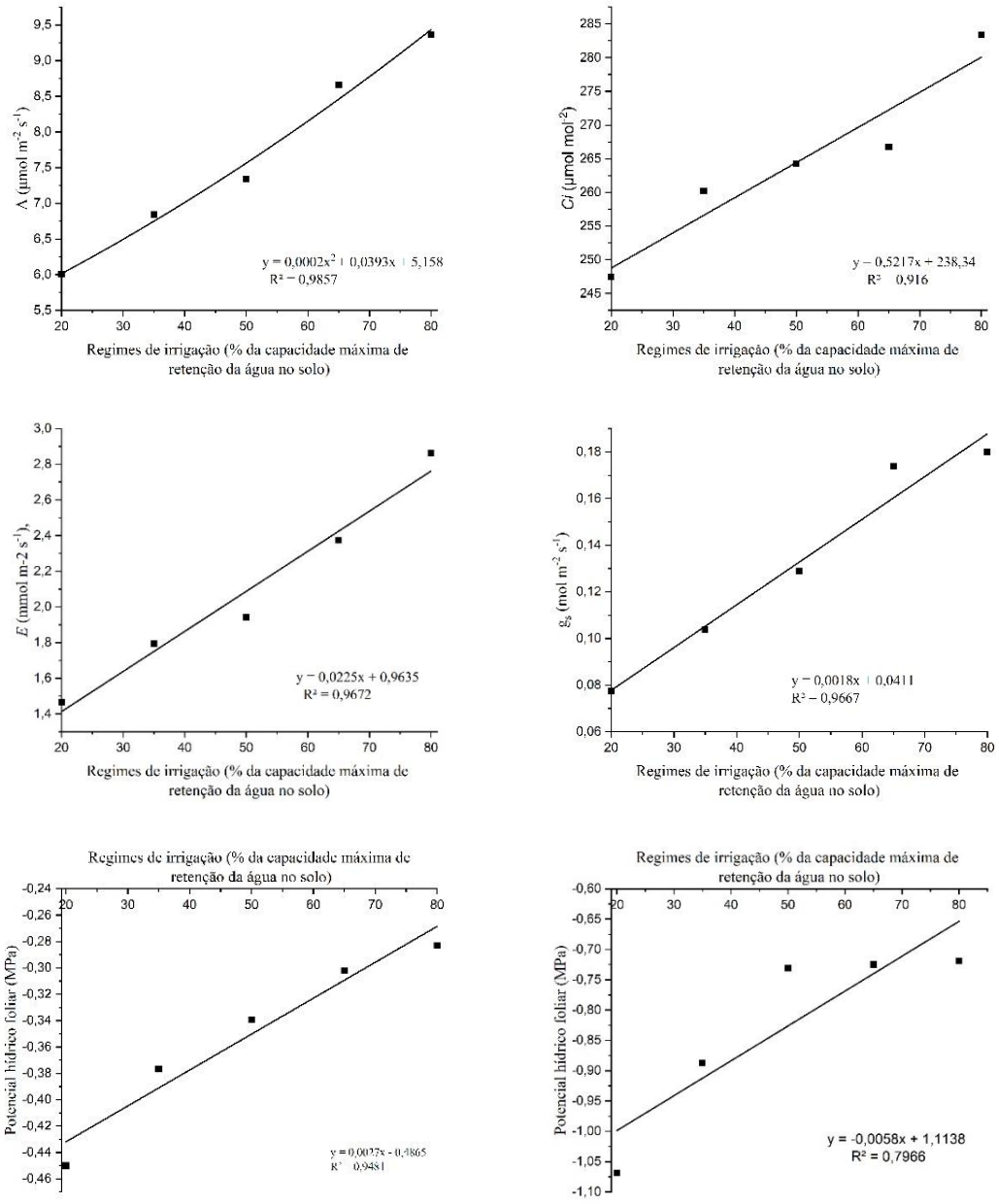

Figura 4. Taxa de assimilação líquida (*A*, µmol m^{-2} s^{-1}), transpiração (*E*, mmol m^{-2} s^{-1}), condutância estomática (g_s, mol m^{-2} s^{-1}) e CO_2 intracelular (Ci, µmol mol^{-2}), potencial hídrico foliar 1 (no período antemanhã, MPa) e potencial hídrico foliar 2 (ao meio dia, MPa) em plantas de *Z. tuberculosa* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), aos 185 dias após imposição dos regimes hídricos.

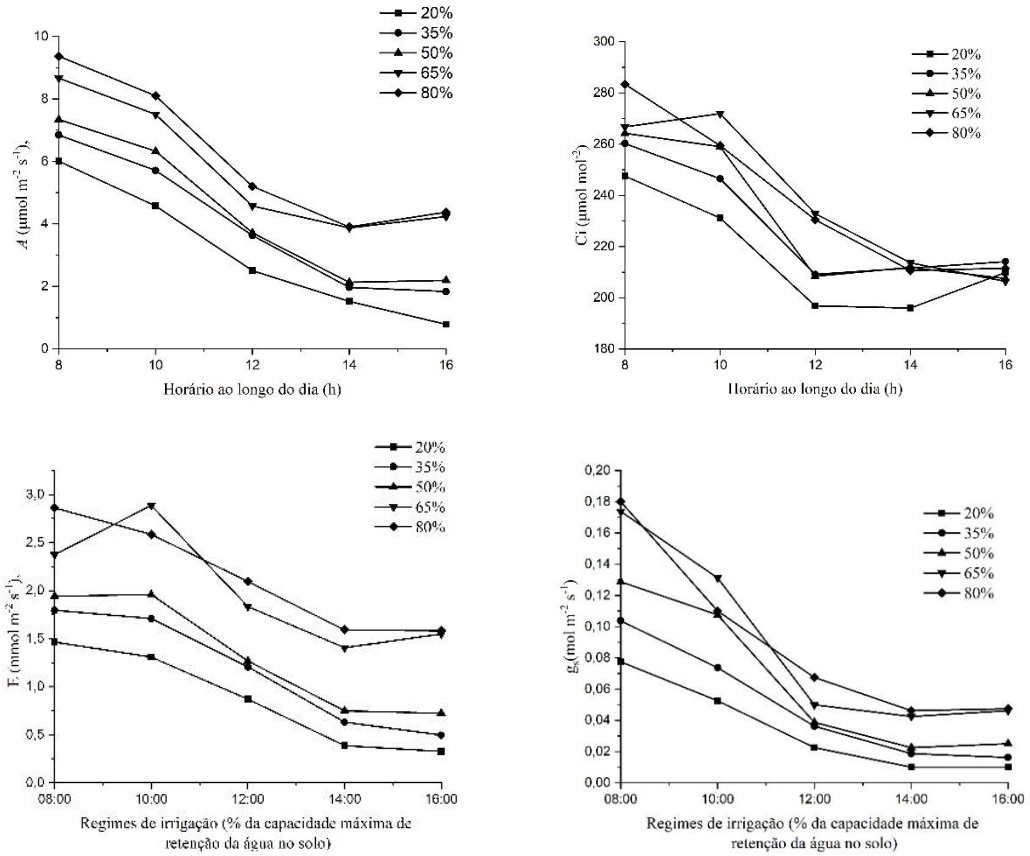

Figura 5. Taxa de assimilação líquida (*A*, µmol m^{-2} s^{-1}), transpiração (*E*, mmol m^{-2} s^{-1}), condutância estomática (g_s, mol m^{-2} s^{-1}), CO_2 intracelular (Ci, µmol mol^{-2}) em plantas de *Z. tuberculosa* submetidas a cinco regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), aos 185 dias após imposição dos regimes hídricos.

Para altura, diâmetro ao nível do solo (DNS), massa seca de raízes (MSR), massa seca de caule+ramos (MSC) e massa seca das folhas (MSF), a resposta foi quadrática com tendência de estabilização nos três regimes com maior disponibilidade hídrica (RI3, RI4 e RI5).

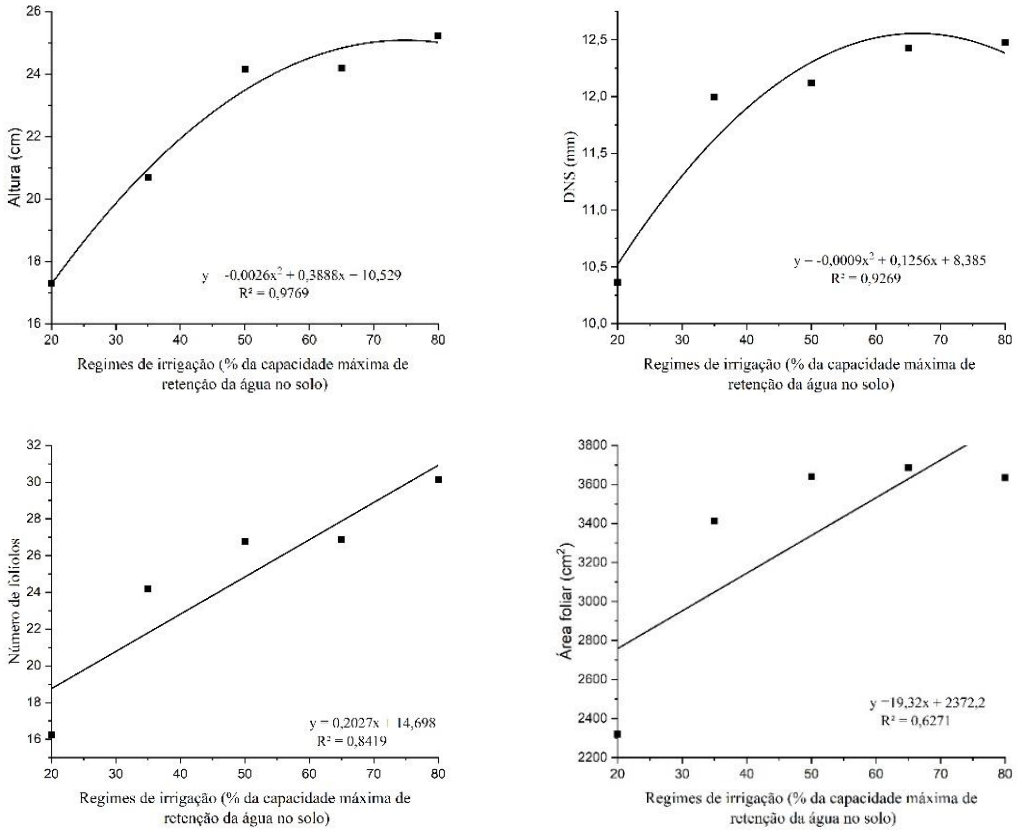

Figura 6. Comportamento da altura (cm), diâmetro ao nível do solo (mm), número de folhas e área foliar (cm^2) de plantas de *Z. tuberculosa* submetidas a cincos regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), aos 185 dias após imposição dos regimes hídricos.

O RI1 (20% de umidade do solo) proporcionou redução expressiva nas características analisadas em comparação com o RI5 (com maior disponibilidade hídrica). Nesse sentido, a altura teve redução de 31% entre esses dois regimes de irrigação e a MSF foi a característica de maior redução, com 46%.

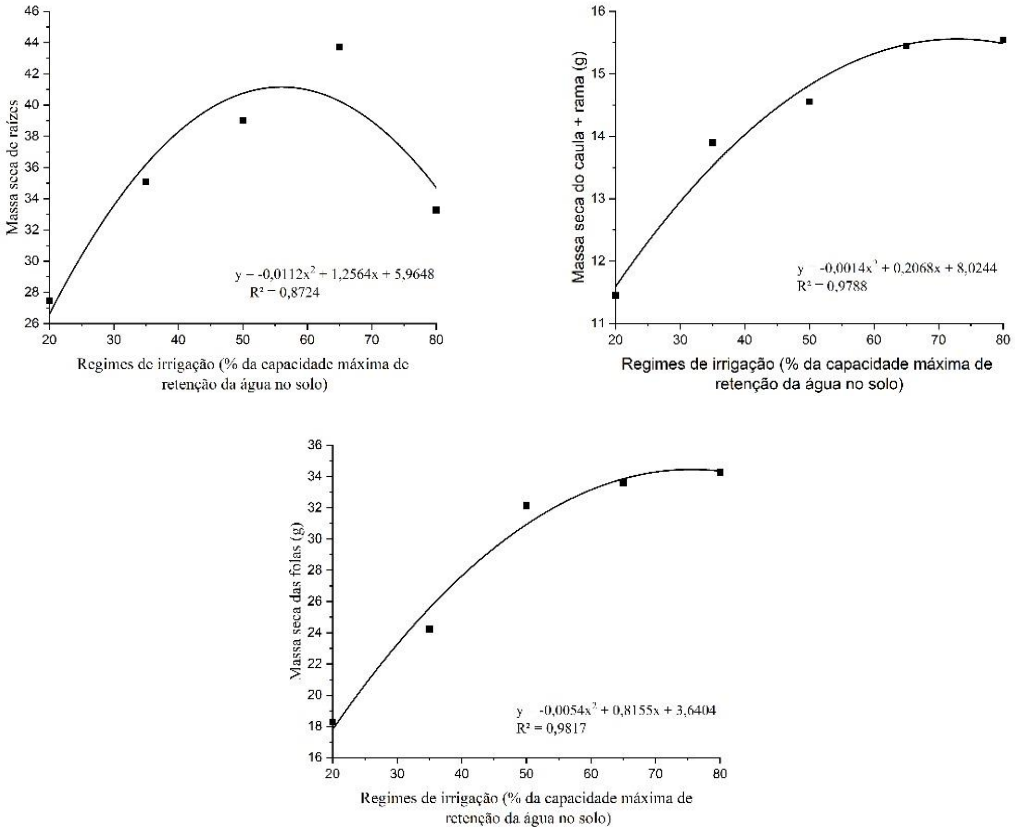

Figura 7. Comportamento da massa seca (g) de raízes, de caule+ramos e de folhas de plantas de *Z. tuberculosa* submetidas a cincos regimes de irrigação (RI1, RI2, RI3, RI4 e RI5 – respectivamente, 20%, 35%, 50%, 65% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato), aos 185 dias após imposição dos regimes hídricos.

O número de folíolos (NF) e área foliar (AF) apresentaram redução linear com a diminuição na disponibilidade hídrica, sendo que o NF teve uma redução de 46% entre o RI1 e RI5 e a AF de 36%, indicando que o número de folhas foi mais sensível à redução na disponibilidade hídrica que a AF.

4 Discussão

4.1 Germinação de sementes sob estresses abióticos

Múltiplos fatores influenciam o processo germinativo de sementes e o desempenho de mudas florestais. As sementes germinaram em uma ampla faixa de temperatura (20 a 35º C), o que evidencia a adaptação da espécie às variações de temperaturas no campo, garantindo vantagens ecológicas à

mesma. A germinação foi superior nas temperaturas de 25, 30 e 35 ºC, entretanto a velocidade de germinação foi superior a 30 ºC. De acordo com Nogueira et al. (2014), dentro de certos limites, temperaturas elevadas aceleram os processos metabólicos das sementes, reduzindo a fase II da germinação, proporcionando uma germinação mais rápida e uniforme.

Porém, a temperatura ótima para a velocidade do processo germinativo é, em geral, superior à temperatura ótima para o total de germinação (Carvalho e Nakagawa, 2012), sendo que temperaturas acima da ótima para a germinação aceleram o processo germinativo, mas podem desorganizá-lo resultando, inclusive, em menor germinação. A temperatura de 40º C, por outro lado, foi muito alta, suprimindo totalmente a germinação das sementes. A temperatura é um dos principais fatores que influenciam na germinação, as sementes quando expostas a altas temperaturas podem entrar em estado de dormência secundária (Chen et al., 2019), evitando a germinação em ambiente desfavorável.

O estresse térmico é proporcionado por temperaturas fora da faixa ótima de germinação, tanto abaixo quanto acima dessa, sendo que, dentro de certos limites, temperaturas inferiores à ótima, tornam o processo germinativo mais lento e, acima da faixa ótima, aceleram o processo germinativo. Porém, em ambos os casos o total de germinação é reduzido, podendo ser completamente inibido, como ocorreu na temperatura de 40º C. Isto se dá porque o estresse térmico afeta negativamente o potencial fisiológico (Bita e Gerats, 2013; Sarmento et al., 2019), ao passo que na faixa ótima de temperatura, a taxa de germinação é superior e uniforme (Martins et al., 2013).

Considerando a grande diversidade de espécies no Brasil, poucas têm germinação acima de 40 ºC (Nogueira et al., 2014). A temperatura de 25 ºC foi a melhor para a germinação de sementes de *Z. tuberculosa* (Ramos et al., 2003), também, para *Zeyheria montana* (Vell.) Bureau, a temperatura de 25 ºC foi adequada para o processo germinativo, resultando em 87% de germinação (Kratz et al., 2013). Gonzales e Valeri (2011) encontraram diferenças significativas na germinação e IVG, entre lotes de sementes da mesma espécie. A temperatura de 35 ºC proporcionou germinação semelhante à de 25 e 30 ºC, entretanto, possibilitou um menor desenvolvimento das plântulas. A 20

ºC, a germinação foi satisfatória, mas diminui a manifestação do vigor, avaliado pelo IVG, provavelmente, pela menor atividade metabólica nessa temperatura, retardando os eventos fisiológicos. Diante disso, as temperaturas de 25 e 30 ºC foram as que mais favoreceram o processo germinativo de sementes de *Z. tuberculosa*.

A ocorrência de estresses abióticos é comum em ambientes não controlados, sendo que o estresse hídrico se constitui num dos principais fatores limitantes ao crescimento e desenvolvimento de plantas. Com a redução do potencial hídrico, a germinação e o IVG diminuíram, sendo o IVG mais afetado que a germinação. Para Carvalho e Nakagawa (2012), o déficit hídrico retarda a germinação e reduz a velocidade do processo germinativo. O PEG-6000 é um composto químico de alto peso molecular e viscosidade, e prolonga o processo de embebição das sementes, retardando a hidratação dos tecidos e a distribuição do oxigênio, comprometendo os processos metabólicos (Antunes et al., 2011). As sementes sob o estresse hídrico mediado por PEG-6000, apresentaram germinação satisfatória até o potencial de -0,6 MPa, a partir desse potencial a germinação foi sensivelmente prejudicada e/ou inibida completamente a -1,0 MPa.

Em trabalho com *Handroanthus impetiginosus* (Mart. Ex DC), a germinação teve redução significativa no potencial de -0,4 MPa e inibição do processo germinativo a partir de -0,8 MPa (Santos et al., 2018b), semelhante a esse estudo, com inibição a -1,0 MPa. Leal et al. (2020) verificaram que sementes de *Combretum leprosum* (Mart.) apresentaram alta sensibilidade ao estresse hídrico, sendo o limite de tolerância da espécie a partir de -0,4 MPa. Para esses autores, potenciais hídricos mais negativos reduzem a disponibilidade hídrica e afetam a absorção de água, retardando ou suprimindo a germinação. O IVG foi mais sensível ao estresse hídrico que a germinação, reduzindo gradativamente à medida que os potenciais ficavam mais negativos; a germinação, por outro lado, manteve-se estável até -0,4 MPa.

O estresse salino foi mais prejudicial para o potencial fisiológico do que o estresse hídrico. Isso também foi observado para outras espécies como em eucaliptos (Sá-Martins et al., 2019), *Mimosa caesalpiniifolia* Benth. (Sousa et al., 2018), *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan (Santos et al., 2016),

Poincianella pyramidalis (Tul.) LP Queiroz (Santos et al., 2016) e *Atriplex halimus* (Tul.) (Shaygan et al., 2017). O aumento do estresse salino diminui a água disponível às plantas, resultando em déficit hídrico, mas também pode resultar em toxicidade por íons, podendo inibir a germinação em potenciais com altos níveis de salinidade (Stefanello et al., 2020). Diferentemente, sementes de *Parkia platycephala* Benth. foram mais sensíveis ao estresse hídrico do que ao estresse salino (Santos et al., 2019). Esses resultados indicam que a tolerância, ou a sensibilidade, a fatores estressantes é espécie-específico, e pode ser condicionada ao ambiente em que a espécie se desenvolveu, apresentando estratégias diferentes para melhor adaptação em ambientes adversos.

A sensibilidade aos estresses abióticos pode se manifestar de formas diferenciadas nas plantas em função do estádio fenológico, órgão ou tecido avaliado, intensidade e duração do estresse (Chaves et al., 2003; Paula et al, 2012).

4.2 Desempenho de mudas sob diferentes regimes de irrigação

As plantas apresentaram alta sensibilidade aos regimes de irrigação impostos no experimento de casa de vegetação, em vasos. O menor potencial hídrico foliar, seja na antemanhã ou ao meio-dia, indica menor hidratação nos tecidos foliares o que pode ter reduzido as trocas gasosas, notadamente nos regimes hídricos com menor disponibilidade de água (RI1 e RI2). Contudo, a redução na disponibilidade de água pode aumentar a eficiência intrínseca do uso da água (Liu et al., 2019) o que, por outro lado, não implica em maior produtividade (Pita et al., 2005). Segundo esses últimos autores, a maximização em longo prazo da Eficiência no Uso da Água (EUA) não implica, necessariamente, na maximização contínua da razão EUA, pois as plantas apresentam um *continuum* de respostas à seca, variando de trocas gasosas, predominantemente, a ajustes morfológicos em toda a planta. Em longo prazo, a expressão de todas essas respostas é que determinará a produtividade. Porém, as trocas gasosas constituem-se numa forma de avaliar as implicações de estresses no funcionamento da fotossíntese.

O fechamento estomático, sob déficit hídrico é uma estratégia para manter o menor potencial hídrico foliar, entretanto, isso reduz a taxa de assimilação de CO_2 sob estresses mais severos (Zafar et al., 2021). Os estresses bióticos e abióticos em espécies arbóreas causam modificações fisiológicas para diminuir o efeito negativo (Sabir et al., 2020). A condutância estomática (g_s) foi o parâmetro mais prejudicado pelo déficit hídrico com redução de 56% na menor disponibilidade hídrica (RI1) em relação a maior disponibilidade (RI5), seguido pela transpiração com redução de 48% no regime mais restrito. Essas são estratégias da planta para reduzir a evotranspiração e aumentar a eficiência do uso da água.

Houve redução nas trocas gasosas ao longo do dia, de forma mais expressiva nos regimes com menor disponibilidade hídrica, mas com tendência à estabilização ao final da tarde (16 h). As plantas desenvolvem mecanismos para diminuir o impacto de estresses (Descamps et al., 2018), e a redução nas trocas gasosas, causada pela redução na disponibilidade hídrica condicionada pelos regimes de irrigação ou pelo aumento da temperatura e do déficit de pressão de vapor, mesmo sob boa disponibilidade hídrica, ocorre pelo fechamento estomático (Gray et al., 2016) afetando os processos metabólicos e fisiológicos (Ramos et al., 2018).

O fechamento dos estômatos influencia na absorção de CO_2, afetando a fotossíntese e o crescimento das plantas (Osakabe et al., 2014). A principal maneira da folha perder água é pela transpiração, de forma que fechar os estômatos é uma estratégia em condições de déficit hídrico (Zhong et al., 2017). Uma maneira de reduzir a perda de água para a atmosfera é diminuir o valor do g_s, o que pode prolongar a sobrevivência da planta e, em geral, as alterações fisiológicas ocorrem antes de mudanças anatômicas nas folhas (Nóia Júnior et al., 2020). O déficit hídrico provoca adaptações, levando a alterações fisiológicas, moleculares, produção de espécies reativas de oxigénio (ROS), redução na fotossíntese e biomassa (Xiong et al., 2018).

A redução no crescimento de plantas sob déficit hídrico é esperada, conforme relatado em trabalhos com mudas de outras espécies arbóreas nativas do Brasil (Souza et al., 2018; Duarte et al., 2016). Os resultados observados nas mudas de ipê-felpudo indicam pequenas alterações nas

características de crescimento nos regimes de irrigação RI5 (80%) e RI4 (65%), de maior disponibilidade hídrica, mas redução expressiva sob disponibilidade hídrica menor que 50% (RI1 – 20% e RI2 – 35%).

A massa seca de raízes, apresentou comportamento diferenciado em relação às demais características, com baixa produção no regime de irrigação de maior disponibilidade hídrica, o que indica condição não favorável ao crescimento radicular sob maior umidade do solo. Isto pode estar associado a menor oxigenação nas raízes, causada pela maior ocupação dos poros do solo por água que, a longo prazo, pode comprometer o crescimento da parte aérea, constituindo num exemplo de estresse causado por excesso de água. Estresse refere-se a qualquer fator, biótico ou abiótico, que prejudica o crescimento e a produtividade das plantas (Paula et al., 2012). O mais comum é associar o termo estresse à falta ou escassez de um dado recurso, mas o mesmo pode ser causado pelo excesso, embora, esse caso não seja o mais comum na agricultura. Para Zafar et al. (2021), o mais preocupante sinal do estresse hídrico é a redução no crescimento e desenvolvimento de plantas (Plesa et al., 2018; Zafar et al., 2021), afetando a produtividade e a oferta de alimentos ou qualquer produto de interesse comercial.

5 Conclusões

A temperatura afeta o potencial fisiológico das sementes e o desenvolvimento das plântulas e a faixa ótima para o processo germinativo de sementes de *Zeyhera tuberculosa* é entre 25 e 30 ºC.

As sementes de *Z. tuberculosa* são mais sensíveis ao estresse salino do que ao estresse hídrico. Potenciais hídricos inferiores a -0,6 MPa e salinos a -0,4 MPa comprometem o potencial fisiológico das sementes.

Regimes de irrigação que proporcionam 50% ou menos de retenção de água no substrato prejudicam o crescimento de plantas de *Z. tuberculosa* e alta umidade ($\geq$ 80%) no substrato prejudica o crescimento radicular.

O regime de irrigação que proporciona 65% de retenção de água no substrato é adequado o desenvolvimento inicial de plantas de *Z. tuberculosa.*

6 Referências

Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JDM, Sparovek G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 6:711-728.

Anton DB et al. (2020) Characterization and expression analysis of P5CS (Δ1-pyrroline-5-carboxylate synthase) gene in two distinct populations of the Atlantic Forest native species Eugenia uniflora L. **Molecular biology reports** 47:1033-1043. DOI: 10.1007/s11033-019-05195-7

Aljasmi M, El-Keblawy A, Mosa KA (2021) Abiotic factors controlling germination of the multipurpose invasive Prosopis pallida: towards afforestation of salt-affected lands in the subtropical arid Arabian desert. **Tropical Ecology**, 62(1): 116-125. DOI: 10.1007/s42965-020-00124-3

Antunes CGC, Pelacani CR, Ribeiro RC, Souza JVD, Souza CLMD, Castro RDD (2011) Germinação de sementes de *Caesalpinia pyramidalis* Tul. (Catingueira) submetidas a deficiência hídrica. **Revista árvore** 35:1007-1015. DOI: 10.1590/S0100-67622011000600006

Azerêdo GA, Paula RC, Valeri SV (2016) Germinação de sementes *de Piptadenia moniliformis* Benth. sob estresse hídrico. **Ciência Florestal** 26:193-202.

Barbosa JC, Maldonado Junior W (2015) **AgroEstat: sistema para análises estatísticas de ensaios agronômicos.** Jaboticabal, FCAV/UNESP. 396p, 2015.

Bastos MLA, Lima MRF, Conserva LM, Andrade VS, Rocha EM, Lemos RP (2009) Studies on the antimicrobial activity and brine shrimp toxicity of *Zeyheria tuberculosa* (Vell.) Bur.(Bignoniaceae) extracts and their main constituents. **Annals of Clinical Microbiology and Antimicrobials** 8:1-6. DOI: 10.1186/1476-0711-8-16

Bita C, Gerats T (2013) Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. **Frontiers in plant science** 4:273. DOI: 10.3389/fpls.2013.00273

Brasil. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. SECRETARIA DE DEFESA AGROPECUÁRIA (2009) **Regras para análise de sementes**. Brasília: EMBRAPA 399p.

Bukhari MA, Shah AN, Fahad S, Iqbal J, Nawaz F, Manan A, Baloch MS (2021) Screening of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for drought tolerance using polyethylene glycol. **Arabian Journal of Geosciences** 14(24): 1-11. DOI: 10.1007/s12517-021-09073-0

Carvalho NM, Nakagawa J (2012) **Sementes**: ciência, tecnologia e produção. 5. ed. Jaboticabal: FUNEP, p.590.

Chaves MM, Maroco JP, Pereira JS (2003) Understanding plant responses to drought – from genes to the whole plant. **Functional Plant Biology** 30:239-264.

Contin DR, Soriani HH, Hernandez I, Furriel RP, Munne-Bosch S, Martinez CA (2014) Antioxidant and photoprotective defenses in response to gradual water stress under low and high irradiance in two Malvaceae tree species used for tropical forest restoration. **Trees** 28:1705-1722. DOI 10.1007/s00468-014-1079-x

Chen Z, Huang Y, Yang W, Chang G, Li P, Wei J, Yuan x, Huang, j, Hu X, (2019) The hydrogen sulfide signal enhances seed germination tolerance to high temperatures by retaining nuclear COP1 for HY5 degradation. **Plant Science** 285: 34-43. DOI: 10.1016/j.plantsci.2019.04.024

Descamps C, Quinet M, Baijot A, Jacquemart AL (2018) Temperature and water stress affect plant–pollinator interactions in *Borago officinalis* (Boraginaceae). **Ecology and Evolution** 6:3443-3456. DOI: 10.1002/ece3.3914

Duarte DM, Rocha GT, Lima FB, Matos FS, Rodrigues F (2016) Responses of paricá seedlings to water stress. **Floresta** 46:405-412. DOI: 10.5380/rf.v46i3.39529

Gentry AH (1980). Bignoniaceae: part I (Crescentieae and tourrettieae). **Flora Neotropica** 25(1): 1-130.

Gonçalves JDM, Raij BV, Gonçalves JC (1997) Florestais. RAIJ, BV et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**, 2:247-259.

Gonzales JLS, Valeri SV (2011) Prueba de la conductividad eléctrica en la evaluación fisiológica de la calidad de semillas *en Zeyheria tuberculosa*. **Bosque (Valdivia)** 32:197-202. DOI: /10.4067/S0717-92002011000200010

Gray SB, et al. (2016) Intensifying drought eliminates the expected benefits of elevated carbon dioxide for soybean. **Nature Plants** 2:1-8. DOI: 10.1038/NPLANTS.2016.132

Ipcc Working Group II (2014) **Climate Change 2014-Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Summary for Policymakers**. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Kratz D, Bassaco MVM, Nogueira AC (2013) Influência do Estresse Hídrico na Germinação de Sementes de *Zeyheria montana*. Journal of Biotechnology and **Biodiversity** 4:140-145.

Labouriau LG, Valadares MB (1976) On the germination of seeds of Calotropis procera. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** 48:174-186.

Leal CCP, Torres SB, Dantas NBDL, Aquino GSM, Alves TRC (2020) Water stress on germination and vigor of 'mofumbo'(*Combretum leprosum* Mart.) seeds at different temperatures. **Revista Ciência Agronômica** 51. DOI: 10.5935/1806-6690.20200013

Liu B, Liang J, Tang G, Wang X, Liu F, Zhao D (2019) Drought stress affects on growth, water use efficiency, gas exchange and chlorophyll fluorescence of Juglans rootstocks. **Scientia horticulturae** 250:230-235. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.02.056

Lorenzi H (2000) **Árvores brasileiros: manual de identificação e cultivo de plantas arboreas do Brasil**. Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2000.

Ma N, Hu C, Wan L, Hu Q, Xiong J, Zhang C (2017). Strigolactones improve plant growth, photosynthesis, and alleviate oxidative stress under salinity in rapeseed (*Brassica napus* L.) by regulating gene expression. **Frontiers in plant science** 8:1671. DOI: 10.3389/fpls.2017.01671

Maguire JD (1962) Speed of germination—Aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop science** 2:176-177.

Martinelli G, Moraes MA (2013) **Livro vermelho da flora do Brasil**. - 1. ed. - Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 1100p. < https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/comunicacao/publicacoes/publicacoes-diversas/livro_vermelho_2018_vol1.pdf>

Martins CC, Martins D, Souza GS, Costa NV (2013) Eco-physiological aspects of *melaleuca seeds* germination. **International Journal of Food, Agriculture and Environment** 11:1157-1161.

Martins CC, Pereira MRR, Lopes MTG (2014) Germinação de sementes de eucalipto sob estresse hídrico e salino. **Bioscience Journal** 30:318-329.

Matos FS, Freitas IAS, Souza BR, Araújo Lopes V (2018) Crescimento de plantas de *Tectona grandis* sob restrição hídrica. **Agrarian** 11:14-21. DOI: 10.30612/agrarian.v11i39.5284

Mickky BM, Abbas MA, Sameh NM (2019) Morpho-physiological status of fenugreek seedlings under NaCl stress. **Journal of King Saud University-Science** 31(4): 1276-1282. DOI: 10.1016/j.jksus.2019.02.005

Nogueira FCB, Gallão MI, Bezerra AME, Medeiros S (2014) Efeito da temperatura e luz na germinação de sementes de *Dalbergia cearensis* Ducke. **Ciência Florestal** 24:997-1007.

Nóia Júnior RDS, Amaral GC, Pezzopane JEM, Fonseca MDS, Da Silva APC, XAVIER TMT (2020) Ecophysiological acclimatization to cyclic water stress in Eucalyptus. **Journal of Forestry Research** 31:797-806. DOI: 10.1007/s11676-019-00926-9

Osakabe Y, Osakabe K, Shinozaki K, Tran LSP (2014) Response of plants to water stress. **Frontiers in plant Science** 5:86. DOI: 10.3389/fpls.2014.00086

Pan T, et al. (2021) Non-stomatal limitation of photosynthesis by soil salinity. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology** 51(8): 791-825. DOI: 10.1080/10643389.2020.1735231

Paula RC, Paula NF, Marino CL (2012) Breeding perennial species for abiotic stress In: Fritsche-Neto R, Borem A (eds) **Plant breeding for abiotic stress tolerance**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, p.157-172.

Pita P, Cañas I, Soria F, Ruiz F, Toval G (2005) Use of physiological traits in tree breeding for improved yield in drought-prone environments. The case of *Eucalyptus globulus.* **Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales** 14:383-393.

Plesa IM, González-Orenga S, Al Hassan M, Sestras AF, Vicente O, Prohens J, Sestras RE, Boscaiu, M. (2018) Effects of drought and salinity on European Larch (*Larix decidua* Mill.) seedlings. **Forests** 9:320. DOI: 10.3390/f9060320

Ramos AGO, Donato SLR, Arantes ADM, Coelho MA, Rodrigues MGV (2018) Evaluation of gas exchanges and production of genotypes of maçã banana type cultivated in the semi-arid region of Bahia. **Revista Brasileira de Fruticultura** 40. DOI: 10.1590/0100-29452018500

Ramos NP, Mendonça EAF, Paula RC (2003) Germinação de sementes de *Zeyhera tuberculosa* (Vell.) Bur. (ipê-felpudo). **Revista Agricultura Tropical** 7:41-52.

Richards LA (1980) **Suelos Salinos y Sodicos**. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. México, p.171.

Sabir MA, Rasheed F, Zafar Z, Khan I, Nawaz MF, Ul Haq I, Bilal MA (2020) consistent CO_2 assimilation rate and an enhanced root development drives the tolerance mechanism in *Ziziphus jujuba* under soil water deficit. **Arid Land Research and Management** 34:392-404. DOI: 10.1080/15324982.2020.1748140

Sá-Martins R, Cleiton-José A, Rocha-Faria JM, Melo LA (2019) Effect of water and salt stress on seeds germination and vigor of different eucalyptus species. **Journal Of Tropical Forest Science** 31:12-18. DOI: 10.26525/jtfs2019.31.1.012018

Santos CA, Silva NV, Siqueira Walter L, Silva ECA, Custódio Nogueira RJM (2016) Germinação de sementes de duas espécies da caatinga sob déficit hídrico e salinidade. **Brazilian Journal of Forest Research/Pesquisa Florestal Brasileira** 36:87. DOI: 10.4336/2016.pfb.36.87.1017

Santos HG. et al. (2018a) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed (rev. e ampl), Brasília, DF, Embrapa, p.356.

Santos LMD, Farias SGGD, Silva RB, Dias BAS, Silva LSD (2019) Ecophysiology of germination of *Parkia platycephala* Benth. seeds. **Floresta e Ambiente** 26. DOI: 10.1590/2179-8087.028215

Santos P, Benedito CP, Alves TR, Paiva EP, Sousa EC, Freires AL (2018b) Water stress and temperature on germination and vigor of *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 22:349-354. DOI 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n5p349-354

Sarmento ECS, Pereira KTO, Oliveira FSD, Leal CCP, Torres SB, Dutra AS (2019) Morphology and germination of *Acmella oleracea* LR Jansen under different temperatures and photoperiods1. **Revista Ciência Agronômica** 50:660-668.

Scholander PF, Bradstreet ED, Hemmingsen EA, Hammel HT (1965) Sap pressure in vascular plants: negative hydrostatic pressure can be measured in plants. **Science**148:3668.

Shaygan M, Baumgartl T, Arnold S (2017) Germination of *Atriplex halimus* seeds under salinity and water stress. **Ecological Engineering** 102:636-640. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2017.02.050

Silva CD, Nascimento JS, Scarpinati EA, Paula RC (2014) Classification of *Eucalyptus urograndis* hybrids under different water availability based on biometric traits. **Forest Systems** 23:209-215.

Sousa EC, Silva DV, Sousa DM, Torres SB, Oliveira RR (2018) Physiological changes in *Mimosa caesalpiniifolia* Benth. seeds from different sources and submitted to abiotic stresses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 22:383-389. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n6p383-389

Souza CV, Nepi M, Machado SR, Guimarães E (2017) Floral biology, nectar secretion pattern and fruit set of a threatened Bignoniaceae tree from Brazilian tropical forest. **Flora** 227:46-55. DOI: doi.org/10.1016/j.flora.2016.12.007

Souza NS, Conceição HEO, Silva MKF, Oliveira LJDS, Mello WJ, Maia S, Filho MS (2018) Crescimento e desenvolvimento de plantas jovens de ipê-amarelo submetidas a diferentes regimes hídricos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada** 12:3108-3117.

Stefanello R, Viana BB, Goergen PCH, Neves LAS, Nunes UR (202) Germination of chia seeds submitted to saline stress. **Brazilian Journal of Biology** 80:285-289. DOI: 10.1590/1519-6984.192140

Tabatabai SMT, Goshasbi F, Bakhshi B (2022). Evaluation of the effect of polyethylene glycol (PEG) on germination and morphological characteristics of bread wheat. **Cereal Research Communications**. DOI: 10.1007/s42976-022-00242-9

Tardieu F, Granier C, Muller B (2011) Water deficit and growth. Co-ordinating processes without an orchestrator? **Current opinion in plant biology** 14:283-289. DOI: 10.1016/j.pbi.2011.02.002

Valdovinos TM, Paula RCD, Silva PCDC, Fanchini G (2021). Seed germination of three species of Bignoniaceae trees under water stress**. Revista Ciência Agronômica** 52. DOI: 10.5935/1806-6690.20210072

Vargas-Figueroa JÁ, Torres-González AM. Germination and seed conservation of a pioneer species, *Tecoma stans* (Bignoniaceae), from tropical dry forest of Colombia. **Revista de Biología Tropical** 66:918-936, 2018. DOI: 10.15517/rbt.v66i2.33423

Villela FA, Doni Filho L, Sequeira EL (1991). Tabela de Potencial Osmótico em Função da Concentração de Polietilleno Glicol 6.000 e da Temperatura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 26:1957-1968.

Xiong JL, Li J, Wang HC, Zhang CL, Naeem MS (2018) Fullerol improves seed germination, biomass accumulation, photosynthesis and antioxidant system in *Brassica napus* L. under water stress. **Plant Physiology and Biochemistry** 129:130-140. DOI: 0.1016/j.plaphy.2018.05.026

Zafar Z, Rasheed F, Atif RM, Maqsood M, Gailing O (2021) Salicylic acid-induced morpho-physiological and biochemical changes triggered water deficit tolerance in *Syzygium cumini* L. saplings. **Forests** 12:491. DOI: 10.3390/f12040491

Zhong C, Cao X, Hu J, Zhu L, Zhang J, Huang J, Jin Q (2017) Nitrogen metabolism in adaptation of photosynthesis to water stress in rice grown under different nitrogen levels. **Frontiers in plant science** 8:1079. DOI: 10.3389/fpls.2017.01079