HYNGRID JAIELY ARAÚJO FÉLIX

USO E EFICIÊNCIA DO USO DE ÁGUA EM PLANTAÇÕES DE *EUCALYPTUS*

LAVRAS – MG
2025

HYNGRID JAIELY ARAÚJO FÉLIX

USO E EFICIÊNCIA DO USO DE ÁGUA EM PLANTAÇÕES DE *EUCALYPTUS*

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Otávio Camargo Campoe
Orientador

Prof. Dr. Rafael Rubilar
Coorientador

LAVRAS – MG
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo(a) autor(a) através do Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA.

Félix, Hyngrid Jaiely Araújo.
Uso e eficiência do uso de água em plantações de Eucalyptus / Hyngrid Jaiely Araújo Félix. 2025.
85 p. : il.

Orientador: Otávio Camargo Campoe
Coorientador: Rafael Rubilar

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2025.
Bibliografia.

1. razão de isótopos de carbono. 2. uso de água. 3. tolerância à seca. I. Campoe, Otávio Camargo. II. Rubilar, Rafael. III. Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

HYNGRID JAIELY ARAÚJO FÉLIX

USO E EFICIÊNCIA DO USO DE ÁGUA EM PLANTAÇÕES DE *EUCALYPTUS*

WATER USE AND EFFICIENCY IN *EUCALYPTUS* PLANTATIONS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 19 de fevereiro de 2025.
Dr. Otávio Camargo Campoe UFLA
Dra. Ana Carolina Maioli Campos Barbosa UFLA
Dr. Túlio Barroso Queiroz UGA

Prof. Dr. Otávio Camargo Campoe
Orientador

Prof. Dr. Rafael Rubilar
Coorientador

LAVRAS – MG
2025

Aos meus pais, Sara e Paulo

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela força, sabedoria e perseverança durante toda essa etapa da minha vida.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal pelo suporte institucional e pela oportunidade de crescimento acadêmico e profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento e concessão da bolsa, fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF), pelo suporte técnico e logístico e ao programa TECHS pelo fornecimento dos dados. A Forest Productivity Cooperative (FPC) e à Universidad de Concepción (UdeC), pelo suporte e incentivo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Otávio Camargo Campoe, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Rafael Rubilar, pela orientação, paciência e ensinamentos que foram fundamentais para a construção desta dissertação.

À minha família, pelo amor, incentivo e apoio incondicional em todos os momentos. Sem vocês, nada disso seria possível.

Ao Laboratório ECOMAPS, pela colaboração, suporte e amizade ao longo dessa caminhada acadêmica, principalmente a Isáira, Fernanda, Natielle, Kelly e Josiana. Agradeço a Mateus, Ana Karoline, Carol, Irene que também participaram dessa jornada. Obrigada pela amizade, pelas conversas, parceria, apoio e incentivo em momentos importantes.

Aos membros da banca examinadora da defesa, Prof. Dr. Otávio Camargo Campoe, Prof. Dr. Ana Carolina Maioli Campos Barbosa, Dr. Túlio Barroso Queiroz, Prof. Dr. Lucas Amaral de Melo e Prof. Dr. André Ferreira Rodrigues, pela disponibilidade, contribuições e sugestões que enriqueceram este trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuiram para a realização deste estudo, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO GERAL

A projeção de um aumento de 1,5 °C nas temperaturas médias globais e mudanças nos regimes de precipitação intensificam a ocorrência de eventos climáticos extremos, ameaçando o desenvolvimento das plantas e causando alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas. Nesse contexto, a eficiência do uso da água (EUA) é um parâmetro crucial para compreender essas mudanças. Este estudo revisou a produção científica sobre EUA através da revisão bibliométrica sobre o tema, avaliando tendências, metodologias e distribuição geográfica dos estudos, bem como investigou a EUA de clones de *Eucalyptus* em diferentes condições edafoclimáticas no Brasil. A discriminação de isótopos de carbono-13 ($\delta^{13}C$) foi utilizada na avaliação da EUA de dois clones de *Eucalyptus*: A1 (*Eucalyptus urophylla*), de rápido crescimento, e C3 (*Eucalyptus grandis* × *E. camaldulensis*), tolerante à seca. O clone A1 apresentou maior eficiência hídrica e produtividade, enquanto o C3, embora tolerante, mostrou menor EUA. O clone A1 apresentou ICA de 13,53 a 48,82 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$ e IMA de 4,07 a 28,09 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$, enquanto o clone C3 teve ICA de 4,61 a 47,56 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$ e IMA de 3,55 a 31,64 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$. Os valores de $\delta^{13}C$ variaram de -29,35‰ a -26,63‰ para A1 e de -30,39‰ a -27,33‰ para C3, com uma correlação negativa entre $\delta^{13}C$ e EUA. Os modelos tiveram R^2 de 0,54 a 0,97, RMSE de 32,40% a 21,2% e AIC de 12,60 a 0,66. Os resultados destacam a relevância da $\delta^{13}C$ como ferramenta para estimar a EUA e orientar a alocação clonal em plantios florestais em regiões secas.

Palavras-chave: razão de isótopos de carbono; uso de água; tolerância à seca.

GENERAL ABSTRACT

The projection of a 1.5 °C increase in global average temperatures and changes in precipitation regimes intensify extreme climatic events, threatening plant development and causing morphological, physiological, and biochemical alterations. In this context, water use efficiency (WUE) is a crucial parameter for understanding these changes. This study reviewed the scientific production of WUE through a bibliometric analysis of the topic, evaluating trends, methodologies, and the geographical distribution of studies, and investigating the WUE of Eucalyptus clones under different edaphoclimatic conditions in Brazil. Carbon-13 isotope discrimination ($\delta^{13}C$) was used to assess the WUE of two Eucalyptus clones: A1 (*Eucalyptus urophylla*), a fast-growing clone, and C3 (*Eucalyptus grandis* × *E. camaldulensis*), a drought-tolerant clone. Clone A1 exhibited higher water efficiency and productivity, whereas C3, despite its tolerance, showed lower WUE. Clone A1 had an ICA ranging from 13.53 to 48.82 $Mg.ha^{-1}.year^{-1}$ and an IMA from 4.07 to 28.09 $Mg.ha^{-1}.year^{-1}$, while clone C3 had an ICA ranging from 4.61 to 47.56 $Mg.ha^{-1}.year^{-1}$ and an IMA from 3.55 to 31.64 $Mg.ha^{-1}.year^{-1}$. The $\delta^{13}C$ values ranged from -29.35‰ to -26.63‰ for A1 and from -30.39‰ to -27.33‰ for C3, with a negative correlation between $\delta^{13}C$ and WUE. The models had R^2 values from 0.54 to 0.97, RMSE ranging from 32.40% to 21.2%, and AIC values from 12.60 to 0.66. The results highlight the relevance of $\delta^{13}C$ as a tool for estimating WUE and guiding clonal allocation in forest plantations in dry regions.

Keywords: carbon isotope ratio; water use; drought tolerance.

INDICADORES DE IMPACTO

Os resultados obtidos nesta dissertação apresentam impactos em potencial nos âmbitos social, tecnológico, econômico e ambiental, com desdobramentos significativos para o setor florestal e para a sociedade, especialmente em territórios caracterizados por condições edafoclimáticas contrastantes no Brasil. No aspecto tecnológico, a aplicação da discriminação isotópica de carbono-13 ($\delta^{13}C$) como ferramenta para estimar a eficiência do uso da água (EUA) representa um avanço metodológico para a seleção e manejo de clones de *Eucalyptus*, permitindo uma abordagem mais precisa e científica na adaptação das florestas às mudanças climáticas. Esse avanço pode impactar diretamente empresas do setor florestal e pesquisadores que atuam no desenvolvimento de estratégias para aumentar a produtividade e a resiliência hídrica de plantios comerciais. No campo econômico, os resultados demonstram que a escolha do clone mais eficiente pode otimizar o uso dos recursos hídricos e aumentar a produtividade, reduzindo os custos associados à irrigação e garantindo maior retorno financeiro para produtores e investidores do setor de florestas plantadas. No aspecto social, há um impacto indireto na geração de conhecimento aplicado à sustentabilidade da produção florestal, beneficiando instituições acadêmicas, empresas do setor e comunidades rurais envolvidas com o manejo dessas áreas. O estudo também possui potencial extensionista ao contribuir para o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis, o que pode, futuramente, beneficiar agricultores, gestores ambientais e tomadores de decisão ao fornecer dados científicos para embasar políticas públicas e estratégias de manejo sustentável. O território impactado abrange regiões secas, mésicas e úmidas no Brasil, com influência potencial sobre populações envolvidas com a silvicultura e a conservação de recursos hídricos. Quanto às áreas temáticas da Política Nacional de Extensão, os impactos do trabalho podem ser classificados principalmente em Meio Ambiente (5) e Tecnologia e Produção (7), dada sua contribuição para o uso eficiente da água e o aprimoramento de técnicas de manejo florestal. Além disso, os achados da pesquisa estão alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente ao ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ao ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e ao ODS 15 (Vida Terrestre), ao propor soluções para tornar os plantios florestais mais resilientes às mudanças climáticas e mais eficientes no uso da água. Dessa forma, embora os impactos diretos ainda estejam em fase de potencialização, o estudo fornece uma base científica robusta para futuras aplicações práticas e políticas públicas voltadas à sustentabilidade da produção florestal e à mitigação dos efeitos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas terrestres.

IMPACT INDICATORS

The results obtained in this dissertation present potential impacts in the social, technological, economic, and environmental spheres, with significant implications for the forestry sector and society, especially in territories characterized by contrasting edaphoclimatic conditions in Brazil. In the technological aspect, the application of carbon-13 isotope discrimination ($\delta^{13}C$) as a tool to estimate water use efficiency (WUE) represents a methodological advancement for the selection and management of *Eucalyptus* clones, enabling a more precise and scientific approach to forest adaptation to climate change. This advancement can directly impact forestry sector companies and researchers working on developing strategies to increase the productivity and water resilience of commercial plantations. In the economic field, the results demonstrate that selecting the most efficient clone can optimize the use of water resources and increase productivity, reducing costs associated with irrigation and ensuring a higher financial return for producers and investors in the planted forest sector. In the social aspect, there is an indirect impact on generating knowledge applied to the sustainability of forest production, benefiting academic institutions, industry companies, and rural communities involved in managing these areas. The study also has extension potential by contributing to the development of more sustainable practices, which may, in the future, benefit farmers, environmental managers, and policymakers by providing scientific data to support public policies and sustainable management strategies. The impacted territory includes dry, mesic, and humid regions in Brazil, with potential influence on populations involved in forestry and water conservation. Regarding the thematic areas of the National Extension Policy, the study's impacts can be mainly classified under Environment (5) and Technology and Production (7), given its contribution to efficient water use and the improvement of forest management techniques. Furthermore, the research findings align with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 6 (Clean Water and Sanitation), SDG 13 (Climate Action), and SDG 15 (Life on Land), by proposing solutions to make forest plantations more resilient to climate change and more efficient in water use. Thus, although direct impacts are still in the potential phase, the study provides a robust scientific foundation for future practical applications and public policies aimed at the sustainability of forest production and the mitigation of climate change effects on terrestrial ecosystems.

SUMÁRIO

Parte I 13

1. Introdução Geral 14

Referências 17

Parte II – Artigos 19

Artigo 1 - Avanços na eficiência do uso da água para a área florestal: Uma análise bibliométrica 20

1. Introdução 23
2. Material e métodos 25

2.1 Revisão bibliométrica 25

2.2 Análise dos dados 27

3. Resultados e discussão 28

3.1 Publicações ao longo dos anos, autores e sua contribuição 28

3.2 Periódicos que publicam sobre eficiência no uso da água 30

3.3 Análise do autor 31

3.4 Análise de palavras-chave 33

3.5 Distribuição geográfica da pesquisa 35

3.6 Rede de Colaboração 38

3.7 Metodologias usadas na estimativa de EUA 41

3.8 Eficiência do uso da água de acordo com as zonas climáticas 44

4. Conclusão 47

Referências 49

Artigo 2 - Isótopos de carbono como indicador de eficiência no uso da água em *Eucalyptus* 54

1. Introdução 57
2. Material e métodos 59

2.1 Área de estudo 59

2.2 Coleta de dados 61

2.2.1 Biomassa 61

2.2.2 Discriminação de isótopos ^{13}C ($\delta^{13}C$) 61

2.2.3 Eficiência do uso da água (EUA) 63

2.3 Análise Estatística 64

3. Resultados 65
3.1 Caracterização dos clones 65
3.2 Eficiência do uso da água da parte aérea e raiz 66
3.3 Discriminação de ^{13}C 68
3.4 A Relação entre EUA e $\delta^{13}C$ 71
4. Discussão 73
4.1 Padrões de eficiência no uso da água em relação à variabilidade genética e local 73
4.2 A relação entre $\delta^{13}C$ e EUA 76
5. Conclusão 77
Considerações finais 78
Referências 79

PARTE I

1. INTRODUÇÃO GERAL

Mesmo sendo uma parte natural da maioria dos ecossistemas, os extremos climáticos possuem a capacidade de desequilibrar o ciclo do carbono e da água (GRIEBEL *et al.*, 2022). A combinação dos aumentos dos extremos de temperatura e da variabilidade das chuvas pode conduzir ao aumento na quantidade, duração e intensidade de ondas de calor, secas e incêndios, podendo exercer, dessa forma, uma pressão sobre a capacidade da planta de controlar a perda de água e ao mesmo tempo manter a fotossíntese (GRIEBEL *et al.*, 2020; PERKINS-KIRKPATRICK; LEWIS, 2020).

A seca caracterizada principalmente pelo déficit de precipitação é a ameaça mais significativa para os plantios florestais, já que afeta a disponibilidade de água, que por sua vez é um dos principais fatores que controlam a produtividade dos ecossistemas (OLIVEIRA *et al.*, 2022). A produtividade do *Eucalyptus* no Brasil apresenta uma alta variabilidade em razão das variações climáticas e do solo, material genético e práticas de manejo (ELLI *et al.*, 2020). Portanto, nesse contexto o desenvolvimento de plantas tolerantes a seca a partir de modelos baseados em processo pode ser uma abordagem promissora e valiosa para auxiliar os silvicultores e empresas no planejamento adequado, gestão e tomada de decisões, assim como na avaliação dos impactos da variabilidade e alterações climáticas na silvicultura (ELLI *et al.*, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Diversos processos fisiológicos podem estar envolvidos na tolerância das plantas ao déficit hídrico, como a área foliar, ajuste osmótico, desenvolvimento radicular, relação raiz-parte aérea e condutância estomática (NUNES *et al.*, 2016). Sendo um elo crítico entre as trocas de carbono e água, a eficiência do uso da água (EUA) que representa a relação entre a produção de biomassa e a água transpirada pelas árvores, é uma variável chave para analisar as estimativas de carbono e água (HAN *et al.*, 2023). Um melhor entendimento de como a EUA responde a disponibilidade hídrica será importante para proporcionar uma melhor compreensão dos controles e feedbacks dos ecossistemas em um cenário de mudanças climáticas (WANG, GUOHUI *et al.*, 2022).

Pesquisas relacionas ao crescimento florestal e o consumo de água demonstraram que, apesar das florestas plantadas usarem mais água do que as florestas nativas no decorrer dos períodos de rápido crescimento, elas exibem maior produção de biomassa e sequestro de carbono no estágio de crescimento, indicando maior EUA (WHITE *et al.*, 2021). Apesar de sua importância, são poucos os estudos sobre os padrões globais e os principais impulsionadores da produção de água e EUA em florestas plantadas e nativas (SUN *et al.*, 2024). Além disso, obter

um valor de EUA para uma planta específica ou até mesmo comparar a EUA entre diferentes espécies de planta é um processo demorado, devido as difíceis medições de transpiração e produção total de matéria seca no campo (NUNES et al., 2016).

A EUA em plantios florestais também está relacionada diretamente com a capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente, pois ambos influenciam a disponibilidade hídrica do solo e consequentemente, o desempenho fisiológico das plantas. A capacidade de campo determina a quantidade máxima de água que o solo pode reter, servindo como um indicador do potencial de água disponível para as plantas(ASSI *et al.*, 2019). Já o ponto de murcha permanente caracteriza o limite inferior de umidade do solo, abaixo do qual as plantas não conseguem mais absorver água suficiente para manter suas funções fisiológicas (LIU; MA, 2024). Estudos indicam que solos com maior capacidade de campo permitem maior manutenção da EUA em períodos de seca, enquanto solos com baixos níveis de retenção hídrica podem intensificar a limitação hídrica e reduzir a produtividade florestal (KIRKHAM, 2005). Dessa forma, compreender a interação entre essas propriedades do solo e a EUA é essencial para aprimorar o manejo florestal e minimizar os impactos das mudanças climáticas na produção de biomassa.

O que falta atualmente é a capacidade de estudar o uso e eficiência do uso da água nas plantações florestais ao analisar os cenários de gestão dos plantios, gerindo as plantações para a produção de biomassa de uma forma que minimize as mudanças no uso da água ao longo do tempo, minimizando assim os impactos sobre os recursos hídricos a jusante (NUNES *et al.*, 2016).

Para enfrentar essa lacuna no conhecimento, é essencial adotar estratégias experimentais que possibilitem avaliar a EUA em diferentes cenários de manejo florestal. O delineamento do TECHS surge como uma iniciativa fundamental nesse contexto, pois permite investigar a adaptabilidade e produtividade de clones de *Eucalyptus* em uma ampla diversidade edafoclimática, fornecendo informações valiosas sobre a resposta dos materiais genéticos à deficiência hídrica. A seleção criteriosa dos sítios e dos clones participantes do programa foi estruturada para garantir uma representatividade abrangente das condições ambientais e do potencial produtivo das diferentes linhagens genéticas. Assim, torna-se imprescindível o desenvolvimento de metodologias que facilitem o ranqueamento dos clones em relação à EUA, contribuindo para a correta alocação clonal e para um manejo mais eficiente dos recursos hídricos em plantações florestais.

Buscando facilitar este rankeamento, a presente dissertação está dividida em dois artigos. O primeiro artigo consiste em uma revisão bibliométrica e sistemática sobre os estudos relacionados à eficiência do uso da água (EUA) em plantios de *Eucalyptus* spp. ao redor do mundo. Já o segundo artigo traz uma análise da aplicação da metodologia de discriminação de isótopos de carbono-13 para estimar a EUA em dois clones de *Eucalyptus*, avaliados em três sites do programa TECHS, caracterizados por condições edafoclimáticas contrastantes.

REFERÊNCIAS

ASSI, Amjad T.; BLAKE, John; MOHTAR, Rabi H.; BRAUDEAU, Erik. Soil aggregates structure-based approach for quantifying the field capacity, permanent wilting point and available water capacity. **Irrigation Science**, [S.L.], v. 37, n. 4, p. 511-522, 10 abr. 2019. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s00271-019-00630-w.

ELLI, Elvis Felipe et al. Ability of the APSIM Next Generation *Eucalyptus* model to simulate complex traits across contrasting environments. *Ecological Modelling*, v. 419, 1 mar. 2020.

GRIEBEL, Anne et al. Tapping into the physiological responses to mistletoe infection during heat and drought stress. *Tree Physiology*, v. 42, p. 523–536, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/treephs/tpab113>.

GRIEBEL, Anne et al. Trading Water for Carbon: Maintaining Photosynthesis at the Cost of Increased Water Loss During High Temperatures in a Temperate Forest. Journal of Geophysical Research: *Biogeosciences*, v. 125, n. 1, 1 jan. 2020.

HAN, Tuo et al. Contrasting response of water use efficiency to soil moisture availability: From leaf to ecosystem in an arid oasis. *Ecological Indicators*, v. 147, 1 mar. 2023.

KIRKHAM, Mary Beth. Field Capacity, Wilting Point, Available Water, and the NonLimiting Water Range. In: KIRKHAM, Mary Beth. **Principles of soil and plant water relations**. [S.L]: Elsevier, 2005. Cap. 8. p. 101-115.

LIU, Liwei; MA, Xingmao. Prediction of Soil Field Capacity and Permanent Wilting Point Using Accessible Parameters by Machine Learning. **Agriengineering**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 2592-2611, 2 ago. 2024. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/agriengineering6030151.

NUNES, Flancer Novais et al. Carbon isotope discrimination and differential drought tolerance in eucalypt clones. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, v. 44, n. 112, p. 895–903, 2016.

OLIVEIRA, Thiago Wendling Gonçalves De et al. Changes in leaf physiology for eucalyptus genotypes with increase in integral water stress and its consequence for initial growth in central Chile. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, v. 50, 2022.

PERKINS-KIRKPATRICK, S. E.; LEWIS, S. C. Increasing trends in regional heatwaves. *Nature Communications*, v. 11, n. 1, 1 dez. 2020.

SUN, Shulan et al. Balancing Water Yield and Water Use Efficiency Between Planted and Natural Forests: A Global Analysis. *Global Change Biology*, v. 30, n. 11, 1 nov. 2024.

WANG, Guohui et al. Effect of simulated precipitation regimes on sap flow and water use efficiency for xerophytic *Caragana korshinskii*. *Ecological Indicators*, v. 143, 1 out. 2022.

WHITE, Don A. et al. Growth, water use, and water use efficiency of *Eucalyptus globulus* and *Pinus radiata* plantations compared with natural stands of Roble-Hualo forest in the coastal mountains of central Chile. *Forest Ecology and Management*, v. 501, 1 dez. 2021.

ZHANG, Congzhi et al. Mechanisms for the relationships between water-use efficiency and carbon isotope composition and specific leaf area of maize (*Zea mays* L.) under water stress. *Plant Growth Regulation*, v. 77, n. 2, p. 233–243, 1 nov. 2015.

PARTE II – ARTIGOS

ARTIGO 1 - AVANÇOS NA EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA PARA A ÁREA FLORESTAL: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Artigo redigido conforme a norma NBR 6022 (ABNT, 2018) para publicação em periódico científico. Esse formato segue o manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.

RESUMO

A previsão de um aumento de 1,5 °C nas temperaturas médias globais pode intensificar a ocorrência de eventos climáticos extremos que ameaçam o desenvolvimento das plantas. A eficiência do uso da água (EUA) é um parâmetro importante para a compreensão dessas mudanças, pois auxilia no aprimoramento das estratégias silviculturais, bem como no melhoramento genético das árvores para o enfrentamento dos déficits hídricos. Assim, este estudo teve como objetivo identificar a produção científica ao longo do tempo em relação à EUA, bem como identificar as metodologias mais utilizadas para a determinação da EUA. A partir dessas análises, avaliamos as tendências de EUA no setor florestal, bem como a distribuição geográfica desses estudos em todo o mundo. A análise bibliométrica foi realizada com 1.042 artigos da Web of Science, resultando em 238 artigos relevantes. Esses artigos foram publicados em sua maioria na Austrália, Brasil e China. Os resultados mostraram que a produção científica sobre a EUA tem aumentado ao longo dos anos, com crescimento significativo a partir de 2012. Forest Ecology and Management e Tree Physiology foram os periódicos que mais publicaram sobre o tema. A análise de palavras-chave destacou termos como crescimento, eficiência no uso da água, trocas gasosas, condutância estomática e discriminação de isótopos de carbono. Por fim, os estudos mostram que há uma complexidade metodológica na avaliação da EUA. A EUA foi avaliada predominantemente na escala foliar (46,2%), seguida da escala arbórea (38,2%) e da escala paisagem (11,3%). Esta revisão identifica as principais tendências, lacunas de conhecimento e possíveis direções futuras na pesquisa da EUA.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas; Eucalyptus; Florestas Plantadas; Sustentabilidade Ambiental.

ADVANCES IN WATER USE EFFICIENCY FOR FORESTRY AREAS: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

ABSTRACT

The prediction of a 1.5 °C increase in global average temperatures may intensify the occurrence of extreme climatic events that threaten plant development. Water use efficiency (WUE) is an important parameter for understanding these changes, as it helps improve silvicultural strategies, as well as the genetic improvement of trees to cope with water deficits. Thus, this study aimed to identify the scientific production over time regarding WUE, as well as to identify the most commonly used methodologies for determining WUE. From these analyses, we evaluated WUE trends in the forestry sector, as well as the geographical distribution of these studies worldwide. The bibliometric analysis was conducted with 1,042 articles from the Web of Science, resulting in 238 relevant articles. These articles were mostly published in Australia, Brazil, and China. The results showed that scientific production on WUE has increased over the years, with significant growth starting in 2012. *Forest Ecology and Management* and *Tree Physiology* were the journals that published the most on the topic. The keyword analysis highlighted terms such as growth, water use efficiency, gas exchange, stomatal conductance, and carbon isotope discrimination. Finally, the studies show that there is a methodological complexity in assessing WUE. WUE was predominantly evaluated at the leaf scale (46.2%), followed by the tree scale (38.2%) and the landscape scale (11.3%). This review identifies the main trends, knowledge gaps, and potential future directions in WUE research.

Keywords: Climate Change; Eucalyptus; Planted Forests; Environmental Sustainability.

1. Introdução

Durante o período pré-industrial, a concentração de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera era de cerca de 280 partes por milhão (ppm) (HASHIMOTO, 2019). Em 2022, esse valor aumentou para 419 ppm, resultado principalmente de ações antrópicas, como desmatamento e incêndios florestais (COSTA; VURALHAN-ECKERT; FROMM, 2023). O aumento da concentração de CO_2 contribui para as alterações climáticas (ALI; AHMAD; YUSUP, 2020). Um aumento na concentração desse gás para 450 ppm nas próximas décadas poderia resultar em um aumento de 1,5 °C na temperatura média global (COSTA; VURALHAN-ECKERT; FROMM, 2023). Além disso, espera-se que eventos climáticos extremos ocorram com mais frequência, bem como mudanças nos padrões de precipitação, incluindo secas intensificadas (KUMAR; NAGAR; ANAND, 2021). Essas alterações representam uma ameaça ambiental ao desenvolvimento das plantas, pois podem afetar diretamente as características morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e moleculares (ASENSIO et al., 2020; CHOAT et al., 2018).

A ocorrência de eventos de seca, ou seja, períodos prolongados de precipitação abaixo da média, resultando em um déficit hídrico em ecossistemas tropicais pode alterar drasticamente as trocas gasosas, bem como a eficiência do uso da água (EUA) das plantas, causando variação no crescimento das espécies arbóreas (BARTHOLOMÉ et al., 2015; HALDER et al., 2021). Nesse sentido, a compreensão do uso da água tornou-se um pré-requisito para o aprimoramento das estratégias silviculturais, bem como para o melhoramento genético das árvores para o enfrentamento dos déficits hídricos (BARTHOLOMÉ et al., 2015).

EUA pode ser definido como a capacidade do ecossistema de capturar carbono e produzir biomassa sobre a quantidade de água usada para o crescimento (BATTIE-LACLAU et al., 2016). Nesse contexto, estudos são essenciais para entender como as mudanças climáticas afetarão o crescimento das plantas e a eficiência do uso da água (HATFIELD; DOLD, 2019). No entanto, estimar a EUA é metodologicamente desafiadora, pois essa característica pode ser obtida de várias maneiras e em várias escalas espaciais e temporais (BOUVET et al., 2020). A EUA pode ser classificada principalmente de duas maneiras: EUA instantânea (EUA_{ins}) e EUA intrínseca (EUA_i) (BATTIE-LACLAU et al., 2016). EUA_{ins} é calculado como a razão entre a taxa fotossintética líquida (A) e a transpiração (E). EUA_i pode ser calculado como a razão entre a taxa fotossintética líquida (A) e a condutância estomática (gs) (HAN et al., 2023).

Para aumentar a eficiência do uso da água (EUA) no contexto das mudanças climáticas, é necessário identificar genótipos com altas taxas de assimilação sob estresse térmico e déficits

hídricos (HAKAMADA et al., 2020; HATFIELD; DOLD, 2019). Além disso, é importante saber quais práticas de manejo podem ser adotadas para reduzir a evapotranspiração da água no solo, visando limitar a exposição das plantas ao estresse hídrico e manter a alta produtividade (HATFIELD; DOLD, 2019).

A EUA é amplamente explorada em áreas como a agricultura, na qual a relação entre práticas de manejo e adaptação das plantas às condições de estresse hídrico está bem documentada (VELASCO-MUÑOZ et al., 2018). No entanto, no setor florestal, especialmente no que se refere ao cultivo de espécies como *Eucalyptus* sp., ainda há uma escassez significativa de estudos que abordem os EUA de forma ampla e detalhada. Essa lacuna de informação reforça a necessidade do desenvolvimento de pesquisas mais focadas que considerem as especificidades das florestas e seus impactos na sustentabilidade hídrica em cenários de mudanças climáticas.

Os estudos existentes sobre eficiência no uso da água (EUA) podem fornecer uma visão geral do estado da arte, direcionando os pesquisadores para novos campos de investigação e contribuições. Até onde sabemos, este é o primeiro estudo de triagem bibliométrica de publicações que busca avaliar a literatura sobre EUA na base de dados Web of Science (WoS). De modo geral, a revisão bibliométrica relacionada à EUA permite compreender o crescente interesse em sua viabilidade e aplicação nas próximas décadas.

A principal questão para a realização deste estudo foi determinar quais tendências existem no setor florestal usando a eficiência do uso da água como foco temático, o escopo desses estudos em termos de distribuição geográfica, produção científica ao longo do tempo e quais metodologias são mais confiáveis e utilizadas para determinar a EUA. Assim, nosso estudo teve como objetivos: (I) Identificar os países e autores que lideram pesquisas sobre EUA de *Eucalyptus* sp.; (II) Analisar os principais temas abordados nas obras e (III) Analisar as metodologias utilizadas para determinação da EUA.

Eficiência no uso da água (EUA)

O aumento das restrições à expansão das florestas plantadas e as evidentes diferenças genotípicas entre os clones têm motivado o setor florestal a determinar a quantidade de água transpirada por unidade de madeira de colmo produzida, ou seja, o EUA (DYE, 2013). Assim, o objetivo desejado seria identificar quais clones possuem altas taxas de crescimento, mas menor consumo de água (DYE, 2013).

O conceito de eficiência no uso da água (EUA), introduzido há mais de 100 anos por Briggs e Shantz (1914), reflete um equilíbrio entre o ganho de carbono e a perda de água pelas plantas. Assim, várias metodologias têm sido desenvolvidas para avaliar os EUA em diferentes níveis de organização e escala temporal (BRENDEL, 2021; HATFIELD; DOLD, 2019). Em geral, dois tipos de EUA refletem uma condição momentânea de carbono foliar e fluxos de água: a eficiência intrínseca do uso da água (EUA_i), que é a razão entre a taxa fotossintética (A) e a condutância estomática (gs), pode ser obtida por meio de medidas de trocas gasosas no nível foliar (PETRIK et al., 2023). A outra variante relacionada é a EUA instantânea (EUA_{ins}), que é determinada pela razão de A para transpiração (E) (BARTHOLOMÉ et al., 2015). Outros métodos de longo prazo para determinar a EUA capturam o equilíbrio entre a fixação de carbono e as perdas de água por transpiração, um dos quais é o método do fluxo de seiva, que rastreia o pulso de calor dentro do xilema para medir o fluxo de seiva (BENYON et al., 2001; PETRIK et al., 2023; READING et al., 2023).

As variações de EUA baseadas na biomassa incluem EUA_{bio} de toda a planta, como a razão de acúmulo de biomassa para E (BRENDEL, 2021). Além disso, a discriminação de isótopos de carbono ($\delta^{13}C$) tem sido amplamente utilizada como proxy para EUA de longo prazo devido à preferência das plantas pelo isótopo mais leve durante os processos físicos e químicos envolvidos na absorção e assimilação de CO_2 (FARQUHAR; EHLERINGER; HUBICK, 1989; PETRÍK et al., 2023).

Comparações entre diferentes métodos e escalas para determinação de EUA são escassas na literatura e geralmente mostram que diferentes metodologias levam a diferentes resultados e conclusões. Embora a compreensão das bases genéticas tenha melhorado, os fatores que influenciam as variações de EUA em florestas de produção permanecem pouco compreendidos (CANO; LÓPEZ; WARREN, 2014). As interações entre EUA, crescimento e propriedades da madeira têm sido pouco documentadas, e os resultados ainda são parciais e às vezes inconsistentes (BOUVET et al., 2020). Assim, ainda há necessidade de pesquisas para obter informações sobre os efeitos genéticos e ambientais na variação fenotípica e na plasticidade (BARTHOLOMÉ et al., 2015).

2. Material e Métodos

2.1 Revisão bibliométrica

Os dados foram obtidos do indexador Web of Science. A plataforma foi escolhida como mecanismo de busca por agregar uma das maiores bases de dados disponíveis para

armazenamento de metadados de artigos científicos, disponibilizando documentos multidisciplinares de alta qualidade (JANKOVSKÝ et al., 2021; WANG, JIEYONG; LIU, 2014). A estratégia de pesquisa utilizada a partir da definição das palavras-chave foi: ("Water use" OR "Water use efficiency" OR "Transpiration" OR "WUE" OR "Sap flow") AND ("*Eucalyptus*"), sem a aplicação de outro tipo de filtro. Os dados recuperados da busca resultaram em 1.042 artigos até junho de 2023, quando a busca foi realizada. Exportamos o banco de dados obtido e removemos documentos duplicados no processo de filtragem. Após esse processo, organizamos os dados, resultando em 1.041 artigos restantes. Posteriormente, aplicamos a técnica de "triagem de resumos", na qual revisamos os resumos de cada artigo recuperado da busca, melhorando assim a confiabilidade e a validade dos resultados da pesquisa (GONÇALVES et al., 2021). Após a triagem, foram selecionados 238 artigos considerados relevantes para o desenvolvimento da pesquisa, os quais realmente avaliavam a EUA em *Eucalyptus* sp. (Figura 1). Os outros 803 artigos eram análogos a temas que não foram objeto desta pesquisa, sendo descartados.

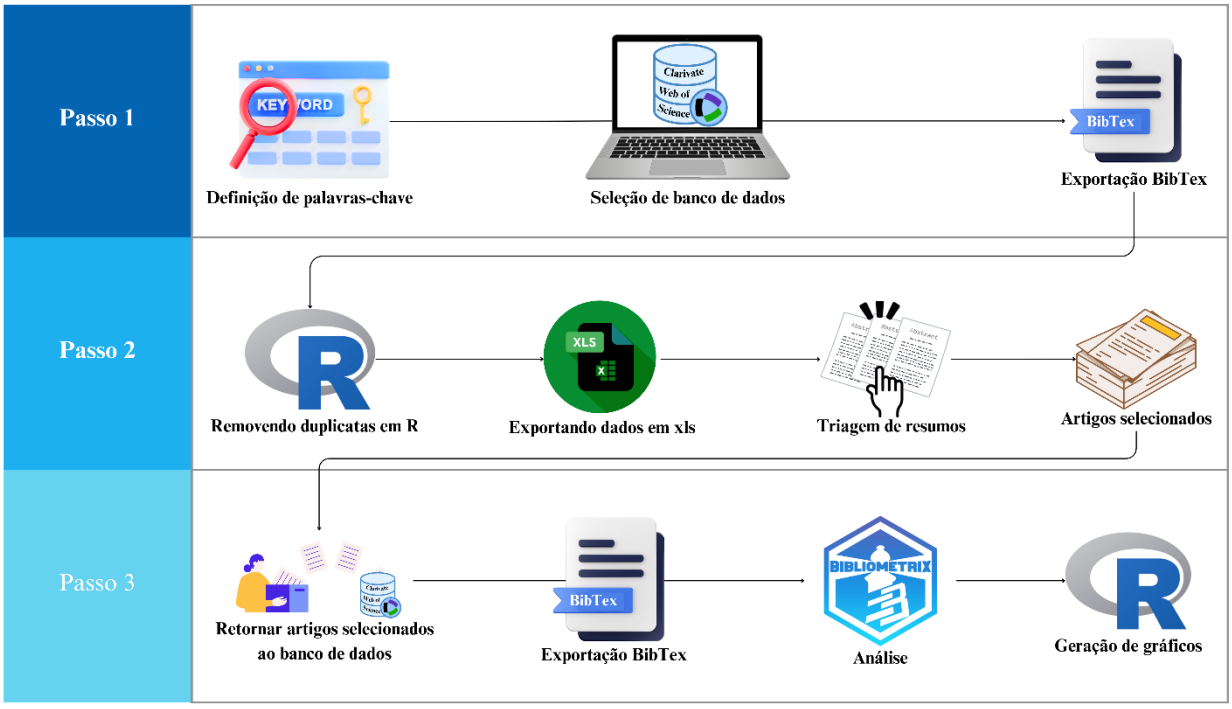

Figura 1. Enquadramento da metodologia de investigação sobre a eficiência da utilização da água no setor florestal.

Para a base de dados final (238 artigos selecionados), foram calculados os seguintes indicadores: (i) análise quantitativa da produção científica anual; (ii) periódicos com mais publicações sobre o tema; (iii) os autores que mais publicaram e apresentaram o maior índice

H; iv) a distribuição geográfica dos estudos; (v) análise de coautoria entre autores; e (vi) análise de co-ocorrência e agrupamento de palavras-chave.

Realizamos a análise bibliométrica e quantitativa dos indicadores utilizando a biblioteca Bibliometrix e a interface web do aplicativo Biblioshiny por meio do software R (R core team, 2023) (ARIA; CUCCURULLO, 2017). O Biblioshiny é uma extensão online e consiste em uma ferramenta para auxiliar no desenvolvimento de pesquisas sobre análises cienciométricas e bibliométricas (GONÇALVES et al., 2021).

2.2 Análise dos dados

Para determinação das metodologias utilizadas nos estudos, foi realizada a leitura de todos os trabalhos e identificação de qual metodologia os autores utilizaram para determinar a EUA. As metodologias foram distribuídas em oito tipos: balanço de carbono (Balanço de C), IRGA (metodologias que utilizam taxa fotossintética líquida, transpiração ou condutância estomática), discriminação de isótopos de carbono (Isotópica), meta-análises, produtividade pela transpiração (Prod./E), sapflow, câmera de árvore interira (CAI) e quando não encontrado no trabalho o método para estimar a EUA definimos com não especificado. Além disso, também classificamos as metodologias de acordo com a escala (foliar, árvore e paisagem) em que foram realizados os estudos.

Distribuímos os 238 artigos estudados de acordo com o tipo bioclimático classificado por Whittaker. Em sua classificação dos biomas, Whittaker ofereceu um esquema bidimensional, baseado principalmente na precipitação média anual e na temperatura média anual, reconhecendo assim 25 tipos de biomas e mapeando os 14 principais em relação a essas duas variáveis (precipitação e temperatura). Para realizar a distribuição dos artigos no diagrama bioclimático de Whittaker, obtivemos os dados climáticos dos estudos da base climática NASA POWER em escala diária por meio do software R, versão 4.3.2 (R CORE TEAM, 2018).

Extraímos os dados de EUA dos artigos selecionados para este estudo com o auxílio do aplicativo PlotDigitizer, 3.1.6, 2024 (https://plotdigitizer.com). Organizamos os dados de acordo com sua metodologia de medição e unidade de medida. Para as análises, foram selecionados estudos que avaliaram a EUA em kg de biomassa por m^3 de água, considerando apenas análises feitas em *Eucalyptus* spp. Esses dados foram extrapolados para $Mg.m^{-3}.ha^{-1}$ para que pudessem ser avaliados adequadamente e na mesma proporção, pois os estudos avaliaram diferentes números de árvores em diferentes espaçamentos. Assim, avaliamos os resultados de 34 artigos.

3. Resultados e Discussão

Selecionamos 238 artigos cobrindo 86 periódicos diferentes de 1991 a 2023. As publicações são de autoria de 872 autores (Figura 2). O número de publicações permite inferir sobre o avanço das pesquisas voltadas para o tema. Além disso, a cooperação entre os autores demonstra a busca por melhorias e respostas sobre a EUA ao longo do tempo, bem como a necessidade de aplicar mais esforços em pesquisas direcionadas ao tema. Finalmente, do total de publicações revisadas por pares, os artigos de revisão representam apenas 1,26% em comparação com outros artigos publicados (98,74%).

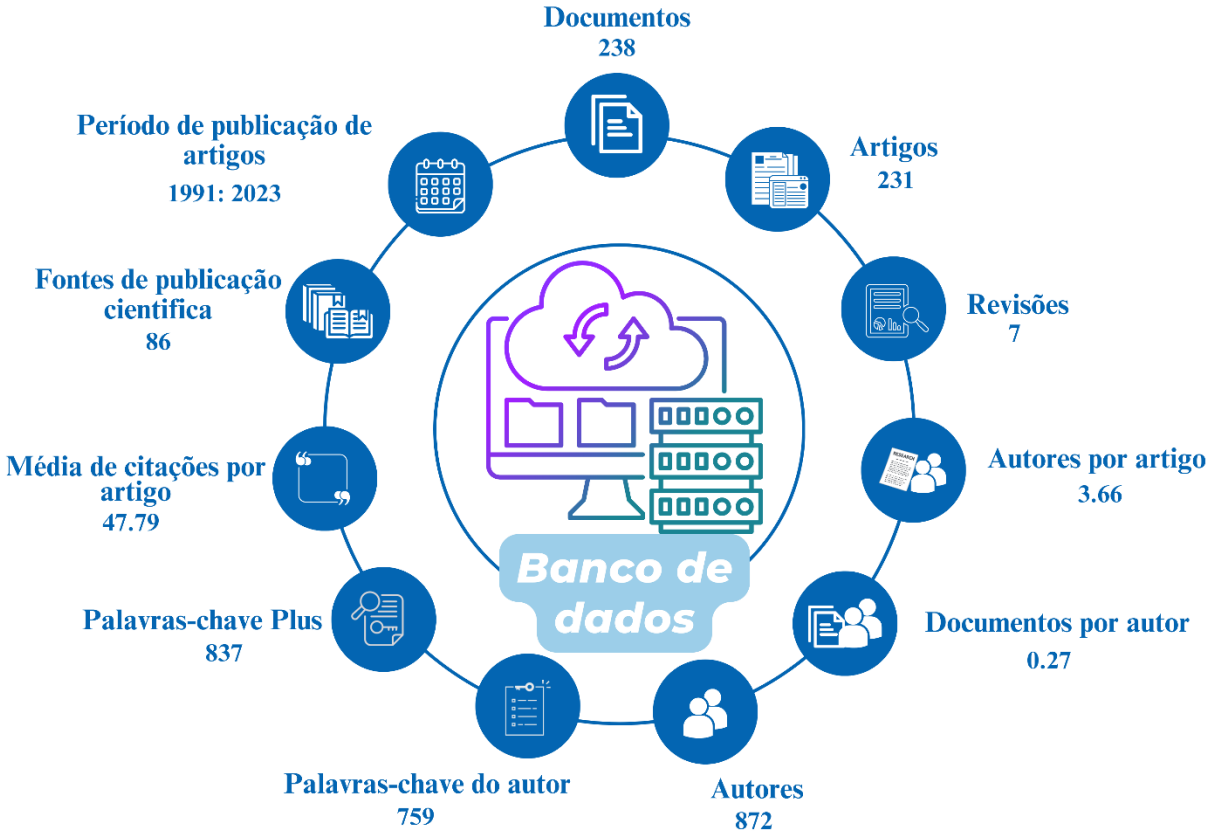

Figura 2. Diagrama resumindo os principais achados quantitativos do banco de dados.

3.1 Publicações ao longo dos anos, autores e sua contribuição

A análise da evolução da produção científica anual mostrou que os autores publicaram uma média de 7,21 artigos (desvio-padrão = 4,14; mediana = 6) a cada ano entre 1991 e 2023. O número mínimo de artigos publicados foi de um (1) em 1991, e o máximo foi de 19 artigos em 2016 (Figura 3). Embora haja variação interanual, o desenvolvimento de pesquisas voltadas para a eficiência do uso da água (EUA) apresenta uma tendência de aumento linear, apresentando médias de 3,91, 6,54 e 11,18 artigos publicados por década analisada.

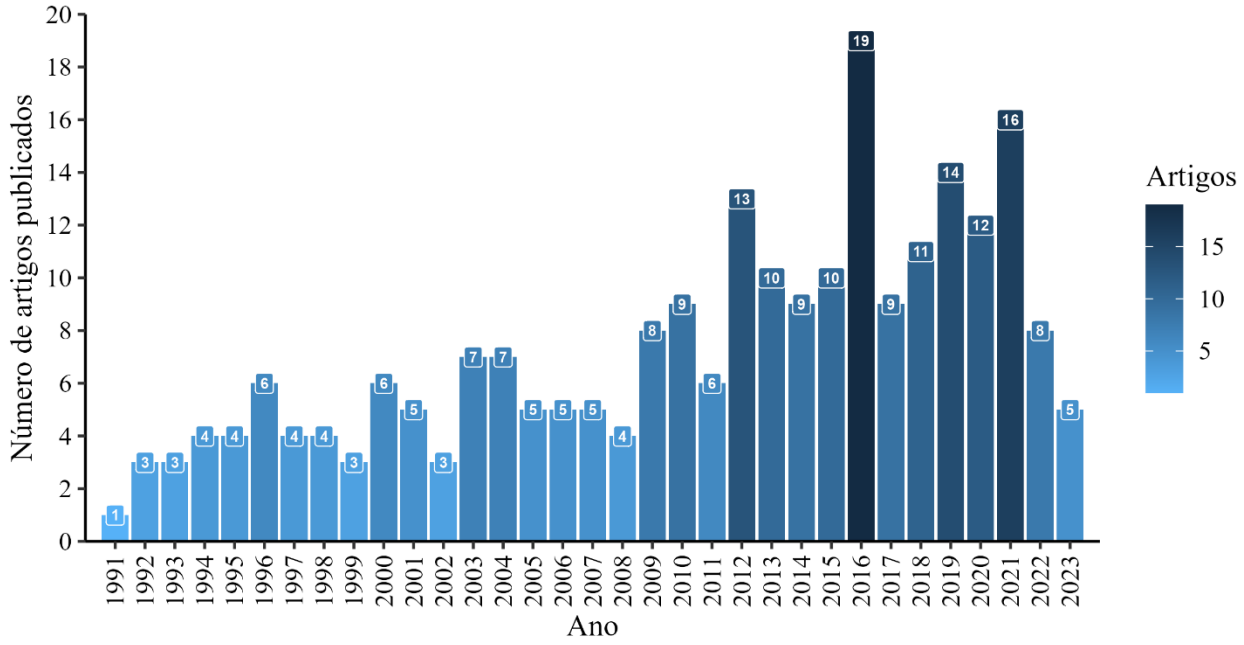

Figura 3. Número de publicações por ano sobre eficiência no uso da água (EUA) durante o período de 1991 a 2023.

O primeiro registro de EUA em estudos florestais ocorreu na década de 1990, publicado por Lovenstein, Berliner e Van Keulen, (1991), que analisaram as espécies *Acacia salicina* e *Eucalyptus occidentalis*. Os autores examinaram a influência da densidade de árvores na produção de biomassa, padrões de absorção de água, EUA determinados pela divisão da biomassa pela quantidade de água usada e a viabilidade de introduzir uma cultura anual consorciada durante um período de três anos. Lovenstein, Berliner e Van Keulen, (1991) descobriram que a EUA não foi significativamente afetada pela densidade e que o aumento da biomassa por unidade de área está necessariamente associado a uma maior absorção de água.

Apesar de a primeira publicação ter ocorrido em 1991, o aumento crucial no número de publicações sobre a EUA só ocorreu em meados de 2012. No entanto, identificamos flutuações no número de publicações ao longo dos anos. Após 1991, é possível observar picos de produção nos anos de 2012, 2016 e 2021, o que pode ser explicado pela ocorrência de eventos climáticos como o El Niño que causaram períodos significativos de seca (MITCHELL, 1992; SINACORE et al., 2020; VAN DIJK et al., 2013). Esses estudos tiveram como objetivo identificar a relação entre a EUA e o clima, prever o impacto das plantações florestais sobre os recursos hídricos e identificar a melhor forma de manejar a água nas plantações florestais (DRAKE et al., 2012; KUNERT et al., 2012; LOCKHART et al., 2016; NICCOLI et al., 2021; PENG et al., 2021; PITA-BARBOSA; HODECKER; DE BARROS, 2016).

Identificou-se uma queda acentuada na produção de artigos em 2022, destacando o impacto da pandemia de COVID-19 na produção científica referente à EUA (SANUDIN et al., 2023). Esse fato contraria as expectativas, pois se antecipa que no atual contexto de intensificação das mudanças climáticas e escassez de recursos, ocorreria um aumento de estudos sobre o manejo e gestão de florestas com o uso racional de recursos (CALDATO; SCHUMACHER, 2013).

3.2 Periódicos que publicam sobre eficiência no uso da água

A base de dados compreende um total de 86 periódicos, sendo que apenas 42 periódicos (48,84%) possuem mais de um artigo sobre a EUA. Entre os vinte principais periódicos, ou seja, os mais ativos, Forest Ecology and Management e Tree Physiology foram responsáveis pela publicação de 22,68% do total de artigos analisados (13,44% e 9,24%, respectivamente), seguidos pelo Australian Journal of Botany (3,36%) e Agricultural and Forest Meteorology (2,94%) (Figura 4).

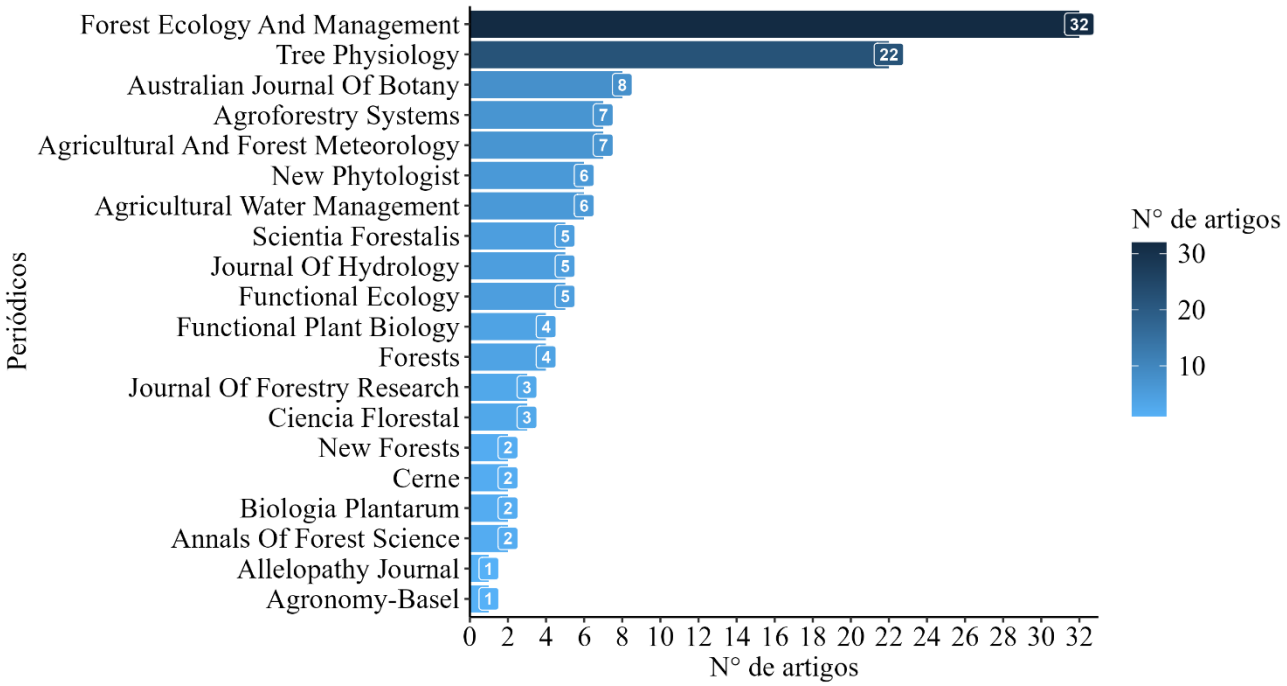

Figura 4. Número de artigos publicados por periódico sobre eficiência no uso da água entre 1991 e 2023.

Os periódicos com maior número de publicações e citações na EUA foram Tree Physiology, com 1.134 citações, e Forest Ecology and Management, com 861 citações. A Tree Physiology está entre os periódicos que mais publicam sobre a EUA porque cobre todos os

aspectos da fisiologia das árvores. Em contraste, Forest Ecology and Management se concentra em artigos científicos que abrangem vários tópicos, como biologia, ecologia, manejo e conservação de plantações e florestas naturais. Além disso, é uma das revistas mais conhecidas no campo das Ciências Florestais.

As publicações identificadas em nossa base de dados mostram uma predominância em periódicos das áreas de Ciências Agrárias, Ecologia e Ciências Ambientais. Esse resultado é esperado, pois essas áreas apoiam pesquisas sobre a eficiência da utilização de recursos pelas florestas. Os estudos no campo das Ciências Agrárias concentram-se principalmente em como a silvicultura e as práticas de manejo florestal podem influenciar a EUA e melhorar a produtividade florestal. As pesquisas realizadas na área de Ecologia abordam temas relacionados à conservação dos recursos hídricos e dos serviços ecossistêmicos, principalmente em florestas nativas. Estudos desenvolvidos no campo das Ciências Ambientais buscam relacionar os EUA de plantios florestais ou florestas nativas com as condições ambientais, visando determinar como o uso da água por essas florestas afetaria o ambiente circundante e comparar metodologias.

3.3 Análise de autorias

Os principais autores das publicações sobre eficiência do uso da água são os pesquisadores Dr. David T. Tissue (10 publicações, Austrália), Dr. Mark A. Adams (8 publicações, Austrália), Dr. Derek Eamus (8 publicações, Austrália), Dr. Peiqiang Zhao (8 publicações, China), Dr. Don A. White (7 publicações, Austrália) e Dr. Robert M. Hubbard (6 publicações, Brasil) (Figura 5).

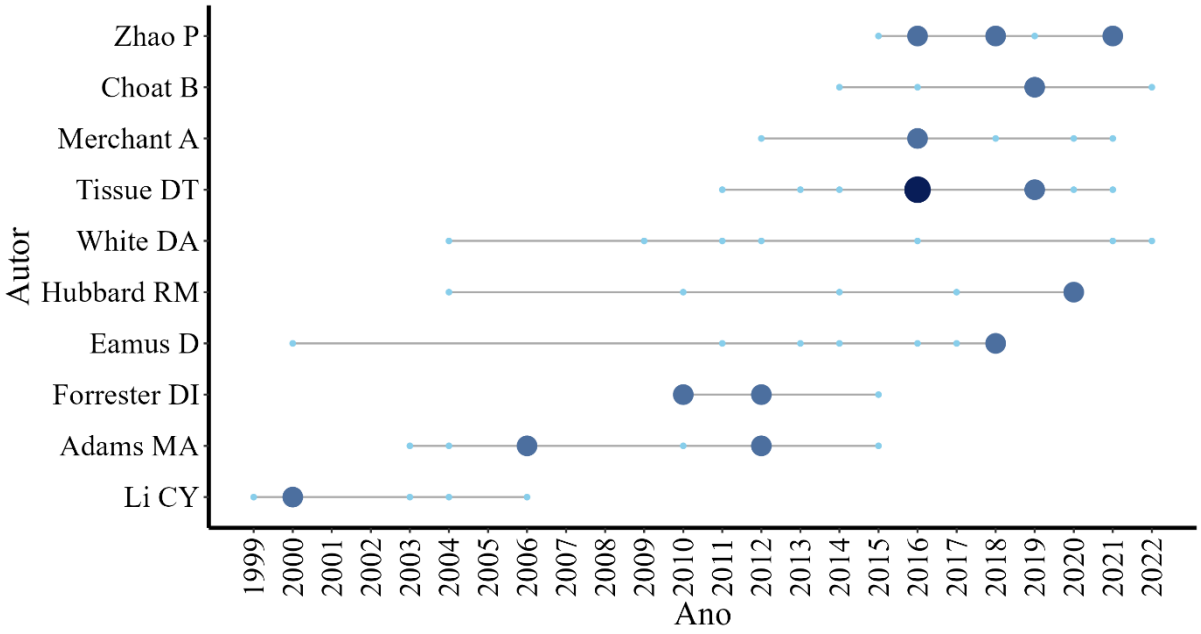

Figura 5. Principais autores com publicações relacionadas à EUA nos últimos 23 anos, de 1999 a 2022. Os círculos representam o número de publicações por ano para cada autor, o tamanho do círculo está relacionado ao número de artigos publicados por cada autor em um determinado ano, o que também se reflete na cor em uma escala anual.

As publicações dos autores mais produtivos remontam a estudos dos anos 2000. O autor D.T. Tissue, que é autor correspondente em dois artigos e coautor nas demais produções, teve seu primeiro trabalho publicado em 2011. Os estudos são focados no gênero *Eucalyptus* (JIANG et al., 2021). O autor M.A. Adams iniciou suas publicações em 2003, sendo coautor de oito artigos. Os estudos de M.A. Adams dão ênfase particular aos gêneros *Eucalyptus* e *Fagus*. O pesquisador D.A. White, primeiro autor de três artigos, iniciou suas publicações em 2004 com trabalhos voltados para os gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* (WHITE et al., 2021). Por fim, o pesquisador R.M. Hubbard, primeiro autor de quatro artigos, publicou seus primeiros resultados sobre o tema em 2004, focando principalmente nos eucaliptos (HUBBARD et al., 2020).

O desempenho dos autores em relação às publicações científicas, tanto em quantidade quanto em qualidade, é comumente expresso pelo índice-H. Esse índice indica que determinado artigo foi citado pelo menos x vezes (CHEN, WEI et al., 2020), permitindo inferir quais autores publicam mais artigos e como seus artigos têm sido utilizados por outros por meio do número de citações. O índice-H dos cinco autores mais produtivos varia de um a nove. Os autores D.T. Tissue (índice H = 9), M.A. Adams (índice H = 8) e D. Eamus (índice H = 7) são,

respectivamente, os três autores com o maior índice H e são os dez autores mais citados, com D.T. Tissue citado 461 vezes, M.A. Adams 595 vezes e D. Eamus 347 vezes (Figura 6).

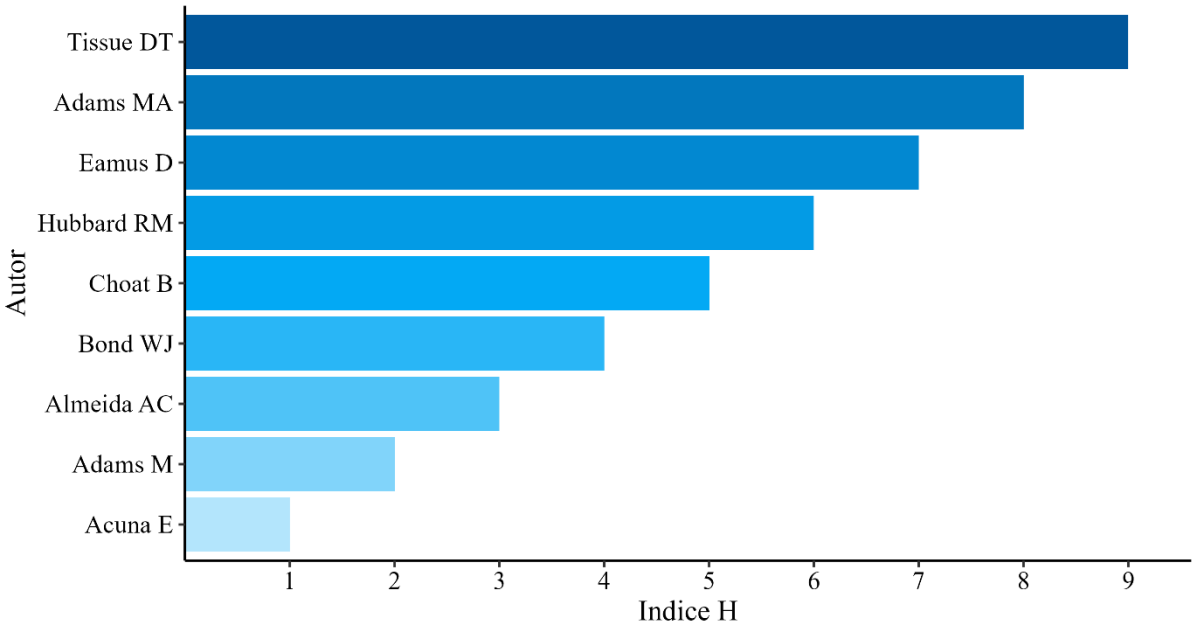

Figura 6. Distribuição dos autores mais produtivos associados ao índice H de cada autor.

3.4 Análise de palavras-chave

A análise das palavras-chave permite inferir os principais termos presentes nos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos publicados na área estudada (XIE et al., 2023). Essa análise nos permite determinar tendências e lacunas de pesquisa no campo, no nosso caso, referente à EUA. Em resumo, as palavras-chave sintetizaram amplamente o tema estudado, bem como indicam novas tendências de estudo, demandas, oportunidades de pesquisa, áreas e tópicos de foco e também os mais discutidos (CHEN, SHIYOU et al., 2022). Quantificamos 837 palavras-chave, das quais 50 palavras se destacaram como as mais frequentes nos documentos. No geral, as cinco palavras mais presentes na pesquisa foram: crescimento, eficiência do uso da água, trocas gasosas, condutância estomática e discriminação de isótopos de carbono (Figura 7). Essas palavras indicam que a eficiência do uso da água (EUA) está relacionada a estudos de crescimento e produtividade de árvores e florestas, ecofisiologia e à metodologia de discriminação de isótopos de carbono.

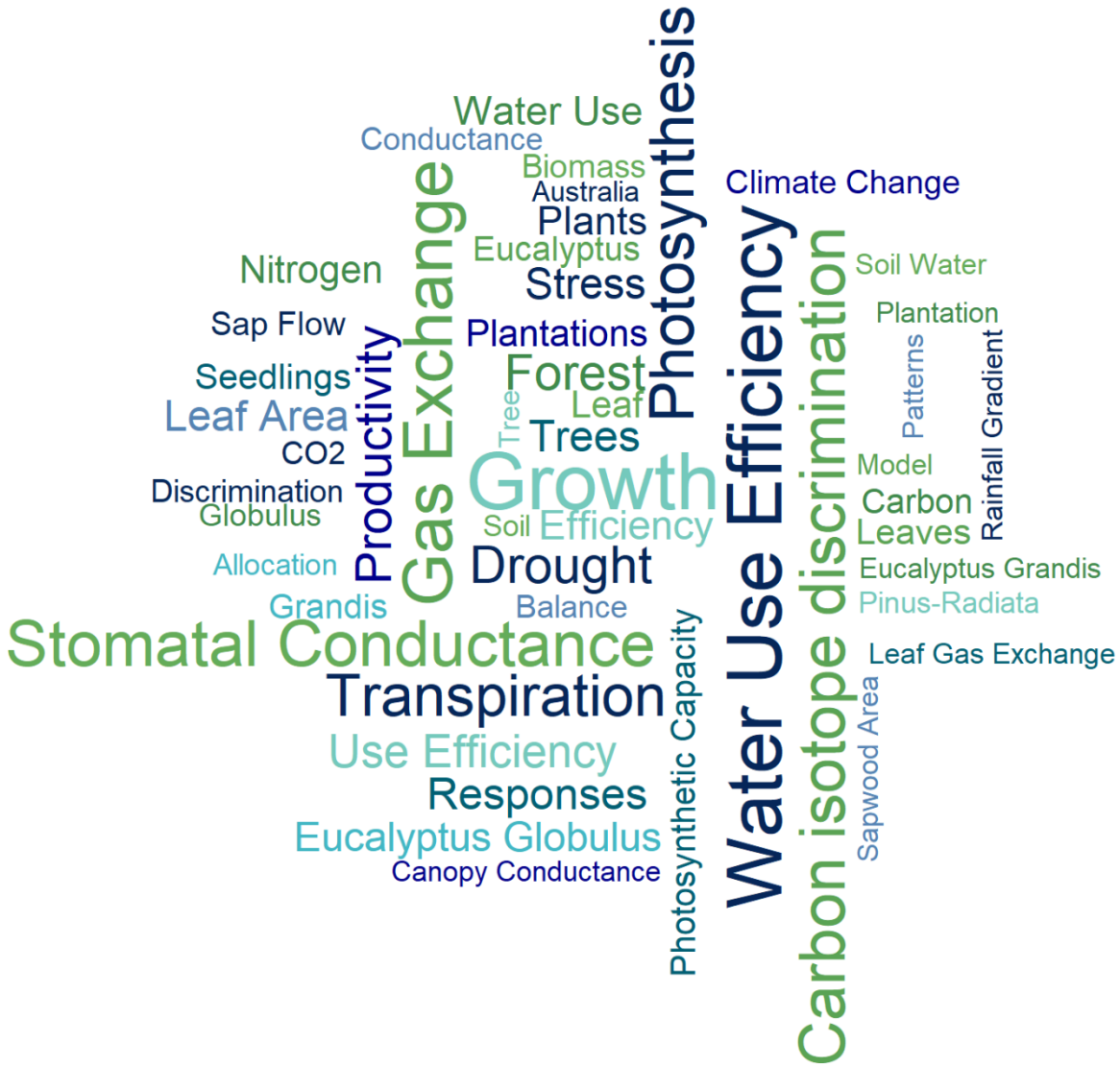

Figura 7. Nuvem de palavras das palavras-chave mais citadas em publicações sobre eficiência no uso da água no setor florestal.

A visualização dos termos mais frequentes é comumente encontrada na forma gráfica de uma nuvem de palavras. Quanto maior a frequência de ocorrência de uma palavra no texto analisado, maior será o tamanho da fonte (VERMA; GHOSH, 2024). A partir da nuvem de palavras, identificamos os caminhos de mudança dos estudos, bem como as estruturas, contextos e pontos fortes de tópicos emergentes que aparecem ao longo do tempo, retratando o grau e a direção do desenvolvimento na área de estudo e as previsões de tendências de pesquisa (VERMA; GHOSH, 2024). Podemos inferir que os estudos sobre EUA estão relacionados principalmente à ecofisiologia, produção florestal e melhoramento genético, indicando que

esses sujeitos são os que mais investem tempo e recursos para entender o desempenho da EUA em relação às condições edafoclimáticas.

A ecofisiologia é uma área crítica para o manejo florestal eficaz porque abrange não apenas a EUA, mas também a eficiência do uso de nutrientes, a estrutura e o desenvolvimento do dossel e a arquitetura e função das raízes. Portanto, esse conhecimento pode ser usado no melhoramento genético para aprimorar os mecanismos de defesa das plantas contra as mudanças climáticas. Além disso, pode ser aplicado na silvicultura para aumentar a produtividade florestal por meio de práticas que promovam um crescimento mais efetivo (MITCHELL, 1992).

3.5 Distribuição geográfica da pesquisa

Entre 1991 e 2023, foram identificadas publicações sobre eficiência no uso da água em 41 países. A distribuição das publicações surge de parcerias inter e intra-institucionais e de autores em todo o mundo. Frequentemente, os autores correspondentes são afiliados a instituições na Austrália (71,6% das publicações de um único país (Single Country Publications - SCP) e 28,4% das publicações de vários países (Multiple Country Publications - MCP)), Brasil (56,3% das publicações de um único país (SCP) e 43,7% das publicações de vários países (MCP)) e China (53,8% das publicações de um único país (SCP) e 46,2% das publicações de vários países (MCP)) (Figura 8).

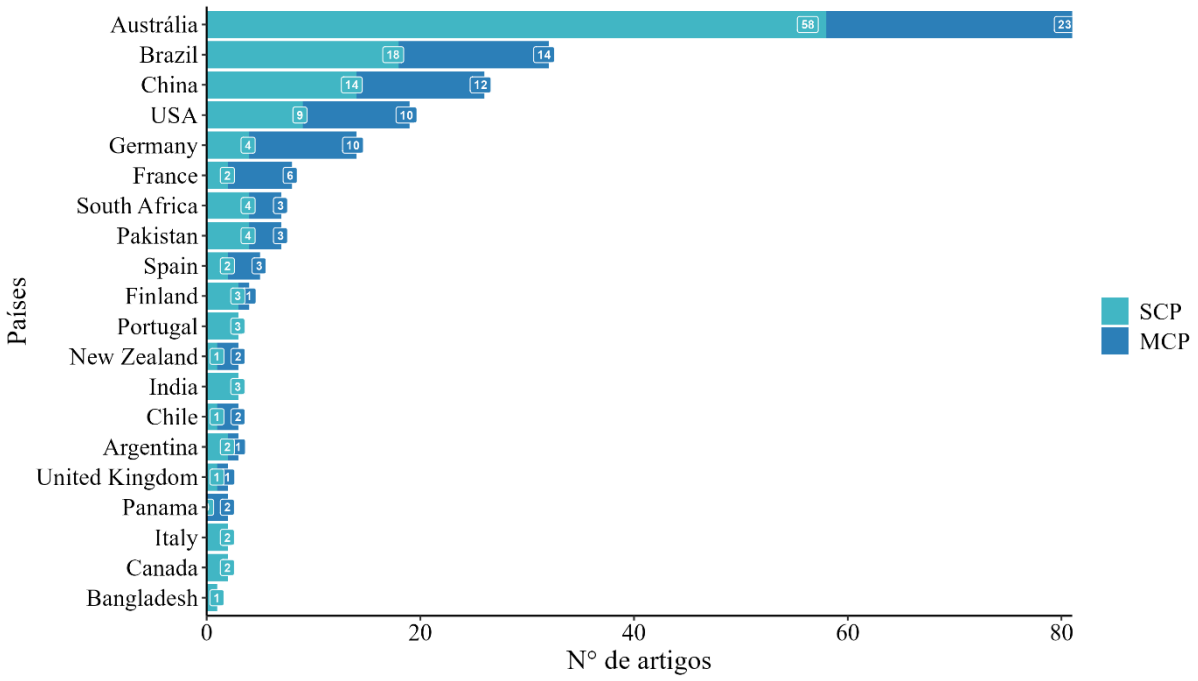

Figura 8. Número de artigos por país com base na afiliação do autor correspondente. Em que: SCP é Single Country Publications, ou seja, todos os autores dos artigos são daquele país em particular; MCP é Multiple Country Publications, ou seja, alguns dos autores do artigo são de outro país.

A pesquisa foi conduzida principalmente por autores do mesmo país (SCP) e, com menor frequência, por meio de colaborações internacionais (MCP). Os resultados indicam um impacto negativo na melhoria dos níveis de pesquisa e cooperação internacional. Com essa falta de parcerias internacionais, perde-se a capacidade de troca de informações e descobertas ainda mais profundas sobre o tema quando há a possibilidade de combinar diferentes conhecimentos, tecnologias e processos.

Austrália (81), Brasil (32), China (26) e Estados Unidos (19) estão entre os países que mais publicaram, representando juntos 66,39% do total de publicações (Figura 9). Nossos resultados nos permitem inferir que a Austrália é o país pioneiro nessa área, com maior produção científica e citações (3.346). A Austrália tornou-se um centro de referência para pesquisas no campo da EUA. Os estudos buscam principalmente compreender o desempenho das espécies nativas em relação à sobrevivência em condições ambientais extremas, bem como a interação entre as plantas e a disponibilidade hídrica (DOLEY, 2004).

A liderança da Austrália nas pesquisas sobre a EUA resulta principalmente dos problemas hídricos enfrentados ao longo dos anos. A conhecida “Seca do Milênio” impulsionou o país a buscar novas estratégias para a gestão dos recursos hídricos, resultando em uma ampla produção acadêmica sobre o tema (TURNER *et al.*, 2016). Ademais, a temporada de incêndios florestais na Austrália (2019-2020) foram sem precedentes, queimando diversas bacias hidrográficas sendo seguidos por chuvas fortes que interromperam a propagação do fogo, mas provocaram escoamento extensivo e erosão degradando a qualidade e a disponibilidade de água (ROBINNE *et al.*, 2021).

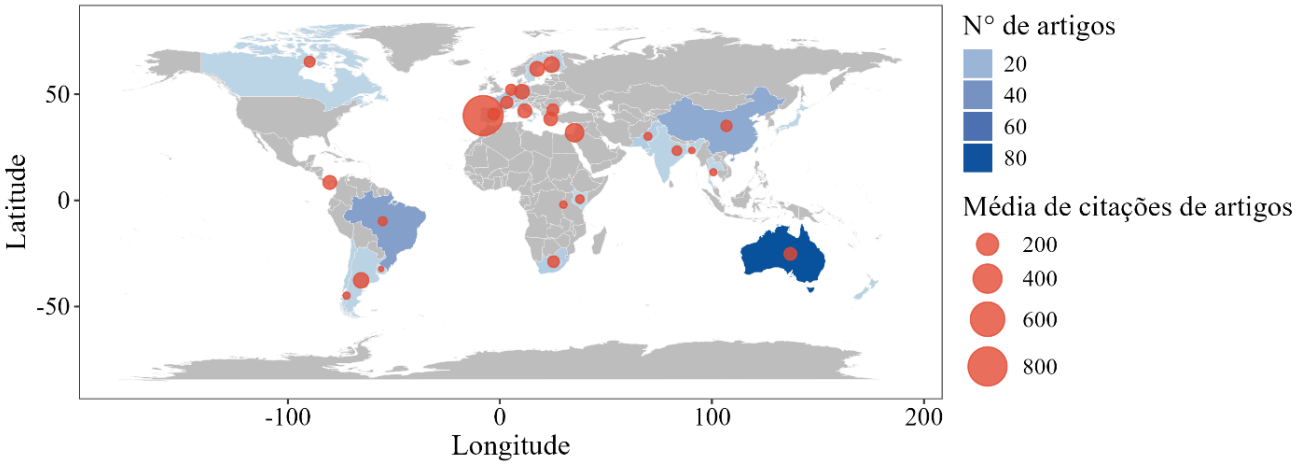

Figura 9. Distribuição geográfica da origem da publicação. A escala de cores azul representa o número de publicações por país, contando um estudo para cada país dos autores afiliados ao artigo. A escala de cores vermelhas representa o número de citações dos artigos para cada país.

O Brasil, com o segundo maior número de publicações sobre o tema, apresenta a disponibilidade hídrica como um dos principais impulsionadores da produtividade de *Eucalyptus* sp. (HAKAMADA et al., 2020). Assim, estudos ao longo dos anos têm se esforçado para otimizar o EUA dos plantios florestais. O interesse em melhorar a EUA se deve, principalmente, à rápida taxa de expansão dos plantios de *Eucalyptus* sp. no Brasil e à crescente preocupação com o uso da água por esses plantios, especialmente devido aos impactos que as mudanças climáticas vêm causando, como secas extremas e inundações (HAKAMADA et al., 2020; HUBBARD et al., 2010, 2020).

A China, estando em terceiro lugar no que diz respeito ao número de publicações sobre EUA, demonstra sua preocupação com as mudanças nos padrões de precipitação no sul da China no contexto das mudanças climáticas (HUA et al., 2021). Isso pode aumentar a severidade e a duração da estação seca no sul da China, pois a precipitação é distribuída de forma desigual ao longo do tempo, afetando assim a produtividade das florestas plantadas de *Eucalyptus* sp. (HUA et al., 2021). Portanto, é necessário melhorar a compreensão da capacidade ecofisiológica das variedades locais de *Eucalyptus* sp. na China para suportar o estresse hídrico diante das mudanças climáticas, especialmente quando associado ao aumento da intensidade e duração da seca (GU et al., 2021).

O desenvolvimento de estudos e publicações sobre eficiência no uso da água estende-se de países em desenvolvimento para países desenvolvidos, demonstrando a crescente preocupação e interesse dos países na EUA. A preocupação em estudar a EUA está relacionada ao esforço global para mitigar as mudanças climáticas por meio da proteção, conservação e

restauração das florestas (ZHANG et al., 2023). Essas medidas influenciam a disponibilidade de recursos hídricos, pois podem aumentar o uso da água e diminuir as vazões dos rios ou mesmo a produção de água (CREED et al., 2019). O uso da água disponível e a capacidade da planta de realizar a fotossíntese estão intrinsecamente relacionados à capacidade de armazenamento de carbono da planta, um serviço ecossistêmico diretamente relacionado às mudanças climáticas (CONDON; ATCHLEY; MAXWELL, 2020; ELLISON et al., 2017).

A análise dos padrões de fluxo entre palavras-chave, autores e instituições, conforme apresentado no diagrama de Sankey, permite inferências sobre a presença significativa das universidades no desenvolvimento da pesquisa da EUA (Figura 10). Das nove principais instituições apresentadas aqui, sete são universidades, sendo as principais a Western Sydney University e a Chinese Academy of Sciences. As palavras-chave mais citadas pelos 10 autores mais produtivos e/ou com maior índice H são condutância estomática, fluxo de seiva, transpiração, eficiência no uso da água, seca, eucalipto, uso da água e fotossíntese.

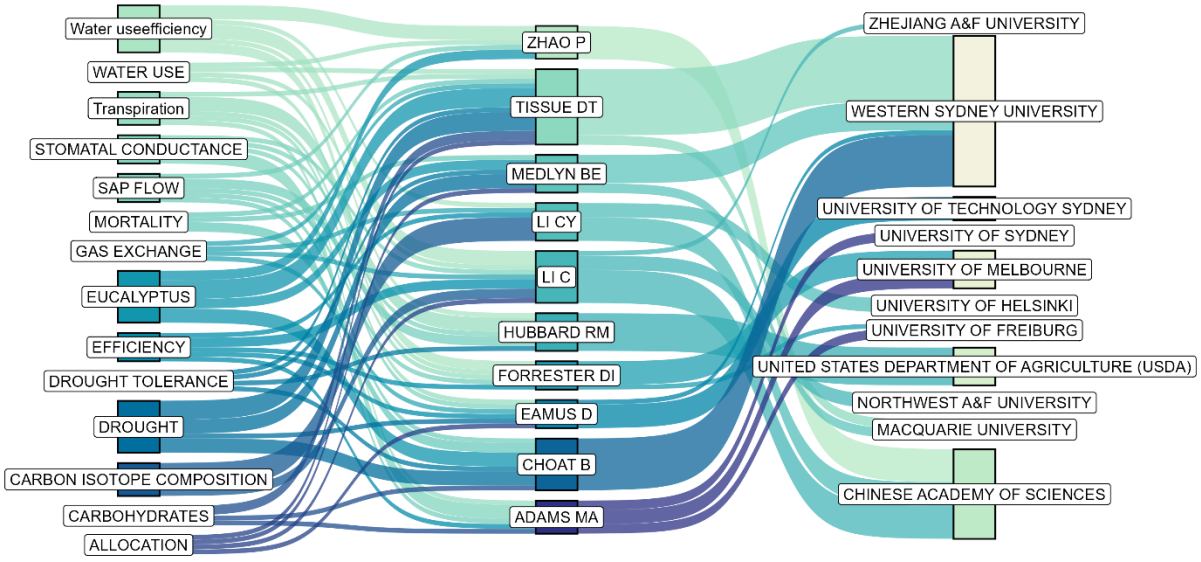

Figura 10. Mapa de visualização em rede baseado em dados bibliográficos entre palavras-chave, autores e instituições de pesquisa que abordaram a eficiência do uso da água.

3.6 Rede de Colaboração

O banco de dados compreende o agrupamento de pesquisadores e instituições, formando 8 grupos com relações entre si. Cada nó na rede representa um autor ou instituição, e a conexão entre os nós representa a colaboração entre autores e instituições. Em outras palavras, se um dos autores ou instituições tem uma relação de coautoria em alguma pesquisa, ela é representada

por uma conexão entre os dois nós na ordem n, e o tamanho dos nós reflete a frequência das colaborações (GONÇALVES et al., 2021).

A interligação das principais instituições, expressa por meio dos 8 clusters, sugere coesão na produção científica relacionada à EUA. A rede cooperativa teve suas categorias representadas pela Universidade de Sydney, Universidade da Austrália Ocidental, Universidade de São Paulo e Universidade Macquarie. A Universidade de São Paulo publicou o maior número de artigos (28), seguida pela Universidade de Sydney (27) e pela Universidade da Austrália Ocidental (20). As instituições com maior número de publicações pertencem a diferentes clusters, sendo que a maioria dessas instituições está localizada na Austrália, corroborando o fato de ser o país que mais pública sobre a EUA (Figura 11).

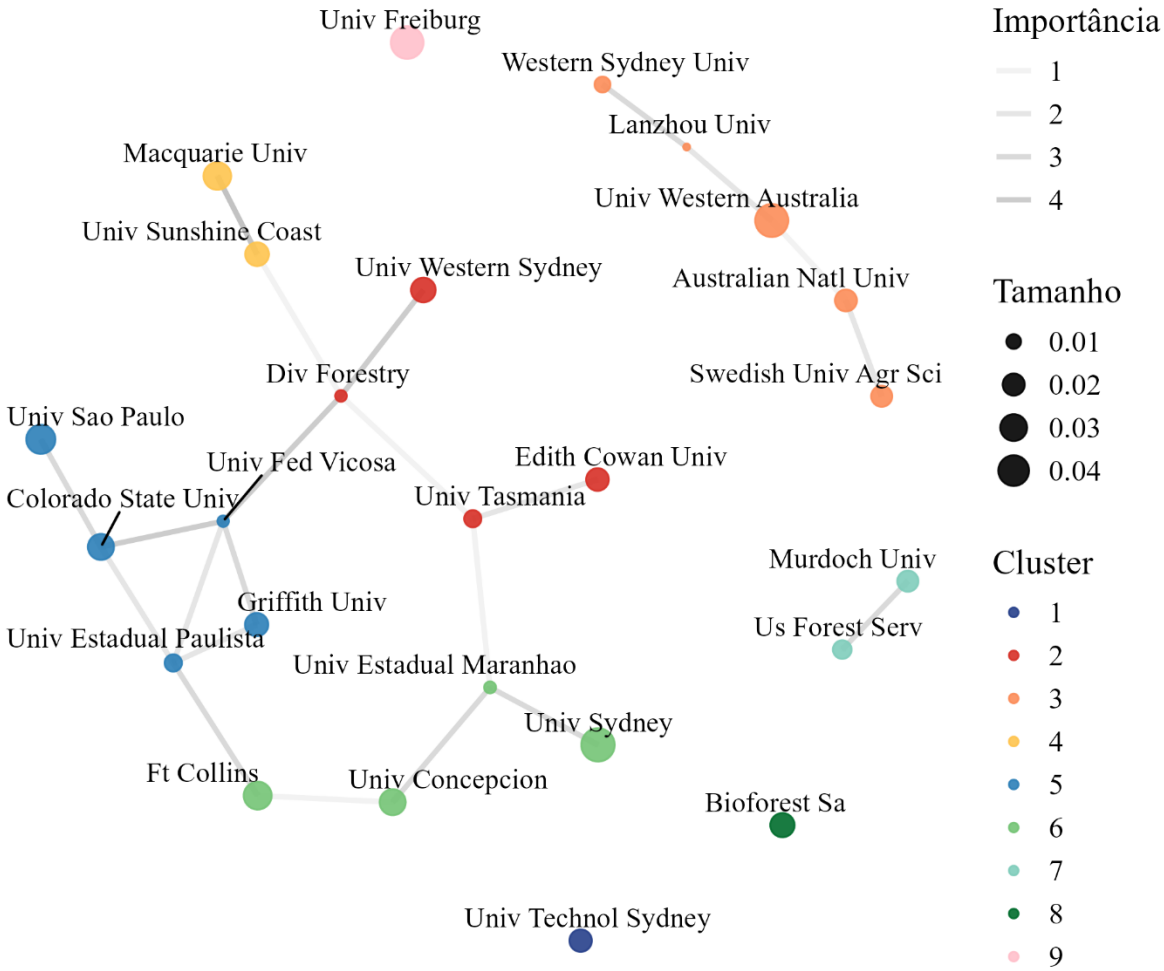

Figura 11. Mapa de visualização da rede de colaboração entre as principais instituições com base em dados bibliográficos. O tamanho dos nós (tamanho) representa o grau de importância de cada nó dentro da rede, as linhas representam a força da conexão entre os nós da rede e os clusters representam os diferentes grupos de colaboração que podem ou não estar vinculados por um nó.

As categorias da rede de pesquisadores foram representadas pelos autores Tissue D. T. Forrester D. I., Adams M. A. e Hubbard R. M. O autor Tissue D. T. tem o maior número de publicações (10) na área, seguido por Adams M. A. (8), Hubbard R. M. (6) e Forrester D. I. (5) (Figura 12). Os dois autores com maior número de publicações têm vínculos com dois grupos de pesquisa diferentes. Isso mostra que a relevância das publicações do grupo de cada autor atrai parcerias com outros pesquisadores interessados no mesmo assunto, que até então pertenciam a outra rede de contribuições.

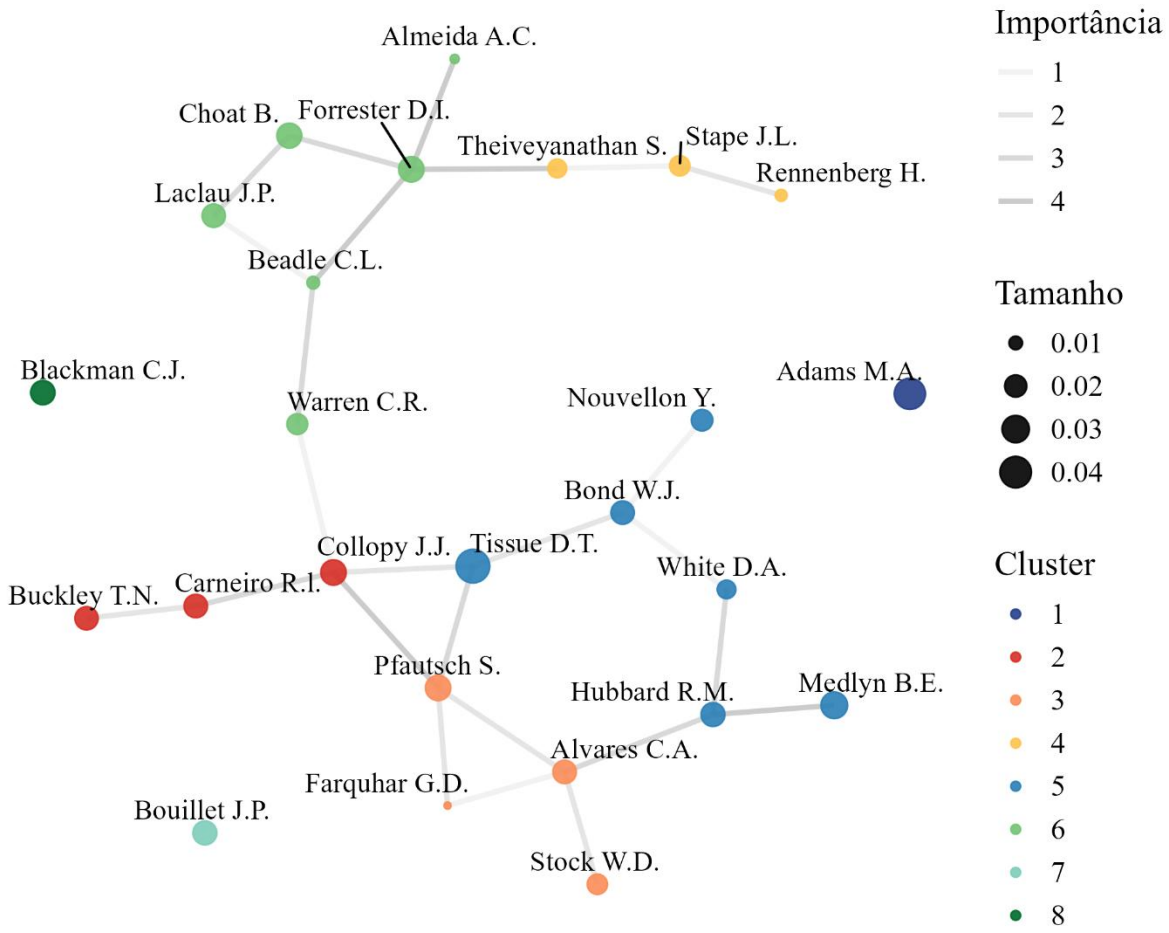

Figura 12. Mapa de visualização da rede de colaboração entre os principais autores com base em dados bibliográficos. O tamanho dos nós (tamanho) representa o grau de importância de cada nó dentro da rede, as linhas representam a força da conexão entre os nós da rede e os clusters representam os diferentes grupos de colaboração que podem ou não estar vinculados por um nó.

As colaborações potencializam a pesquisa, trazendo prestígio e importância para os países, instituições e autores que trabalham juntos para buscar alternativas e novas formas de

melhorar a gestão dos recursos hídricos e das plantações. As colaborações com múltiplos participantes reforçam a importância da sustentabilidade e melhoram a capacidade de enfrentar desafios, tornando essencial enfrentar as complexidades envolvidas na cooperação ao lidar com problemas práticos, como questões climáticas e ambientais (SHIN et al., 2022). Como Caldato e Schumacher, (2013) expressaram em seu trabalho, para que o caminho da sustentabilidade seja alcançado em todos os seus aspectos, todos os esforços e tecnologias existentes devem ser aplicados.

3.7 Metodologias usadas na estimativa de EUA

A eficiência do uso da água (EUA) é um campo de pesquisa no qual diversas metodologias têm sido empregadas para sua determinação e avaliação, visando enfrentar diferentes desafios e explorar novas fronteiras. O banco de dados inclui informações em que a EUA foi avaliada na escala foliar (46,2%), seguida da escala arbórea (38,2%), escala de paisagem (11,3%) (Figura 13A) e metanálises (4,3%) que sistematizam o conhecimento sobre o tema (Figura 13).

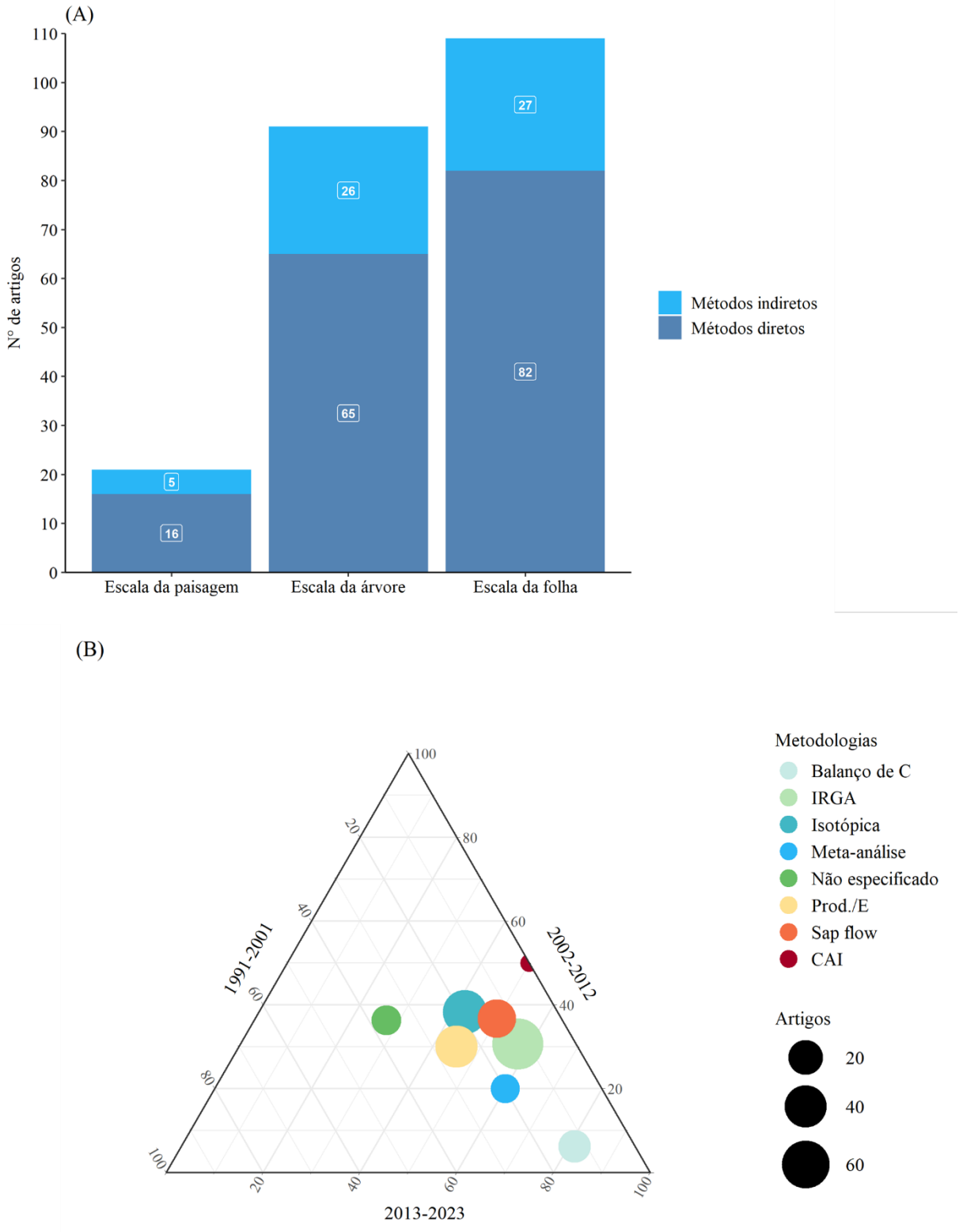

Figura 13. Metodologias utilizadas para determinar a eficiência do uso da água (EUA) nos artigos avaliados. Em (A) temos a distribuição dos artigos em relação à escala em que a EUA foi avaliada, que poderia ser por métodos indiretos em que foram utilizados modelos estatísticos para estimar a EUA e métodos diretos, em que foram realizadas medidas diretas na planta. Em

(B) temos o diagrama ternário que mostra as diferentes metodologias utilizadas para determinar a EUA de acordo com a década em que os artigos foram publicados. As metodologias foram classificadas como balanço C (balanço de carbono), IRGA (metodologias que utilizam taxa fotossintética líquida, transpiração ou condutância estomática), Isotópica (discriminação de isótopos de carbono 13), Meta-análise (artigos de revisão), Prod./E (produtividade em volume ou aumento por transpiração), Fluxo de seiva (dissipação térmica de calor), CAI (câmaras de árvores inteiras) e Não especificado (metodologias não especificadas no trabalho).

As análises de escalas foliares são conduzidas em um período de tempo muito curto e medidas usando a razão entre a assimilação líquida de dióxido de carbono, ou seja, A, e a condutância estomática gs ou E (BATTIE-LACLAU et al., 2016). A escala de árvore analisa o fluxo de seiva, refletindo a quantidade de água usada instantaneamente pela planta e sua capacidade de consumo de água por meio do processo pelo qual a água é absorvida e transportada do solo para o xilema (ASENSIO et al., 2020; WANG, GUOHUI et al., 2022). As análises em escala de paisagem, EUA podem ser determinadas a partir da razão entre o incremento da biomassa do tronco e a água transpirada pelas plantas durante o mesmo período (ASENSIO et al., 2020; BATTIE-LACLAU et al., 2016).

Nóia Júnior et al., (2020), estudando a aclimatação ecofisiológica de clones de *Eucalyptus* sp. submetidos a ciclos recorrentes de déficit hídrico e avaliando a EUA ao nível foliar, verificaram que o tamanho e o número de estômatos foram reduzidos, o que diminuiu a condutância estomática, permitindo que as plantas reduzissem a perda de água por transpiração e aumentassem a EUA. Hubbard et al., (2020) compararam o uso da água e a eficiência do uso da água no nível da árvore entre um clone resistente à seca e um clone de alta produtividade em três locais com condições edafoclimáticas contrastantes no Brasil, observando que o clone resistente à seca teve EUA quase 70% menor do que o clone de alta produtividade. Eamus et al., (2013), analisando EUA na escala do ecossistema em uma paisagem dominada por *Acacia aneura*, descobriram que, à medida que o déficit de pressão de vapor (VPD) aumentou ao longo de vários dias consecutivos na estação chuvosa, não houve resposta significativa no EUA do ecossistema, e na estação seca, à medida que o VPD aumentou, o EUA diminuiu curvilinearmente.

As quatro metodologias predominantes identificadas nas diferentes escalas nos estudos selecionados foram: analisadores de gases infravermelhos (IRGA) (75), métodos isotópicos (47), produtividade/transpiração (Prod./E) (40) e fluxo de seiva (30) (Figura 13B). As

metodologias variam de técnicas tradicionais (IRGA, fluxo de seiva e Prod./E) a métodos usados como proxies para EUA (métodos isotópicos). Cada metodologia oferece vantagens e adequação únicas para estudos específicos e diferentes escalas de paisagem.

Embora essas metodologias sejam difundidas na literatura, ainda há questionamentos sobre sua capacidade de capturar os efeitos do ambiente sobre o crescimento das plantas ao longo do tempo. Por exemplo, os métodos diretos quantificam o EUA instantaneamente, não refletindo a realidade ao longo da vida da planta. Por outro lado, metodologias indiretas, como a discriminação de isótopos de carbono ($\delta^{13}C$), permitem a inferência de EUA em todos os estágios de crescimento da planta, onde a fixação de ^{13}C pelas plantas ocorre principalmente em condições de estresse hídrico quando ocorre o fechamento estomático (BOUVET et al., 2020). A abordagem isotópica é um método relativamente de fácil medição, quando comparado a outros métodos, representando a relação linear e negativa entre a discriminação de isótopos de carbono ($\delta^{13}C$) e EUA (NUNES et al., 2016). O método isotópico pode vir a ser importante para o rankeamento de clones mais EUA e para fornecer uma base de dados mais rápida para comparação entre clones.

No Brasil, as pesquisas sobre EUA em *Eucalyptus* sp. vêm tendo como principal foco a identificação de clones mais tolerantes a seca, otimização de práticas silviculturais para reduzir o consumo dos recursos hídricos e desenvolvimento de modelos de uso de água, visando aumentar a sustentabilidade e a produtividade florestal.

3.8 Eficiência do uso da água de acordo com as zonas climáticas

O conjunto de artigos foi representado no espaço bioclimático determinado por Whittaker usando biomas terrestres (Figura 14A). De modo geral, os artigos tiveram maior distribuição nos biomas Deserto Subtropical, Floresta Tropical Savana e Bosque/Arbustos. Três artigos estavam fora da classificação bioclimática de Whittaker. A classificação de Whittaker tem limitações, pois os dados foram compilados com base em todos os biomas terrestres, exceto as florestas temperadas, e considerando apenas os dados médios de precipitação e temperatura, ignorando as fisionomias e estruturas dos biomas (GRUBB; PIPER; BELLINGHAM, 2017; HAMMOND et al., 2022; POYATOS et al., 2021).

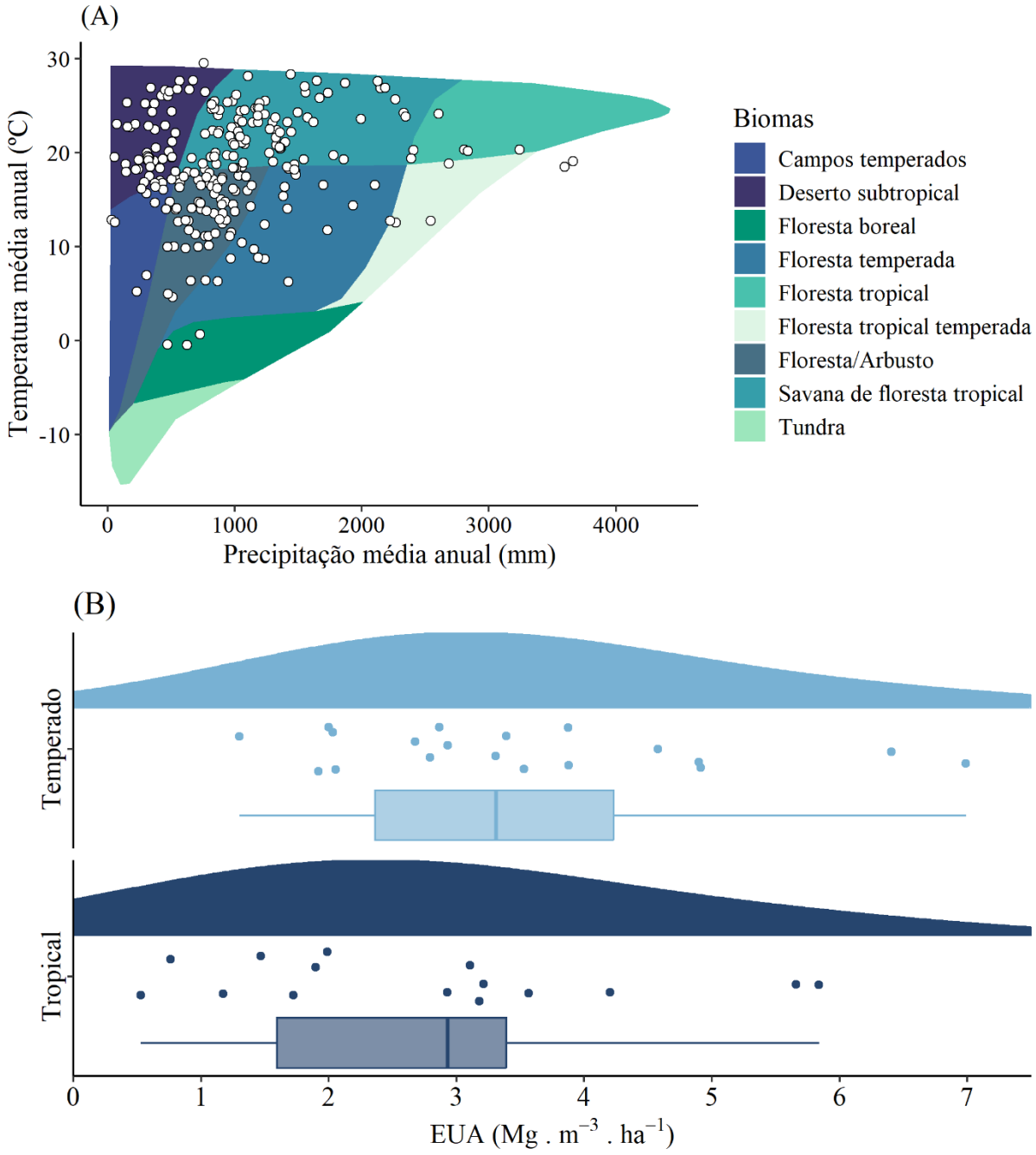

Figura 14. Distribuição dos estudos dentro da classificação bioclimática de Whittaker (A). Faixa de valores de EUA ($Mg.m^{-3}.ha^{-1}$) de acordo com o tipo de clima das regiões de estudo para os 34 estudos (B).

Observou-se a distribuição dos valores de EUA ($Mg.m^{-3}.ha^{-1}$) de acordo com a classificação climática das localidades dos estudos (Figura 14B). Os valores de EUA variaram de 0 a 7 $Mg.m^{-3}.ha^{-1}$, demonstrando uma distribuição enviesada para a direita, na qual a maioria dos dados está concentrada abaixo de 4 $Mg.m^{-3}.ha^{-1}$, com menos valores mais elevados. O clima

tropical chuvoso apresentou média de 2,74 $Mg.m^{-3}.ha^{-1}$, enquanto o clima temperado apresentou média de 3,49 $Mg.m^{-3}.ha^{-1}$. Essa diferença pode ser atribuída a diversos fatores, incluindo variações na disponibilidade hídrica, tipos de solo, e estratégias adaptativas das plantas ao estresse. Por exemplo, um estudo sobre a EUA em *Eucalyptus urophylla* em diferentes sítios do Brasil encontrou uma EUA de 2,63 kg/m^3 em Três Lagoas – MS de clima tropical e EUA de 4,41 kg/m^3 em Buri – SP de clima temperado, mostrando que a EUA varia conforme a disponibilidade hídrica e as condições climáticas do local (ALMEIDA et al., 2020). Esses estudos ressaltam a importância de considerar as características específicas de cada região ao avaliar a eficiência do uso da água em diferentes zonas climáticas.

Os 25 estudos (dentre os 34 estudos) foram realizados no Brasil (Figura 15), com variação de EUA entre 0,53 a 7 $Mg.m^{-3}.ha^{-1}$. Observa-se que os estudos estão distribuídos principalmente em regiões com SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) variando de -0,13 a 0,12. Os valores de EUA diminuem nas regiões mais secas devido à baixa precipitação e altas temperaturas. De acordo com Huang et al., (2017), as diferentes respostas da EUA à seca podem ser atribuídas a diferentes sensibilidades de produtividade primária bruta (GPP) e evapotranspiração do ecossistema (ET) à seca. A maioria dos estudos de EUA em *Eucalyptus* sp. está concentrada principalmente na região Sudeste, demonstrando uma lacuna significativa de informações sobre o desempenho da EUA nas regiões mais secas do Brasil.

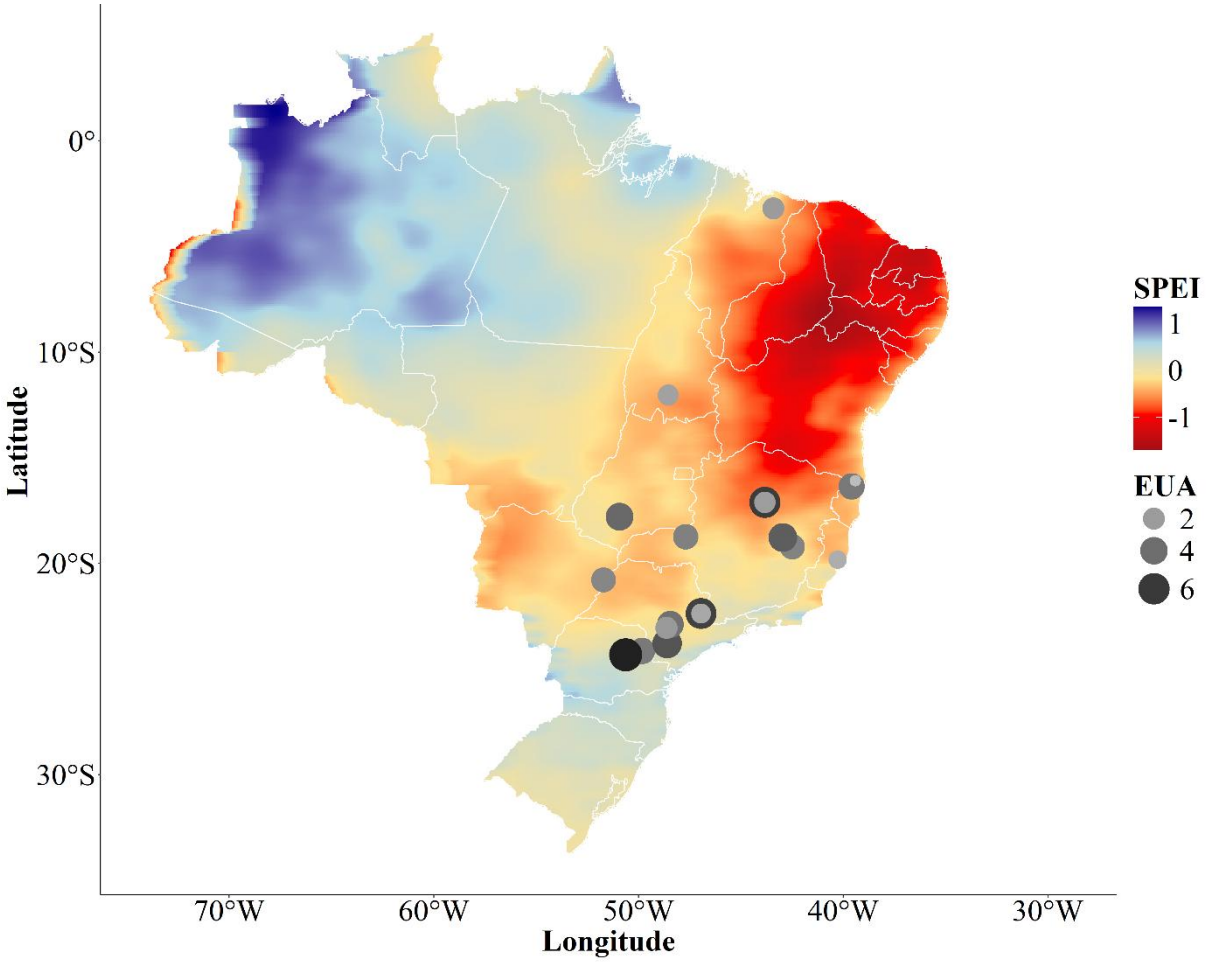

Figura 15. Distribuição dos valores de EUA ($Mg.m^{-3}.ha^{-1}$) dos 25 estudos realizados no Brasil. A variação de cor no mapa representa o SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) espacializado para o Brasil, e os círculos representam os valores de EUA de acordo com os estudos dos quais os dados foram extraídos.

4. Conclusão

Nossos achados nos permitem inferir um aumento significativo no interesse e na produção científica sobre a EUA nas últimas décadas. Observa-se uma tendência de crescimento linear nas publicações, especialmente a partir de 2012, destacando a crescente importância da pesquisa sobre a EUA em resposta às mudanças climáticas e a necessidade de práticas florestais sustentáveis. Os métodos de avaliação da EUA variam em escala e abordagem, refletindo a complexidade e os desafios metodológicos na mensuração desse parâmetro. A análise das redes de colaboração mostra uma forte interação nas instituições, particularmente nas universidades, evidenciando um esforço colaborativo global na investigação da EUA. Apesar do aumento significativo na produção científica sobre EUA, ainda

existem lacunas metodológicas que dificultam a comparação entre estudos. As diferentes formas de medição da EUA, que variam desde abordagens ecofisiológicas baseadas em trocas gasosas até análises isotópicas e modelos de balanço hídrico, geram inconsistências nos resultados e desafios na padronização dos métodos. Além disso, a investigação da EUA é crucial para otimizar a produtividade florestal e mitigar os impactos das mudanças climáticas, especialmente em plantações de *Eucalyptus*, que desempenham um papel estratégico no setor florestal brasileiro.

O entendimento das interações entre genética, clima e manejo pode subsidiar a seleção de genótipos mais eficientes no uso da água e o desenvolvimento de práticas silviculturais sustentáveis. Dessa forma, há a necessidade de ampliar estudos experimentais e integrar diferentes metodologias para aprimorar a estimativa da EUA, promovendo avanços na gestão hídrica das florestas plantadas. Este estudo fornece uma visão abrangente do estado atual da pesquisa sobre eficiência do uso da água nas florestas, apontando tendências, lacunas e direções futuras para pesquisas nessa área e adaptação às mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

ALI, Khozema Ahmed; AHMAD, Mardiana Idayu; YUSUP, Yusri. Issues, impacts, and mitigations of carbon dioxide emissions in the building sector. Sustainability, v. 12, n. 18, 1 set. 2020.

ALMEIDA, Maria Naruna Felix de *et al*. Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 458, p. 1-10, fev. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117743.

ARIA, Massimo; CUCCURULLO, Corrado. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. Journal of Informetrics, v. 11, n. 4, p. 959–975, 1 nov. 2017.

ASENSIO, Verónica et al. Potassium fertilization increases hydraulic redistribution and water use efficiency for stemwood production in *Eucalyptus grandis* plantations. Environmental and Experimental Botany, v. 176, 1 ago. 2020.

BARTHOLOMÉ, Jérôme et al. Genetic architecture of carbon isotope composition and growth in *Eucalyptus* across multiple environments. New Phytologist, v. 206, n. 4, p. 1437–1449, 1 jun. 2015.

BATTIE-LACLAU, Patricia et al. Potassium fertilization increases water-use efficiency for stem biomass production without affecting intrinsic water-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. Forest Ecology and Management, v. 364, p. 77–89, 15 mar. 2016.

BENYON, Richard G et al. Species differences in transpiration on a saline discharge site. Agricultural Water Management, v. 50, p. 65–81, 2001.

BOUVET, Jean Marc et al. Selecting for water use efficiency, wood chemical traits and biomass with genomic selection in a *Eucalyptus* breeding program. Forest Ecology and Management, v. 465, 1 jun. 2020.

BRENDEL, Oliver. The relationship between plant growth and water consumption: a history from the classical four elements to modern stable isotopes. Annals of Forest Science, v. 78, p. 1–16, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13595-021-01063-2>.

BRIGGS, J; SHANTZ, H L. Review: The Water Requirement of Plants Reviewed Work(s): The Water Requirement of Plants. I. Investigations in the Great Plains in 1910 and 1911. II. A Review of the Literature by L. Source: The Plant World. [S.l: s.n.], 1914.

CALDATO, Silvana Lucia; SCHUMACHER, Mauro Valdir. The water use by forest plantations - A review. Ciência Florestal, v. 23, n. 3, p. 507–516, 2013.

CANO, F. Javier; LÓPEZ, Rosana; WARREN, Charles R. 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 and Environment, v. 37, n. 11, p. 2470–2490, 1 nov. 2014.

CHEN, Shiyou et al. Trends in Research on Forest Ecosystem Services in the Most Recent 20 Years: A Bibliometric Analysis. Forests, v. 13, n. 7, 1 jul. 2022.

CHEN, Wei et al. A bibliometric analysis of ecosystem services evaluation from 1997 to 2016. Environmental Science and Pollution Research. [S.l.]: Springer., 1 jul. 2020

CHOAT, Brendan et al. Triggers of tree mortality under drought. Nature. [S.l.]: Nature Publishing Group., 28 jun. 2018

CONDON, Laura E.; ATCHLEY, Adam L.; MAXWELL, Reed M. Evapotranspiration depletes groundwater under warming over the contiguous United States. Nature Communications, v. 11, n. 1, 1 dez. 2020.

COSTA, Layssa da Silva; VURALHAN-ECKERT, Jasmin; FROMM, Jörg. Effect of Elevated CO2 and Drought on Biomass, Gas Exchange and Wood Structure of *Eucalyptus grandis*. Plants, v. 12, n. 1, 1 jan. 2023.

CREED, Irena F. et al. Managing Forests for Both Downstream and Downwind Water. Frontiers in Forests and Global Change, v. 2, 18 out. 2019.

DOLEY, David. Evolution of plant water relations research in Australia. Functional Plant Biology, v. 31, n. 5, p. 405–414, 2004.

DRAKE, Paul L. et al. Water use and water-use efficiency of coppice and seedling *Eucalyptus globulus* Labill.: A comparison of stand-scale water balance components. Plant and Soil, v. 350, n. 1–2, p. 221–235, jan. 2012.

DYE, Peter. A review of changing perspectives on *Eucalyptus* water-use in South Africa. Forest Ecology and Management, v. 301, p. 51–57, 1 ago. 2013.

EAMUS, Derek et al. Carbon and water fluxes in an arid-zone acacia savanna woodland: An analyses of seasonal patterns and responses to rainfall events. Agricultural and Forest Meteorology, v. 182–183, p. 225–238, 15 dez. 2013.

ELLISON, David et al. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. Global Environmental Change, v. 43, p. 51–61, 1 mar. 2017.

FARQUHAR, G. D; EHLERINGER, J. R; HUBICK, K.T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Bioi, v. 40, p. 503–540, 1989.

GONÇALVES, Anny Francielly Ataide et al. Use of the process-based models in forest research: A bibliometric review. Cerne. [S.l.]: Federal University of Lavras., 2021

GRUBB, Peter J.; PIPER, Frida I.; BELLINGHAM, Peter J. Problems with bioclimatic definitions of vegetation types. New Zealand Journal of Botany, v. 55, n. 3, p. 373–377, 3 jul. 2017. Acesso em: 19 nov. 2024.

GU, Daxing et al. Coordination between liquid and gas phase conductance enables survival during water stress in an isohydrodynamic *Eucalyptus* cultivar. Agricultural and Forest Meteorology, v. 311, 15 dez. 2021.

HAKAMADA, Rodrigo Eiji et al. Influence of stand density on growth and water use efficiency in *Eucalyptus* clones. Forest Ecology and Management, v. 466, 15 jun. 2020.

HALDER, Nirmol Kumar et al. Intra-specific patterns of $\delta^{13}C$, growth and wood density variation at sites of contrasting precipitation with implications for modelling carbon sequestration of tropical tree species. Agroforestry Systems, v. 95, n. 8, p. 1429–1443, 1 dez. 2021.

HAMMOND, William M. et al. Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. Nature Communications, v. 13, n. 1, 1 dez. 2022.

HAN, Tuo et al. Contrasting response of water use efficiency to soil moisture availability: From leaf to ecosystem in an arid oasis. Ecological Indicators, v. 147, 1 mar. 2023.

HASHIMOTO, Koji. Global Temperature and Atmospheric Carbon Dioxide Concentration. [S.l.]: Springer, Singapore, 2019. p. 5–17. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-8584-1_3>. Acesso em: 22 ago. 2024.

HATFIELD, Jerry L.; DOLD, Christian. Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. Frontiers in Plant Science. [S.l.]: Frontiers Media S.A., 19 fev. 2019

HUA, Lei et al. Relationships between diurnal and seasonal variation of photosynthetic characteristics of *Eucalyptus* plantation and environmental factors under dry-season irrigation with fertilization. Agricultural Water Management, v. 248, 1 abr. 2021.

HUANG, Ling et al. A global examination of the response of ecosystem water-use efficiency to drought based on MODIS data. Science of the Total Environment, v. 601–602, p. 1097–1107, 1 dez. 2017.

HUBBARD, Robert M. et al. Contrasting water use of two *Eucalyptus* clones across a precipitation and temperature gradient in Brazil. Forest Ecology and Management, v. 475, 1 nov. 2020.

HUBBARD, Robert M. et al. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing *Eucalyptus* plantations. Forest Ecology and Management, v. 259, n. 9, p. 1714–1721, 15 abr. 2010.

JANKOVSKÝ, Martin et al. Innovations in forest bioeconomy: A bibliometric analysis. Forests. [S.l.]: MDPI., 1 out. 2021

JIANG, Mingkai et al. Drought by CO_2 interactions in trees: a test of the water savings mechanism. New Phytologist, v. 230, n. 4, p. 1421–1434, 1 maio 2021.

KUMAR, Abhishek; NAGAR, Shilpi; ANAND, Shalini. Climate change and existential threats. Global Climate Change, p. 1–31, 1 jan. 2021. Acesso em: 18 ago. 2024.

KUNERT, Norbert et al. Tree diversity enhances tree transpiration in a Panamanian forest plantation. Journal of Applied Ecology, v. 49, n. 1, p. 135–144, fev. 2012.

LOCKHART, Erin et al. Stress-induced changes in carbon allocation among metabolite pools influence isotope-based predictions of water use efficiency in *Phaseolus vulgaris*. Functional Plant Biology, v. 43, n. 12, p. 1149–1158, 2016.

LOVENSTEIN, H M; BERLINER, P R; VAN KEULEN, H. Runoff agroforestry in arid lands. Forest Ecology and Management, v. 45, p. 59–70, 1991.

MITCHELL, C P. Ecophysiology of short rotation forest crops. Biomass and Bioenergy, v. 2, p. 25–31, 1992.

NICCOLI, Francesco et al. Tree species composition in mixed plantations influences plant growth, intrinsic water use efficiency and soil carbon stock. Forests, v. 12, n. 9, 1 set. 2021.

NÓIA JÚNIOR, Rogério de Souza et al. Ecophysiological acclimatization to cyclic water stress in Eucalyptus. Journal of Forestry Research, v. 31, n. 3, p. 797–806, 1 jun. 2020.

NUNES, Flancer Novais et al. Carbon isotope discrimination and differential drought tolerance in eucalypt clones. Scientia Forestalis/Forest Sciences, v. 44, n. 112, p. 895–903, 2016.

PENG, Chunju et al. Growing in Mixed Stands Increased Leaf Photosynthesis and Physiological Stress Resistance in Moso Bamboo and Mature Chinese Fir Plantations. Frontiers in Plant Science, v. 12, 20 maio 2021.

PETRÍK, Peter et al. Leaf physiological and morphological constraints of water-use efficiency in C3 plants. AoB PLANTS. [S.l.]: Oxford University Press., 1 jul. 2023

PETRIK, Peter et al. Seasonality of PSII thermostability and water use efficiency of in situ mountainous Norway spruce (Picea abies). Journal of Forestry Research, v. 34, n. 1, p. 197–208, 1 fev. 2023.

PITA-BARBOSA, Alice; HODECKER, Bárbara Elias Reis; DE BARROS, Nairam Félix. Boron as mitigator of drought damage in *Eucalyptus*: A genotype-dependent mechanism? Scientia Forestalis/Forest Sciences, v. 44, n. 112, p. 851–861, 2016.

POYATOS, Rafael et al. Global transpiration data from sap flow measurements: The SAPFLUXNET database. Earth System Science Data, v. 13, n. 6, p. 2607–2649, 14 jun. 2021.

READING, Lucy et al. Assessing the Relative Importance of Climatic and Hydrological Factors in Controlling Sap Flow Rates for a Riparian Mixed Stand. Agronomy, v. 13, n. 1, 1 jan. 2023.

ROBINNE, François-Nicolas et al. Scientists' warning on extreme wildfire risks to water supply. **Hydrological Processes**, [S.L.], v. 35, n. 5, p. 1-11, maio 2021. Wiley. http://dx.doi.org/10.1002/hyp.14086.

SANUDIN et al. Agroforestry farmers' resilience in social forestry and private Forest programs during the COVID-19 pandemic in Indonesia. Forest Science and Technology, v. 19, n. 3, p. 197–209, 2023.

SHIN, Seongmin et al. The structure and pattern of global partnerships in the REDD+ mechanism. Forest Policy and Economics, v. 135, 1 fev. 2022.

SINACORE, Katherine et al. Differential and dynamic water regulation responses to El Niño for monospecific and mixed species planted forests. Ecohydrology, v. 13, n. 7, 1 out. 2020.

TURNER, Andrea; WHITE, Stuart; CHONG, Joanne; DICKINSON, Mary Ann; COOLEY, Heather; DONNELLY, Kristina. **Managing drought: Learning from Australia**. [S.L]: Uts, 2016. 47 p. Preparado por Alliance for Water Efficiency, Institute for Sustainable Futures, University of Technology Sydney e Pacific Institute for the Metropolitan Water District of Southern California, San Francisco Public Utilities Commission e Water Research Foundation.

VAN DIJK, Albert I.J.M. et al. The Millennium Drought in southeast Australia (2001-2009): Natural and human causes and implications for water resources, ecosystems, economy, and society. Water Resources Research, v. 49, n. 2, p. 1040–1057, 1 fev. 2013.

VELASCO-MUÑOZ, Juan F. et al. Advances in water use efficiency in agriculture: A bibliometric analysis. Water. [S.l.]: MDPI AG., 25 mar. 2018

VERMA, Pragati; GHOSH, P. K. The economics of forest carbon sequestration: a bibliometric analysis. Environment, Development and Sustainability. [S.l.]: Springer Science and Business Media B.V., 1 fev. 2024.

WANG, Guohui et al. Effect of simulated precipitation regimes on sap flow and water use efficiency for xerophytic Caragana korshinskii. Ecological Indicators, v. 143, 1 out. 2022.

WANG, Jieyong; LIU, Zhigao. A bibliometric analysis on rural studies in human geography and related disciplines. Scientometrics, v. 101, n. 1, p. 39–59, 1 out. 2014.

WHITE, Don A. et al. Growth, water use, and water use efficiency of *Eucalyptus globulus* and Pinus radiata plantations compared with natural stands of Roble-Hualo Forest in the coastal mountains of central Chile. Forest Ecology and Management, v. 501, 1 dez. 2021.

XIE, Jiaqi et al. A Bibliometric Analysis of Forest Gap Research during 1980–2021. Sustainability (Switzerland), v. 15, n. 3, 1 fev. 2023.

ZHANG, Zhiqiang et al. Forest water-use efficiency: Effects of climate change and management on the coupling of carbon and water processes. Forest Ecology and Management. [S.l.]: Elsevier B.V., 15 abr. 2023.

ARTIGO 2 - ISÓTOPOS DE CARBONO COMO INDICADOR DE EFICIÊNCIA NO USO DA ÁGUA EM *EUCALYPTUS*

Artigo redigido conforme a norma NBR 6022 (ABNT, 2018) para publicação em periódico científico. Esse formato segue o manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.

RESUMO

Projeções climáticas futuras indicam mudanças significativas nos padrões globais de precipitação, o que pode afetar os ciclos de carbono e água em ecossistemas terrestres. Nesse contexto, a eficiência do uso da água (EUA), que relaciona a quantidade de carbono fixada por unidade de água consumida, é essencial para entender o equilíbrio entre assimilação de carbono e perda de água. A análise da discriminação isotópica de carbono ($\delta^{13}C$) em tecidos vegetais é uma abordagem útil para estudar a EUA e a resposta funcional das florestas às mudanças climáticas. Assim, nosso estudo teve como objetivo investigar a EUA de clones de *Eucalyptus* com diferentes características fisiológicas - crescimento rápido (*Eucalyptus urophylla* - A1) e tolerância à seca (*Eucalyptus grandis* × *E. camaldulensis* - C3) - em locais secos, mésicos e úmidos no Brasil usando o método da $\delta^{13}C$. Descobrimos que a EUA aumenta com a disponibilidade de água, já que o clone A1 é mais eficiente no uso de água em todos os locais e aproximadamente 70% mais produtivo que o C3. O clone C3, um clone tolerante à seca, apresentou menor EUA e um consumo de água 8% maior que o clone de crescimento rápido. Nossos resultados apontaram uma correlação negativa entre $\delta^{13}C$ e EUA, indicando que menores valores de $\delta^{13}C$ estão relacionados à maior eficiência no uso da água. No geral, nossos resultados indicaram que a discriminação de isótopos de carbono pode ser uma ferramenta eficaz para avaliar a EUA e definir estratégias de alocação clonal para genótipos de *Eucalyptus*, principalmente em regiões com baixa disponibilidade hídrica. Finalmente, nosso estudo representa uma contribuição pioneira para a compreensão dos mecanismos de adaptação das plantas às mudanças climáticas, destacando a importância dos métodos isotópicos na pesquisa florestal.

Palavras-chave: Razão isotópica do carbono; Uso da água; Transpiração; Mudanças climáticas.

CARBON ISOTOPES AS AN INDICATOR OF WATER USE EFFICIENCY IN *EUCALYPTUS*

ABSTRACT

Future climate predictions indicate significant changes in global precipitation patterns, which may affect carbon and water cycles in terrestrial ecosystems. In this context, water use efficiency (WUE), which relates to the amount of carbon fixed per unit of water consumed, is essential to understand the balance between carbon assimilation and water loss. Carbon isotope discrimination ($\delta^{13}C$) analysis in plant tissues is a useful approach to studying WUE and the functional response of forests to climate change. Thus, our study aimed to investigate the WUE of *Eucalyptus* clones with different physiological traits - fast-growing (*Eucalyptus urophylla* - A1) and drought-tolerant (*Eucalyptus grandis* × *E. camaldulensis* - C3) - in dry, mesic and humid locations in Brazil using the $\delta^{13}C$ method. We found that EUA increases with water availability, as clone A1 is more efficient in water use at all sites and approximately 70% more productive than C3. Clone C3, a drought-tolerant clone, presented lower WUE and an 8% higher water consumption than the fast-growing clone. Our results showed a negative correlation between $\delta^{13}C$ and WUE, indicating that lower $\delta^{13}C$ values are related to higher water use efficiency. Overall, our results indicated that carbon isotope discrimination can be an effective tool to assess WUE and define clonal allocation strategies for *Eucalyptus* genotypes, especially in regions with low water availability. Finally, our study represents a pioneering contribution to the understanding of plant adaptation mechanisms to climate change, highlighting the importance of isotopic methods in forestry research.

Keywords: Carbon isotopic ratio; Water use; Transpiration; Climate Change.

1. Introdução

As projeções climáticas futuras indicam que os regimes globais de precipitação podem mudar drasticamente nos próximos anos, com uma redução nas chuvas para os trópicos, o que terá um grande impacto nos ciclos de carbono e água em ecossistemas terrestres (IPCC, 2023). Como um elo crítico entre as trocas de água e carbono, a eficiência do uso da água (EUA), que é a razão entre a quantidade de carbono obtida por unidade de água consumida, é uma variável-chave para avaliar a dinâmica do carbono e da água (HAN *et al.*, 2023; HATFIELD; DOLD, 2019; SALAZAR-MORENO; ROJANO-AGUILAR; LÓPEZ-CRUZ, 2014). Em déficits hídricos, algumas espécies de plantas possuem a habilidade de abrir parcialmente seus estômatos, contribuindo para a manutenção das concentrações internas de CO_2 e fotossíntese, sem perdas excessivas de água pelo processo de transpiração (CONDON *et al.*, 2004). Esse mecanismo proporciona maior EUA para a planta, uma vez que ela continuará com seus processos fisiológicos mesmo sob restrições hídricas (NUNES *et al.*, 2016).

A EUA pode ser amplamente utilizada para avaliar as compensações entre carbono e água e investigar as respostas funcionais das florestas às mudanças climáticas (WANG, GE *et al.*, 2020). Melhorar a EUA é crucial para maximizar o armazenamento de carbono florestal enquanto conserva os recursos hídricos (ZHANG, ZHIQIANG *et al.*, 2023). Além disso, é importante considerar que os métodos de medição da EUA podem ser variáveis, complexos e demorados (HAN *et al.*, 2023).

Uma maneira de entender a EUA é por meio de isótopos estáveis de carbono (^{12}C e ^{13}C) em tecidos vegetais com base na espectrometria de massa em que o ^{13}C é diferenciado do ^{12}C. (ZHENG *et al.*, 2020). Várias espécies florestais de interesse foram avaliadas e demonstraram uma relação eficiente entre a EUA e a diferenciação do isótopo ^{13}C ($\delta^{13}C$) (ARES; FOWNES, 2001; BAI *et al.*, 2013; FLANAGAN *et al.*, 2019; MA *et al.*, 2010; VAISHNAV *et al.*, 2021).

A análise de $\delta^{13}C$ avalia a fisiologia interna das plantas e as influências ambientais nas trocas gasosas durante o processo de fixação de carbono. Essa composição isotópica da biomassa é afetada principalmente pela disponibilidade de água e regulação estomática (CHAVES; MAROCO; PEREIRA, 2003). Uma quantidade maior de ^{13}C é fixada em condições de escassez hídrica, pois as plantas reduzem a abertura estomática e a transpiração, produzindo menos biomassa (DIJKSTRA *et al.*, 2016).

Essa análise compara a razão $^{13}C/^{12}C$ em amostras com um padrão internacional, expressando os resultados como uma diferença em unidades δ (‰) (ALVES *et al.*, 2006). A

$\delta^{13}C$ é frequentemente negativa em plantas devido à sua menor razão $^{13}C/^{12}C$ em relação ao padrão, conhecido como Pee Dee Belemnite (PDB) (LI, 2000; SMITH *et al.*, 2016).

A diferença significativa em $\delta^{13}C$ entre clones sensíveis e tolerantes à seca pode indicar que $\delta^{13}C$ pode ser usado como uma ferramenta para selecionar genótipos mais adequados para locais com baixa disponibilidade de água. Além disso, o método é relativamente fácil e econômico para avaliar EUA, pois requer apenas a estimativa da razão isotópica de carbono por meio da análise de espectrometria de massa de amostras como folhas, biomassa acima do solo ou frutos (MUTANDA *et al.*, 2024). Vários autores investigaram EUA em plantas, explorando as mudanças de EUA em função dos recursos disponíveis e entre diferentes genótipos (HALDER *et al.*, 2021; KRUSE *et al.*, 2019; NICCOLI *et al.*, 2021; NOLAN *et al.*, 2018; SMITH *et al.*, 2016). Fernandez-Tschieder, Marshall e Binkley, 2024, ao avaliarem a $\delta^{13}C$ no floema de árvores de *Eucalyptus* sp., os autores observaram que árvores maiores direcionam mais carbono para a produção de madeira e menos para fluxos subterrâneos, resultando em maior eficiência no uso de água para produção de madeira. Hubbard et al., (2020) observaram que o clone tolerante à seca (*Eucalyptus grandis* × *E. camaldulensis*) apresentou menor EUA em comparação a um clone produtivo (*E. urophylla*) em locais secos e mésicos. Entretanto, em locais úmidos, os autores não observaram diferenças significativas na EUA entre os clones.

Portanto, é crucial entender como o EUA varia entre espécies e genótipos, especialmente em resposta a mudanças ambientais (SANTOS *et al.*, 2021). Nos cenários de mudanças climáticas, torna-se ainda mais crítico entender como as plantações de *Eucalyptus* se adaptarão e crescerão para enfrentar temperaturas mais altas e padrões de precipitação imprevisíveis (HAKAMADA *et al.*, 2020; PITA *et al.*, 2001).

Embora isótopos estáveis como ^{13}C forneçam informações valiosas sobre EUA, seu uso correlacionado de forma direta com a EUA ainda é pouco explorado. A maioria das pesquisas, que utilizaram isótopos de ^{13}C como método para estimar EUA, se concentra na Austrália, indicando uma lacuna de informações para outras regiões do mundo (Figura 1). Portanto, explorar metodologias com isótopos estáveis pode ser benéfico para programas de melhoramento genético e planejamento de manejo florestal, pois oferece menores tempos de aquisição de dados para EUA e menor complexidade na obtenção de resultados, já que a amanostragem de uma bagueta do tronco das plantas seria o suficiente para obter informações sobre a $\delta^{13}C$ e assim poder ranquear quais árvores seriam teriam uma maior EUA em diferentes sítios.

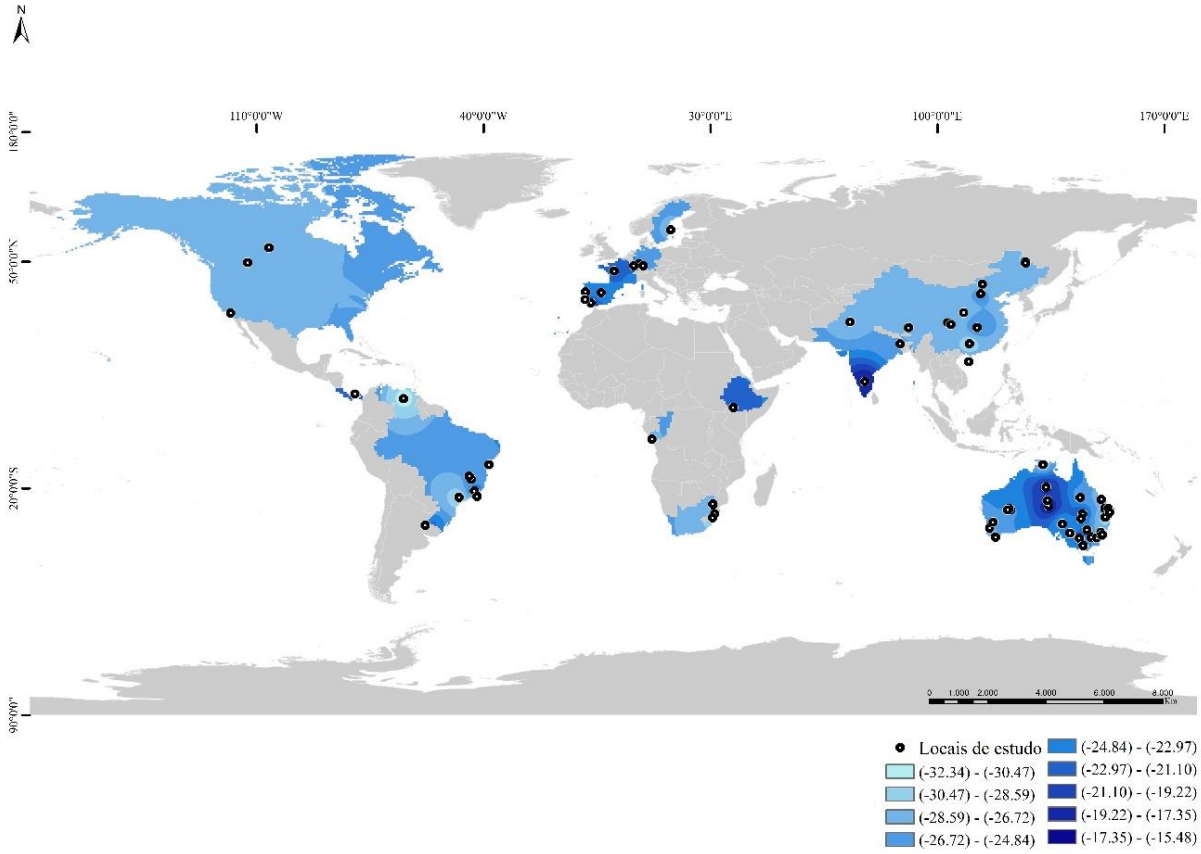

Figura 1. Distribuição de estudos usando a metodologia de discriminação de isótopos de carbono ($\delta^{13}C$) em *Eucalyptus* spp.

O objetivo deste estudo é entender o uso da água e a eficiência do uso da água de clones de *Eucalyptus* sp. com diferentes características de crescimento e tolerância à seca em diferentes gradientes climáticos no Brasil. Nesse contexto, o estudo se concentrou em avaliar as seguintes hipóteses: (1) A discriminação de isótopos de carbono ($\delta^{13}C$) pode ser utilizada como um indicador confiável para analisar variações na eficiência do uso da água, sendo validada por meio da comparação com dados obtidos por medições diretas de transpiração via Sapflow; (2) Haverá diferenças estatísticas na eficiência do uso da água entre os clones estudados, possibilitando a identificação e o ranqueamento dos clones mais eficientes no uso da água; (3) A eficiência do uso da água dos clones estudados variará de forma significativa entre diferentes idades, indicando uma possível influência do estágio de desenvolvimento na resposta hídrica das plantas;

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo

Nosso estudo abrange três locais edafoclimáticos contrastantes do programa de pesquisa cooperativa TECHS (Tolerância de *Eucalyptus* Clonais ao Estresse Hídrico, Térmico e Biótico). A rede experimental TECHS inclui 36 locais distribuídos em um gradiente de 3.500 km, estendendo-se da Região Amazônica ao Uruguai (BINKLEY *et al.*, 2017). O delineamento experimental do TECHS inclui quatro clones considerados "plásticos" que foram plantados em todos os 36 locais, dos trópicos aos subtrópicos. Assim, utilizamos dois locais sob clima subtropical (úmido: local 22; mésico: local 20) e um tropical (seco: local 30) (Figura 2).

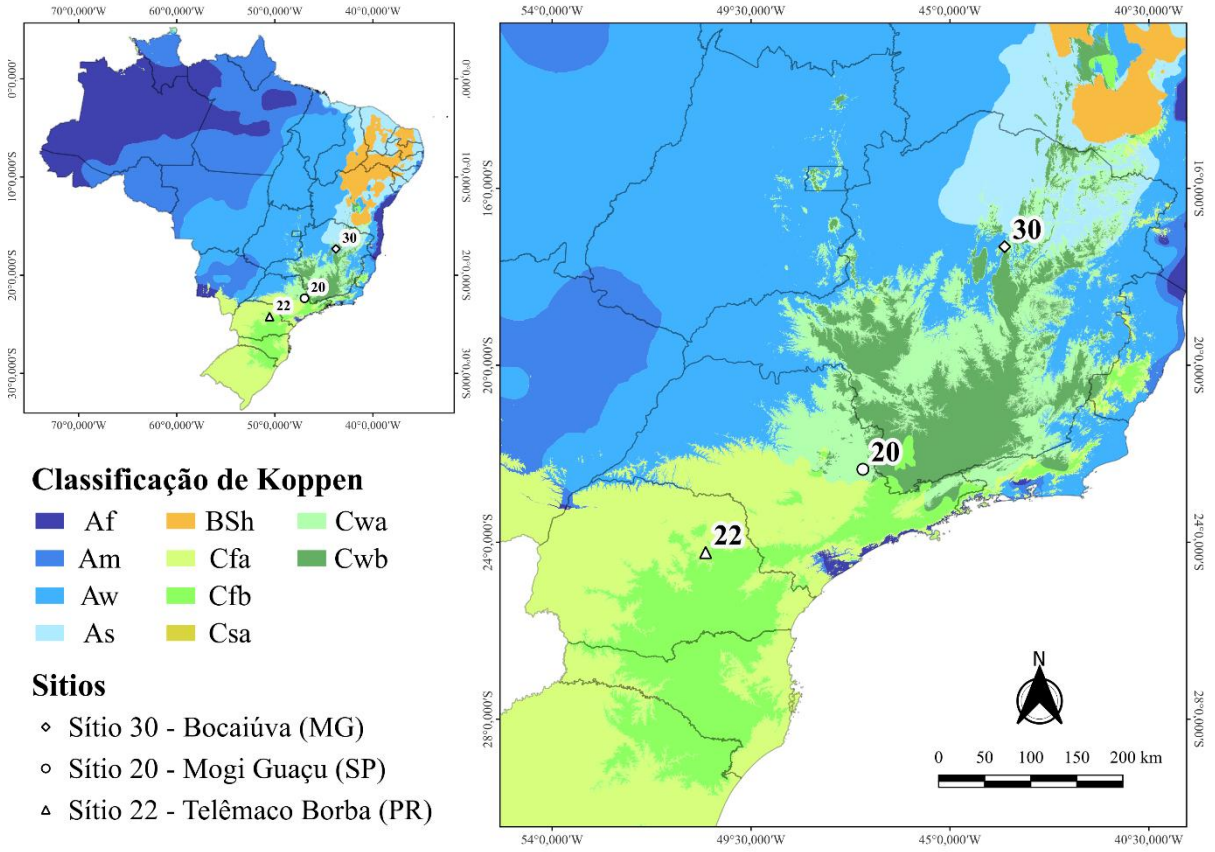

Figura 2. Mapa com a localização dos sítios do TECHS, sendo identificados os sítios analisados neste trabalho.

O local mais seco e quente (30) está localizado na cidade de Bocaiúva, estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil, uma região tropical com precipitação anual de 507 mm e temperatura média anual de 23,1 °C (BINKLEY *et al.*, 2017). O sítio mésico está situado na cidade de Mogi-Guaçu, estado de São Paulo, também sudeste do Brasil. O local está localizado em uma região de transição entre clima tropical e subtropical, apresentando assim uma precipitação anual de 1.224 mm e uma temperatura média anual de 22,4 °C (BINKLEY *et al.*, 2017). O sítio úmido está localizado na cidade de Telêmaco Borba, estado do Paraná, sul do Brasil. A região,

caracterizada por um clima subtropical, apresenta uma precipitação anual de 1.554 mm e uma temperatura média anual de 19,8 °C (BINKLEY *et al.*, 2017; HUBBARD *et al.*, 2020).

Nossos locais experimentais abrangem dois clones diferentes, *Eucalyptus urophylla* (A1) e *Eucalyptus grandis* x *E. camaldulensis* (C3). O clone A1, apesar de ter baixa tolerância à seca, é amplamente plantado no Brasil e conhecido por seu rápido crescimento e produtividade. O clone C3, conhecido por ser tolerante à seca, apresenta crescimento mais lento e menor produtividade (GONÇALVES *et al.*, 2017). Os clones foram plantados no espaçamento de 3 x 3 metros, em parcelas de 0,2 ha para todos os três locais no ano de 2011 (BINKLEY *et al.*, 2017; BINKLEY et al., 2020).

2.2 Coleta de dados

2.2.1 Biomassa

A biomassa dos clones (kg de biomassa do caule por ano) foi estimada com base nas equações de Binkley et al., (2017). A partir dessas informações, verificamos a idade técnica de corte do plantio florestal para ambos os clones. Para isso, calculamos o incremento anual corrente (ICA) e o incremento médio anual (IMA), que foram correlacionados entre si. Além disso, o ICA de cada local experimental foi correlacionado com a precipitação anual local para as idades de dois, três e quatro anos. As idades selecionadas excluem interferências do crescimento inicial do clone no primeiro ano e da competição por recursos nos anos posteriores.

2.2.2 Discriminação de isótopos ^{13}C ($\delta^{13}C$)

Em cada local experimental, cinco indivíduos de cada clone foram coletados para avaliar a concentração de isótopos de ^{13}C. Coletamos dois discos de madeira, cada um com 5 cm de espessura, de cada árvore: um na base e outro a 75% da altura total da árvore. Para analisar a concentração de ^{13}C em diferentes idades das árvores, extraímos amostras das seções radiais de madeira de cada disco. Do disco da base da árvore, foram retiradas três amostras, enquanto duas amostras foram retiradas do disco a 75% da altura da árvore. As amostras foram coletadas próximo a medulo do disco (A), no ponto médio entre a medula e o centro do disco (B) e próximo à casca (C), resultando em um total de 180 amostras (Figura 3).

As análises de isótopos de carbono foram realizadas no Laboratório de Pesquisa em Solo, Água e Florestas (LISAB), da Faculdade de Ciências Florestais da Universidade de Concepción (Chile). Para este propósito, usamos um espectrômetro de massa de razão isotópica

(20-22 IRMS, SERCON, UK) associado a um módulo de preparação de amostras sólidas Europa EA-GSL (Elemental Analyser, Sercon, UK).

As amostras de madeira foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C até que um peso constante fosse atingido. Posteriormente, as amostras de madeira foram moídas até atingirem uma textura semelhante à serragem para obtenção de um material homogêneo para análises de composição de isótopos de carbono (Figura 3). As amostras moídas foram pesadas e encapsuladas em recipientes adequados para a análise isotópica. A análise de $\delta^{13}C$ foi realizada no modo de análise dupla, combustão a 1000 °C em atmosfera de oxigênio, convertendo o carbono orgânico em CO_2, o gás produzido passa por uma coluna de redução a 600 °C para a eliminação de interferentes, em seguida o CO_2 purificado é separado via cromatografia gasosa (GC) a 65 °C.

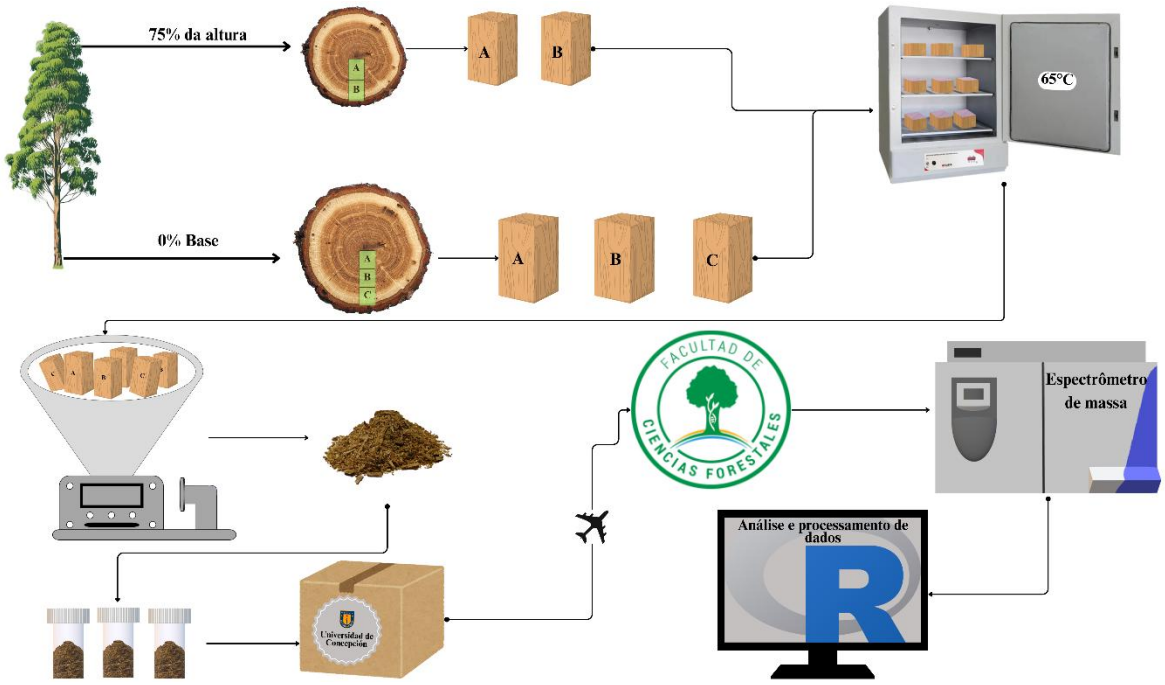

Figura 3. Fluxograma mostrando a amostragem e o processamento de discos de madeira para análise de isótopos de ^{13}C nos três locais experimentais estudados dentro da rede experimental do programa de pesquisa cooperativa TECHS.

Os valores de ^{13}C foram calculados seguindo a equação proposta por Farquhar e Richards (1984) (Equação 1) e expressos em relação ao padrão internacional Pee Dee Belemnite, em partes por mil (‰) (CRAIG, 1957).

$$\Delta = \frac{(\delta^{13}C_{\ C_{atm}} - \delta^{13}C_{madeira})}{\left(\frac{1 + (\delta^{13}C_{madeira})}{1000}\right)} \quad (1)$$

Em que:

Δ = discriminação isotópica;

$\delta^{13}C_{atm}$ = composição isotópica atmosférica - igual a - 8‰;

$\delta^{13}C_{madeira}$ é o resultado da espectrometria de massa.

2.2.3 Eficiência do uso da água (EUA)

Para verificar se a metodologia de $\delta^{13}C$ pode ser utilizada como indicador da EUA, foram utilizados dados de uso e eficiência do uso água de Hubbard et al., (2020) obtidos a partir da metodologia de Sapflow nos mesmos indivicuos aqui avaliados. Esses dados foram coletados em nossos locais e clones estudados na idade de plantio de quatro anos, ao longo de um ano (julho de 2016 a junho de 2017). A eficiência anual do uso da água foi estimada como a razão entre o incremento corrente anual (ICA) e o uso de água (m^3 por ano), com o uso de água medido usando o método de fluxo de seiva para cada clone em cada local.

Por fim, avaliamos a eficiência do uso da água pelos clones em função da biomassa aérea e radicular utilizando os dados de uso de água obtidos por Hubbard et al., (2020). A massa seca acima do solo foi estimada pela colheita de seis árvores para cada combinação de clone e local (n = 24 árvores/clone, total de 114 árvores). A amostragem destrutiva foi realizada em julho de 2014, aos 2,5 anos de idade, e as árvores amostradas foram selecionadas para cobrir a faixa de diâmetro na altura do peito (DAP, 1,3 m acima do nível do solo). As árvores cortadas foram divididas em madeira do caule, casca do caule, galho e folhagem. Para biomassa abaixo do solo, as raízes grossas (>10 cm) de 54 árvores foram totalmente escavadas nos locais 30 (Bocaiúva-MG) e 22 (Telêmaco Borba-PR). Cada componente de cada árvore foi pesado no local, e amostras representativas foram secas a 65 °C até um peso constante para massa seca.

As equações de massa seca para os componentes acima (caule, casca e galho somados) e abaixo do solo (raízes grossas) foram ajustadas usando o modelo linearizado de Schumacher e Hall em R (R Development Core Team, 2017), como segue: $\ln(MS) = \beta0 + \beta1 \times \ln(DAP) + \beta2 \times \ln(A)$, onde MS é a massa seca, DAP é o diâmetro na altura do peito (cm), A é a altura total da árvore (m), e $\beta0$, $\beta1$ e $\beta2$ são coeficientes de regressão. A decisão de usar equações específicas de clone e sítio foi baseada na necessidade de capturar o comportamento potencialmente diferente EUA de cada clone em cada sítio. Com base na similaridade climática, a equação desenvolvida para raízes grossas para o sítio 22 foi usada para o sítio 20 (Mogi-Guaçu-SP). Todas as equações apresentaram valores de $p < 0,01$, e R^2 variou de 0,91 a 0,99. Detalhes metodológicos são descritos em Campoe et al., (2020).

2.3 Análise Estatística

Analisamos a eficiência do uso da água entre clones, locais e idades de plantio usando duas abordagens diferentes dentro de um delineamento inteiramente casualizado (DIC). A primeira análise seguiu um delineamento fatorial 2x3, sendo o primeiro fator os clones de *Eucalyptus* (A1 e C3) e o segundo fator os locais selecionados (seco, úmido e mésico). A segunda análise também foi conduzida utilizando um delineamento fatorial 2x3, onde o primeiro fator representou as alturas das árvores estudadas (0% e 75% da altura total das árvores), e o segundo fator representou as posições de amostragem nos discos analisados (A, B, e C). Não foi atribuído nenhum valor à posição B para discos a 75% da altura total da árvore, pois apenas duas amostras (A e C) puderam ser obtidas desses discos. Ambas as análises foram baseadas em dados de cinco árvores.

Realizamos uma análise de variância (ANOVA) para entender o comportamento da $\delta^{13}C$ em diferentes clones, sítios, idades alturas. Realizamos um teste de Tukey ($p \leq 0,05$) para comparações de médias de múltiplos grupos quando diferenças estatísticas foram observadas (FERREIRA; CAVALCANTI; NOGUEIRA, 2014).

Avaliamos a relação entre EUA, $\delta^{13}C$, variáveis biométricas (diâmetro a altura do peito (DAP), altura, volume) e climáticas (temperatura média, temperatura mínima, temperatura máxima, precipitação, umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor) ajustando três modelos lineares múltiplos: um global e um para cada clone estudado. Para isso, aplicamos o método Stepwise utilizando as funções step e lm do pacote stats no software R (CIULLA; D'AMICO, 2019; R CORE TEAM, 2023). Calculamos o Critério de Informação de Akaike (AIC) para avaliar o desempenho da modelagem, bem como para selecionar o melhor modelo e garantir a convergência final. A contribuição de cada variável independente selecionada no modelo foi verificada através do teste estatístico F. Os indicadores de coeficiente de determinação (R^2) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) também foram calculados para verificar o desempenho e a qualidade dos modelos. Utilizamos o teste Variance Inflation Factor (VIF) para avaliar a multicolinearidade entre as variáveis, removendo aquelas com valores maiores que 10. Posteriormente, testamos a normalidade dos dados residuais usando o teste de Shapiro-Wilk e avaliamos a homogeneidade da variância usando o teste de Breusch-Pagan. Uma transformação logarítmica foi aplicada à variável EUA quando a heterocedasticidade foi detectada.

3. Resultados

Os clones de Eucalyptus avaliados apresentaram variações significativas em seus parâmetros de crescimento e resposta fisiológica às condições ambientais dos diferentes sítios experimentais. A Tabela 1 apresenta os valores médios das principais variáveis analisadas, incluindo diâmetro à altura do peito (DAP), altura total, incremento corrente anual (ICA), discriminação de isótopos de carbono-13 ($\delta^{13}C$), além dos fatores climáticos como temperatura média, temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação. Esses dados permitem compreender as diferenças no desenvolvimento dos clones A1 e C3 em resposta às condições ambientais.

Tabela 1. Informações de cada clone de alta produtividade (A1) e resistente a seca (C3) nos três locais de medição.

Variáveis	**Seco - 30**		**Mésico - 20**		**Úmido - 22**	
Clone	**A1**	**C3**	**A1**	**C3**	**A1**	**C3**
DAP (cm)	14.88	12.13	17.11	13.26	16.97	19.70
Altura (m)	22.36	18.36	26.10	22.16	27.62	27.00
ICA (Mg/ha/ano)	18.22	8.53	31.08	12.87	39.40	44.06
$\delta^{13}C$ (‰)	-26.81	-27.69	-27.26	-28.72	-29.02	-30.21
Tmed (°C)	23.1	23.1	22.4	22.4	19.8	19.8
Tmax (°C)	29.81	29.81	29.62	29.62	23.79	23.79
Tmin (°C)	17.33	17.33	15.76	15.76	15.26	15.26
PPT (mm)	507	507	1224	1224	1554	1554

DAP = diâmetro na altura do peito, ICA = incremento corrente anual, $\delta^{13}C$ = discriminação de isótopos de carbono -13, Tmed = temperatura média, Tmax = temperatura máxima, Tmin = temperatura mínima e PPT = precipitação.

3.1 Caracterização dos clones

Os clones estudados apresentaram variações diferentes de incremento corrente anual (ICA) e o incremento médio anual (IMA) quando submetidos a diferentes regimes de precipitação (Figura 4). Em geral, os valores de ICA e IMA são maiores nos locais com maior disponibilidade hídrica, demonstrando a importância dos recursos hídricos no crescimento das árvores. Os clones apresentaram valores relativamente altos no sítio mésico, enquanto no sítio seco eles registraram os menores valores de ICA e IMA. O clone A1 apresentou um ICA variando de 15,56 a 43,56 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$ e um IMA de 7,18 a 25,22 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$. O clone C3 apresentou um ICA variando de 4,52 a 56,76 $Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$ e um IMA de 4,92 a 29,17 $Mg.ha^{-}$

^{1}.ano^{-1}. No geral, o clone A1 tende a apresentar valores superiores de ICA e IMA em relação ao clone C3 em praticamente todos os sítios, sugerindo uma maior eficiência desse clone na utilização de recursos para incremento da biomassa. Esses resultados demonstram que, em média, o clone A1 foi cerca de 56,92% mais produtivo que o clone C3.

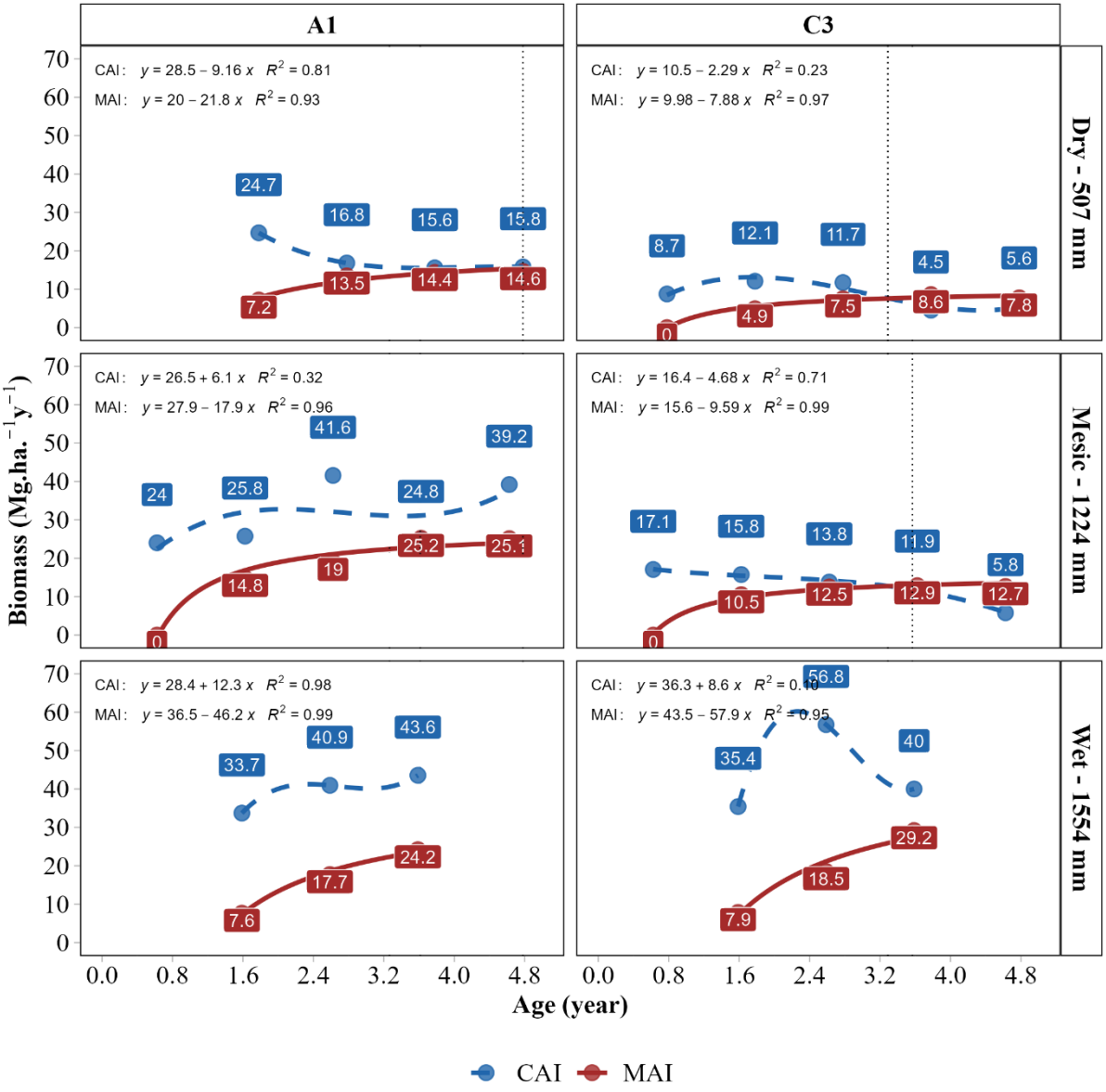

Figura 4. Incremento corrente anual (ICA) e incremento médio anual (IMA) para os clones A1 e C3 nos três locais experimentais estudados dentro da rede experimental do programa de pesquisa cooperativa TECHS.

O ICA para os clones A1 e C3, em geral, apresentou tendência crescente em resposta aos níveis de precipitação dos locais experimentais. Entretanto, aos quatro anos de idade, o clone A1 apresentou diminuição no incremento entre os sítios mésico e úmido (Figura 5). No

geral, a precipitação no local úmido variou de 1446,78 a 1832,53 mm.ano^{-1}, 871,03 a 1305,13 mm.ano^{-1} no local mésico e de 521,9 a 951,47 mm.ano^{-1} no local seco. O clone A1 apresentou um ICA variando de 27,54 a 48,83 Mg.ha.ano^{-1} no sítio úmido, 25,80 a 38,87 Mg.ha.ano^{-1} no sítio mésico e 13,53 a 24,46 Mg.ha.ano^{-1} no sítio seco. O ICA para o clone C3 variou de 36,85 a 47,56 Mg.ha.ano^{-1} no local úmido, 5,83 a 20,22 Mg.ha.ano^{-1} no local mésico e 5,54 a 13,85 Mg.ha.ano^{-1} local seco. Essas descobertas indicam que a precipitação influenciou o crescimento desses clones nos locais estudados.

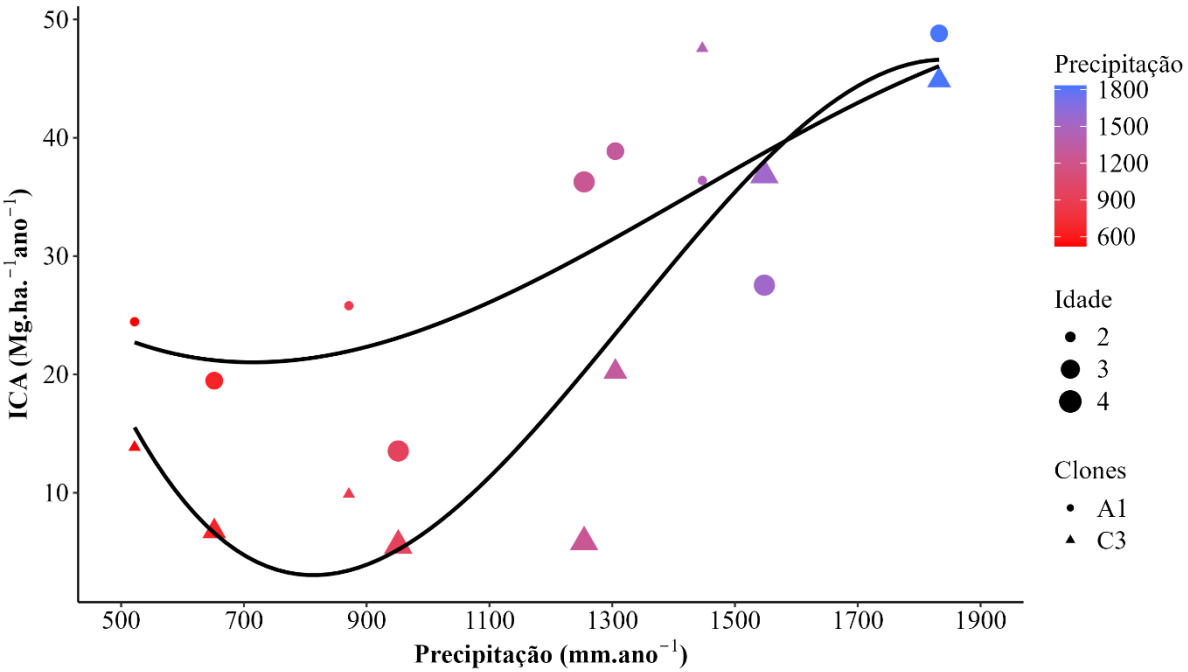

Figura 5. Relação entre o incremento corrente anual (ICA) e a precipitação para os clones A1 e C3 amostrados nas idades de dois, três e quatro anos nos três locais experimentais estudados dentro da rede experimental do programa de pesquisa cooperativa TECHS.

3.2 Eficiência do uso da água da parte aérea e raiz

Em geral, a eficiência do uso da água (EUA) de ambos os clones melhorou com o aumento da disponibilidade de água nos locais experimentais. O clone A1 apresentou melhor EUA que o clone C3, particularmente no local úmido, onde atingiu um valor de EUA de 4,90 kg m^{-3}, o dobro do valor observado no local seco (Figura 6A). No local seco, o clone C3 alocou uma proporção maior de sua EUA para produção de raízes (27%) em comparação ao clone A1 (12%), enquanto a tendência oposta foi observada no local úmido (Figura 6B).

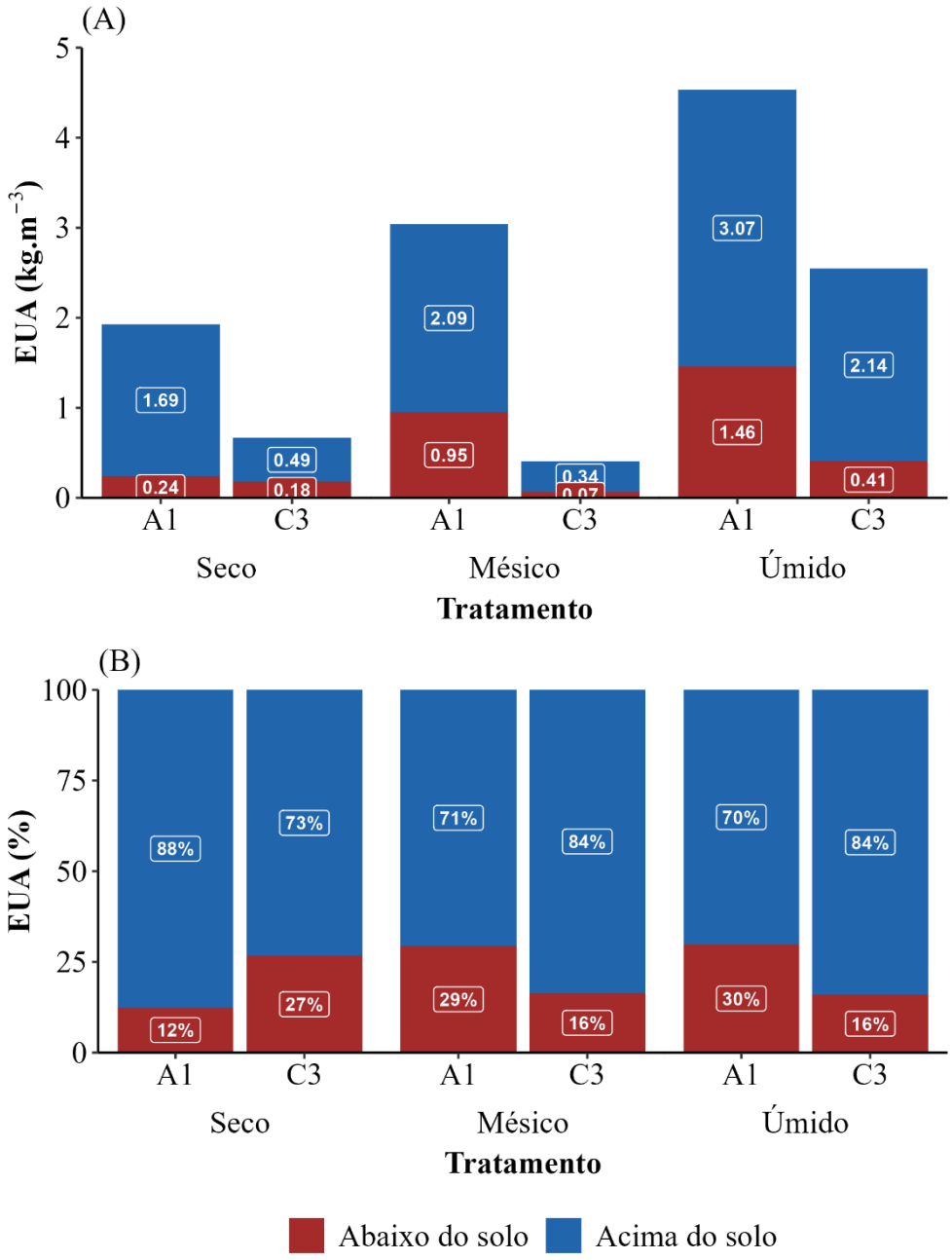

Figura 6. Eficiência do uso da água (EUA) para cada clone nos locais experimentais secos, úmidos e mésicos estudados dentro da rede experimental do programa de pesquisa cooperativa TECHS. As barras azuis indicam a EUA acima do solo (kg.m^{-3}), enquanto as barras vermelhas representam a EUA abaixo do solo (kg m^{-3}). Na figura a EUA está representada em kg.m^{-3}, já na B a EUA está representada em porcentagem (%).

3.3 Discriminação de ^{13}C

Encontramos uma interação estatisticamente significativa entre os clones e os locais ($p < 0,5$) (Figura 7). O clone A1 exibiu consistentemente menor discriminação de isótopos de

carbono ($\delta^{13}C$) em todos os três locais em comparação ao clone C3. Os valores de $\delta^{13}C$ para A1 variaram de -29,35‰ a -26,63‰, enquanto para C3, o intervalo foi de -30,39‰ a -27,33‰. O local seco apresentou a menor $\delta^{13}C$ seguido pelos locais mésico e úmido para ambos os clones. O $\delta^{13}C$ no local seco variou de -27,91‰ a -26,63‰, no local mésico de -28,87‰ a -27,03‰ e no local úmido de -30,39‰ a -28,69‰.

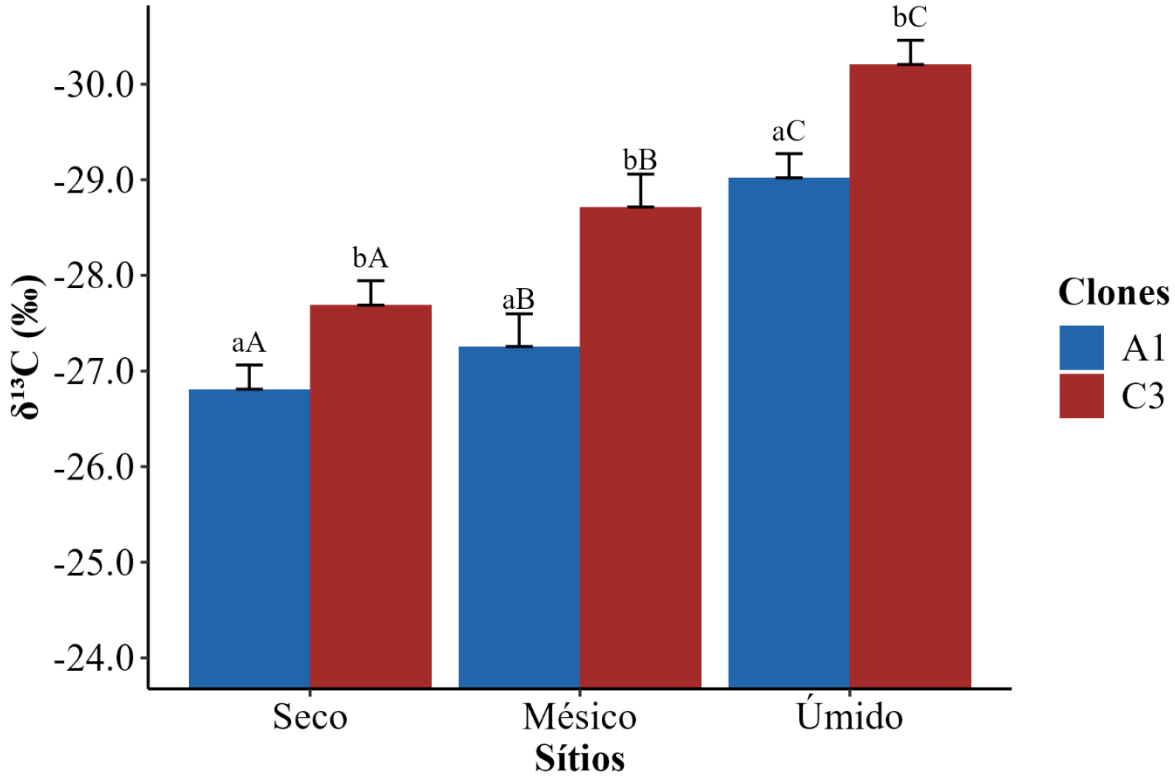

Figura 7. Discriminação de $\delta^{13}C$ para os clones A1 e C3 nos três locais experimentais estudados (seco, mésico e úmido) dentro das redes experimentais do programa de pesquisa cooperativa TECHS. Letras maiúsculas diferentes representam diferenças significativas entre sites, e letras minúsculas diferentes representam diferenças significativas dentro dos sites.

Não encontramos diferença estatisticamente significativa ($p \leq 0,05$) entre as posições dos discos amostradas (juvenil, intermediário e adulto) para o clone A1. O clone C3 apresentou diferença estatisticamente significativa ($p \leq 0,05$) na posição intermediária do disco, mas não entre a juvenil e adulta. Foi observada diferença estatisticamente significativa também entre as alturas amostradas para o clone A1 (0% e 75% da altura total da árvore), já para o clone C3 não houve diferença estatística entre as diferentes alturas amostradas (Figura 8). Este resultado indica que a amostragem para análise de $\delta^{13}C$ pode ser realizada em qualquer posição do disco, independentemente da idade de plantio, para clones de *Eucalyptus*. Isso ocorre porque as

diferentes posições de amostragem do disco correspondem a diferentes estágios nos quais as plantas armazenam biomassa. Embora tenha sido observada diferença estatisticamente significativa entre as alturas amostradas para o clone A1, a amostragem na base da árvore é recomendada devido à sua maior viabilidade operacional.

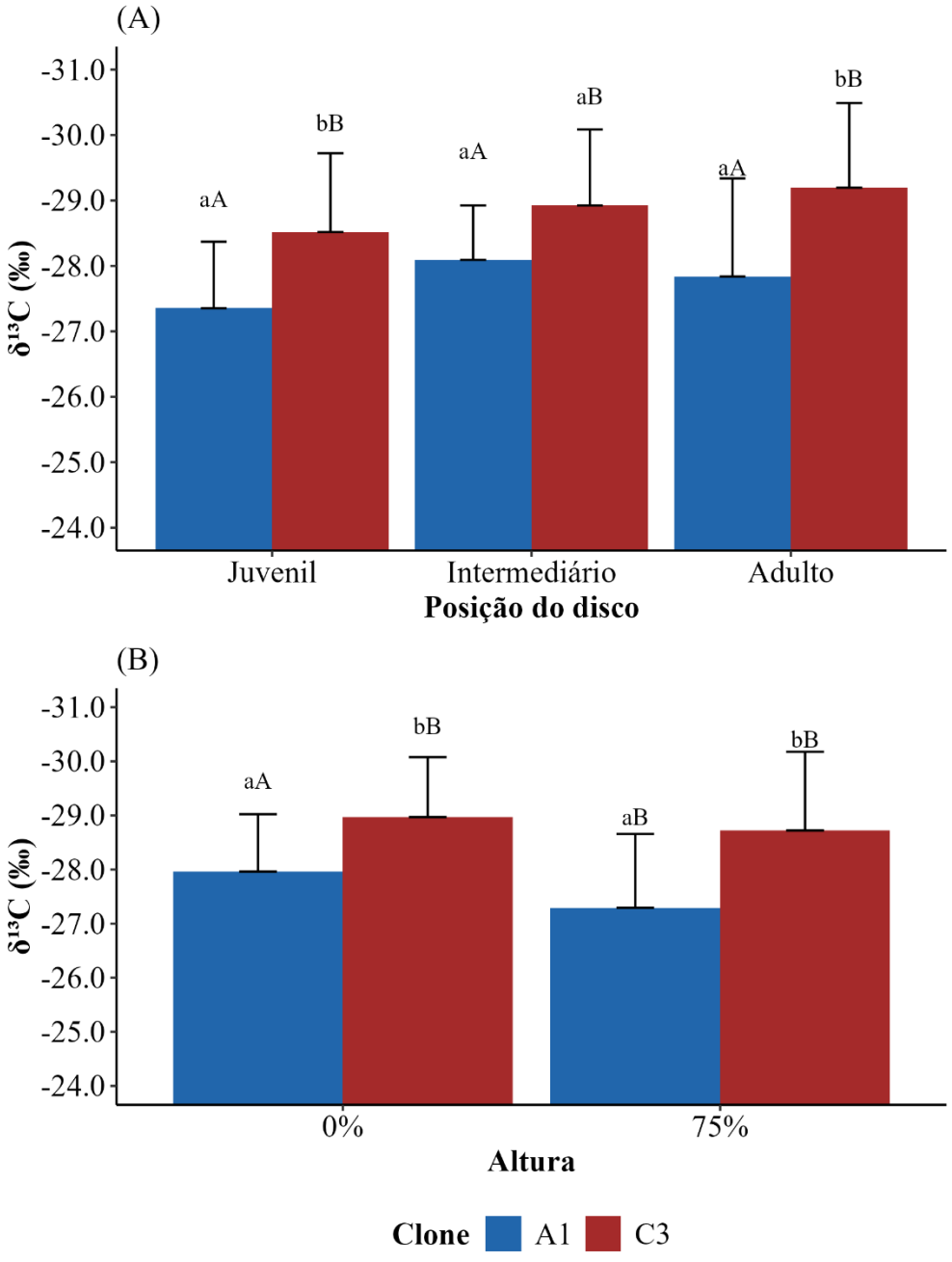

Figura 8. Discriminação de $\delta^{13}C$ em diferentes posições de disco e alturas de árvores de clones de eucalipto amostrados nos três locais experimentais estudados (seco, mésico e úmido) dentro da rede experimental do programa de pesquisa cooperativa TECHS. Letras minúsculas representam se houve ou não diferença estatística entre os clones, letras maiúsculas representam diferenças estatísticas entre as diferentes alturas e posições dos discos amostradas.

3.4 A Relação entre EUA e $\delta^{13}C$

No geral, $\delta^{13}C$, DAP, altura e temperatura máxima (Tmax) foram selecionados como os principais impulsionadores da EUA para ambos os clones em todos os locais experimentais (Figura 9B e 9C). Foi observada uma correlação negativa entre $\delta^{13}C$ e EUA em todos os locais, ou seja, maiores valores de $\delta^{13}C$ correspondem a menores EUA (Figura 9A). Para o clone A1, a EUA foi influenciada principalmente por $\delta^{13}C$ e altura, enquanto para o clone C3, a EUA foi impulsionada por $\delta^{13}C$ e Tmax. Além disso, o clone A1 demonstrou maior eficiência no uso de água em comparação ao clone C3. Os modelos apresentaram R^2 de 0,54 a 0,97, RMSE de entre 31.24 e 16.67% e o AIC de 10.61 e -1.34 para os clones A1 e C3 respectivamente (Tabela 2).

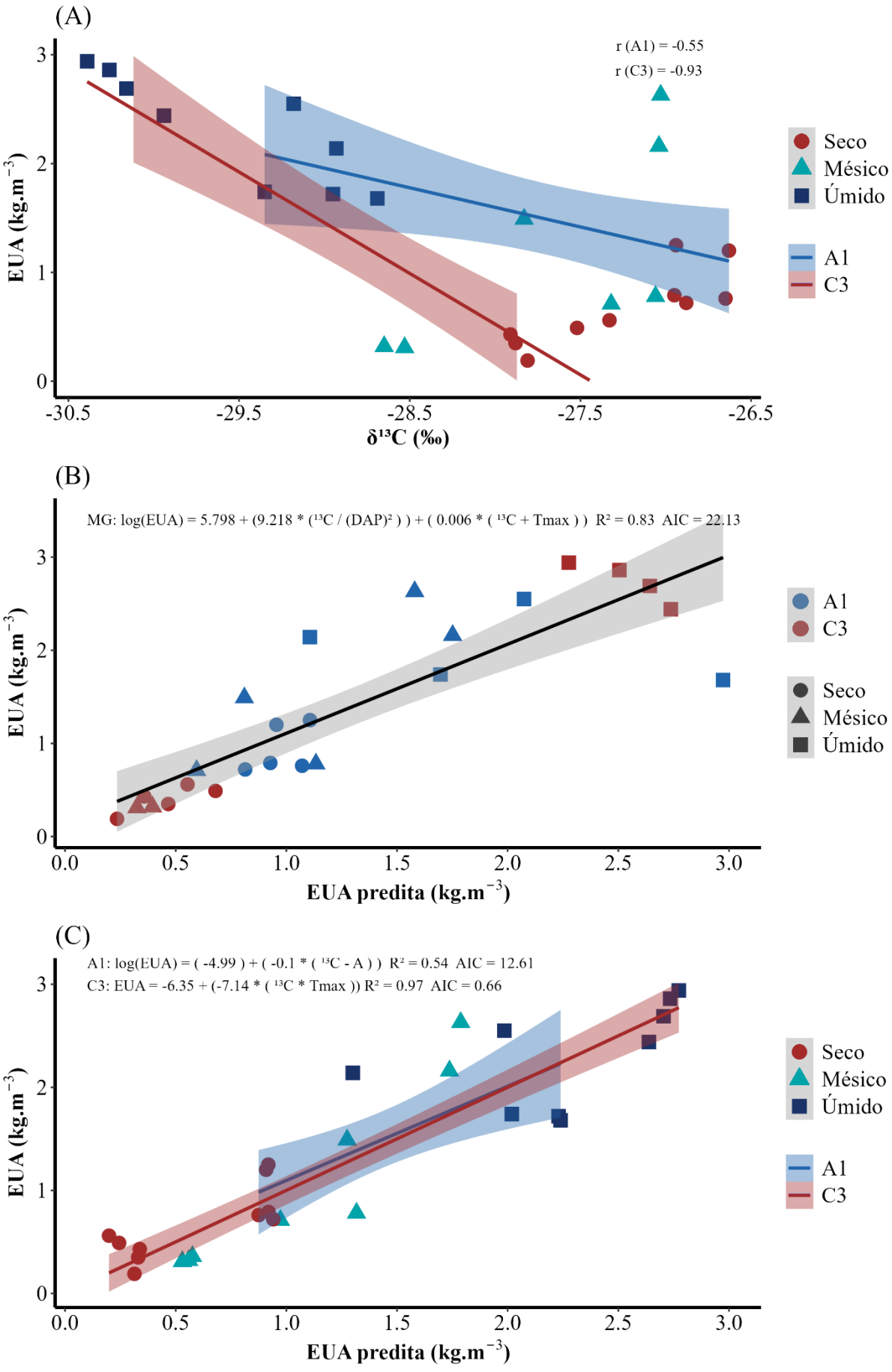
(A)
r (A1) = -0.55
r (C3) = -0.93
EUA (kg.m^{-3})
δ^{13}C (‰)
Seco
Mésico
Úmido
A1
C3
(B)
MG: log(EUA) = 5.798 + (9.218 * (¹³C / (DAP)²)) + (0.006 * (¹³C + Tmax)) R² = 0.83 AIC = 22.13
EUA predita (kg.m^{-3})
(C)
A1: log(EUA) = (-4.99) + (-0.1 * (¹³C - A)) R² = 0.54 AIC = 12.61
C3: EUA = -6.35 + (-7.14 * (¹³C * Tmax)) R² = 0.97 AIC = 0.66

Figura 9. Os modelos ajustados da EUA em função de $\delta^{13}C$, variáveis biométricas e climáticas para os clones A1 e C3 amostrados nos três locais experimentais estudados (seco, mésico e úmido) dentro da rede experimental do programa de pesquisa cooperativa TECHS. A Figura A mostra a correlação entre EUA e $\delta^{13}C$, representada pelo coeficiente de correlação de Pearson de acordo com o clone nos diferentes locais. A Figura B apresenta o modelo global para estimar EUA independentemente do clone; a Figura C mostra o modelo específico para clonar A1 (em verde) e clonar C3 (em azul) nos diferentes locais; as formas de círculo, triângulo e quadrado indicam locais secos, mésicos e úmidos, respectivamente.

Tabela 2. Estimativas de parâmetros e estatísticas de qualidade de ajuste para a avaliação de modelos de regressão linear usados em previsões de EUA.

Coeficientes	**Estimativa**	**Erro-Padrão**	**Valor - t**	**Pr(>|t|)**
Modelo Global (MG)				
Intercepto	5.80	1.03	5.61	0.000010 ***
$\delta^{13}C/DAP^2$	9.22	1.53	6.04	0.000004 ***
$\delta^{13}C$ * Tmax	0.01	0.00	4.03	0.000518 ***
Modelo - A1				
Intercepto	-4.99	1.26	-3.95	0.001665 **
$\delta^{13}C$ - A	-0.10	0.02	-4.19	0.001056 **
Modelo - C3				
Intercepto	-6.35	0.42	-15.06	3.370E-08 ***
$\delta^{13}C/Tmax$	-7.14	0.40	-18.00	5.981E-09 ***
Estatísticas sobre a qualidade das estimativas do modelo				
Modelos	**R^2 ajustado**	**RMSE**	**RMSE%**	**MAE**	**AIC**
MG	0.83	0.54	39.09	0.37	20.13
A1	0.54	0.46	31.24	0.41	10.61
C3	0.97	0.19	16.67	0.17	-1.34

DAP é o diâmetro a 1,30 m acima do solo, A é a altura total, $\delta^{13}C$ é a os valores da discriminação de carbono – 13, Tmax é a temperatura máxima. RMSE é root mean squared error, MAE é o erro médio absoluto e o AIC é o critério de informação de Akaike. Os símbolos -, / e * significam subtração, divisão e multiplicação, respectivamente. Os asteriscos *** e ** indicam a significância dos parâmetros, respectivamente, em níveis de 1 a 5%.

4. Discussão

4.1 Padrões de eficiência no uso da água em relação à variabilidade genética e local

O uso de ^{12}C no metabolismo fotossintético é preferido pelas plantas, pois envolve menor custo energético para processamento (CHAVES; MAROCO; PEREIRA, 2003). No geral, as plantas tendem a fechar seus estômatos sob estresse hídrico, reduzindo assim a absorção de ^{12}C. À medida que o estoque disponível de ^{12}C nas células se esgota rapidamente, as plantas começam a incorporar ^{13}C em seu metabolismo, que é posteriormente fixado utilizado na produção de biomassa (FERNANDES *et al.*, 2016). No geral, valores menores de $\delta^{13}C$ indicam menor consumo de água, pois requer um menor tempo de abertura estomática.

O clone A1 apresentou uma média de $\delta^{13}C$ de -27,70‰, enquanto o C3 teve uma média de -28,87‰. Esses valores são próximos aos encontrados no estudo de Halder et al., (2021), que avaliou os padrões intraespecíficos de $\delta^{13}C$, crescimento e variação da densidade da madeira em locais com chuvas contrastantes em Bangladesh. Os valores de $\delta^{13}C$ para *Eucalyptus camaldulensis* no local seco foram de -26,90‰ e no local úmido foram de -27,8‰, mostrando a mesma tendência encontrada neste estudo, onde o $\delta^{13}C$ diminui em áreas com maior déficit hídrico. Com base nesses resultados, podemos inferir que o clone A1 teve maior EUA, enquanto o C3 teve menor EUA. Esses resultados são apoiados pelos encontrados por Hubbard et al., (2020), que relataram que o clone C3 usou mais água do que o clone A1 e que ambos os clones usaram mais água à medida que a disponibilidade de água do local aumentou. Isso pode ser validado quando observamos que o C3 teve menor produtividade em todos os três locais (FIGURA 3), mesmo usando mais água.

O clone C3 possui uma área estomática maior, com estômatos tanto na superfície adaxial quanto na abaxial, característica que pode explicar a maior taxa de transpiração (HUBBARD *et al.*, 2020). O C3 também possui um alto fluxo total de carbono para as raízes, alocando 47% da produção primária bruta (GPP) para o subsolo, o que significa que este clone possui mecanismos que lhe permitem acessar diferentes reservatórios de água no solo e manter seu processo fotossintético por mais tempo quando exposto a ambientes mais secos (CAMPOE *et al.*, 2020; HAKAMADA *et al.*, 2020).

O clone A1 consistentemente mostra maior produção de biomassa (ICA e IMA) em todos os três locais (úmido, mésico e seco) quando comparado ao clone C3, indicando que A1 pode ser uma escolha mais adequada para maximizar a produtividade em diferentes condições edafoclimáticas (FIGURA 3). A variação nos valores de ICA e IMA entre os diferentes tipos de locais destaca a importância de considerar as condições edafoclimáticas no planejamento de plantações de *Eucalyptus*, indicando a necessidade de planejamento detalhado para maximizar a produtividade em cada local específico (ELLI *et al.*, 2019; HAKAMADA *et al.*, 2020).

Observamos que o clone C3 apresentou maior EUA abaixo do solo do que o clone A1 no local seco (FIGURA 5), mostrando que este clone investe mais energia na produção de raízes quando exposto a ambientes com déficit hídrico. Nos locais úmido e mésico, o clone A1 apresentou maior proporção de EUA alocada para a produção de raízes. Isso sugere que o A1 pode ajustar sua estratégia de alocação de recursos de acordo com a disponibilidade hídrica, o que pode contribuir para sua maior EUA. Segundo Basílio et al., (2024), os clones A1 e C3 apresentam maiores densidades de raízes finas em ambientes com altos déficits hídricos, explicados por sua plasticidade fenotípica, reduzindo assim a alocação de carbono para o caule e concentrando-o na produção de raízes finas. Nesse contexto, espera-se que genótipos cultivados em locais com altos déficits hídricos desenvolvam maiores densidades de raízes finas como estratégia para mitigar ou tolerar o estresse hídrico (HUBBARD *et al.*, 2020).

Clones de *Eucalyptus* com menor tolerância à seca em regiões com déficit hídrico apresentaram fechamento estomático mais efetivo, levando a menores valores de $\delta^{13}C$, enquanto o clone tolerante à seca possivelmente manteve seus estômatos abertos por mais tempo, resultando em maior $\delta^{13}C$, semelhante aos resultados encontrados neste trabalho (OLIVEIRA *et al.*, 2022). Nos locais secos, o mesmo clone apresentou menor $\delta^{13}C$ e menor uso de água em comparação aos ambientes úmidos (MERCHANT *et al.*, 2012). O método utilizado neste estudo para avaliar $\delta^{13}C$ na biomassa vegetal fornece uma visão mais ampla da EUA ao longo do tempo e sob diferentes condições ambientais, mostrando maior sensibilidade para detectar diferenças em $\delta^{13}C$ nos três locais em comparação com as medições feitas em folhas ou seiva.

Em nosso estudo, não encontramos diferenças nos valores de $\delta^{13}C$ entre os os estágios de crescimento das árvores, o que significa que não há alteração nos valores de EUA com a idade da árvore. Isso pode ser explicado pelo fato de que as informações isotópicas são muito complexas, pois os isótopos refletem não apenas as respostas ambientais e fisiológicas, mas também as características intrínsecas de cada árvore (CORREA-DÍAZ *et al.*, 2020). MacFarlane, Adams e White (2004) analisaram se as reduções nas trocas gasosas, indicadas por $\delta^{13}C$, eram determinantes mais significativos da produtividade do que as mudanças no índice de área foliar ou nas características foliares em resposta à seca em *E. globulus*. Eles descobriram que $\delta^{13}C$ variou entre os locais, mas não variou entre os anos, com variações mínimas de $\delta^{13}C$ entre os anéis de crescimento, conforme encontrado no presente trabalho.

Em relação à altura, foram encontradas diferenças estatisticamente significativas entre as diferentes alturas amostradas para os dois clones, o que mostra que as tendências de EUA

observadas podem ser impulsionadas pela altura e não pela idade em si. O efeito da altura da árvore no $\delta^{13}C$ pode ser atribuído a restrições no transporte de água para o dossel com o aumento da altura da árvore, e que a irradiância tem um efeito aditivo na relação altura-$\delta^{13}C$, aumentando a assimilação mais do que o estoma de condutância, resultando assim em uma pressão parcial menor de CO_2 em qualquer momento (BRIENEN *et al.*, 2017).

4.2 A relação entre $\delta^{13}C$ e EUA

Em nosso estudo, verificamos que os clones A1 e C3 apresentam uma relação linear negativa entre EUA e $\delta^{13}C$, corroborando com estudos na literatura para *Populus angustifolia* e *P. deltoides* (FLANAGAN *et al.*, 2019), *Phoenix dactylifera* (KRUSE *et al.*, 2019), *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* (BOUVET *et al.*, 2020) e *Eucalyptus globulus* (PITA *et al.*, 2001).

As principais variáveis que melhor explicaram a EUA foram $\delta^{13}C$, DAP, altura e Tmax, corroborando Pita et al., (2001) e Almeida et al., (2020). O modelo linear múltiplo obtido permite que a metodologia usando $\delta^{13}C$ substitua metodologias menos eficientes, trabalhosas e demoradas. A análise de $\delta^{13}C$ é altamente relevante, pois requer coleta de amostras de madeira simples e representativas e, como resultado, fornece valores de EUA integrados, tornando-se um proxy para EUA e uma ferramenta de triagem para genótipos tolerantes à seca (BOUVET *et al.*, 2020; CROUS; GREYLING; WINGFIELD, 2018).

Neste estudo, encontramos uma forte relação entre EUA e $\delta^{13}C$, com uma similaridade próxima nos padrões de EUA obtidos por Hubbard et al., (2020) usando o método de fluxo de seiva, e os valores encontrados aqui usando diferenciação isotópica ($\delta^{13}C$). Assim, $\delta^{13}C$ pode ser usado como uma ferramenta estratégica no setor florestal para maximizar a eficiência das estimativas de EUA em comparação com outras metodologias. Esta nova abordagem é uma ferramenta fundamental para programas de melhoramento e gestão de plantações florestais, auxiliando tomadores de decisão em processos de plantio e alocação de clones em diferentes condições climáticas brasileiras.

Os modelos de regressão indicaram uma relação linear negativa entre $\delta^{13}C$ e EUA com bom desempenho preditivo, apoiando a hipótese de que $\delta^{13}C$ pode ser um bom indicador de variações na eficiência do uso da água. Apesar da qualidade da ferramenta produzida, ainda existem algumas lacunas que precisam ser avaliadas em estudos futuros, como avaliar os valores de $\delta^{13}C$ na posição DAP das árvores em comparação com outras posições das árvores. Além disso, amostrar genótipos com comportamentos distintos dos apresentados neste estudo, em diferentes condições climáticas, ampliará o entendimento da variável EUA.

5. Conclusão

A discriminação de isótopos de carbono ($\delta^{13}C$) provou ser uma ferramenta eficaz para avaliar a EUA, com menor discriminação associada a maior eficiência no uso da água. As diferenças na EUA observadas entre as alturas das árvores, mas não entre os anéis de crescimento, sugerem que fatores relacionados à altura podem influenciar a EUA mais do que a própria idade da árvore. A aplicação de isótopos estáveis como metodologia para avaliar a EUA pode fornecer insights valiosos para programas de melhoramento genético e manejo florestal, especialmente diante das mudanças climáticas. As equações desenvolvidas demonstram um grande potencial para estimar a EUA em plantios florestais com características semelhantes as deste estudo, integrando a $\delta^{13}C$, variáveis dendrométricas e climáticas, e podem ser recomendadas como ferramentas estratégicas para o monitoramento hídrico e a para as espécies aqui avaliadas. Assim, entender as respostas funcionais das florestas e otimizar o uso da água são essenciais para a conservação dos recursos hídricos e maximizar o armazenamento de carbono.

Considerações finais

A revisão bibliométrica realizada evidenciou um aumento significativo no volume de publicações científicas sobre a EUA, especialmente a partir de 2012. Os principais países que têm contribuído para esse avanço são Austrália, Brasil e China, e periódicos como *Forest Ecology and Management* e *Tree Physiology* têm sido referências no tema. A análise revelou a predominância da avaliação da EUA na escala foliar, seguida da arbórea e, por fim, da paisagem. Além disso, a diversidade metodológica encontrada sugere a necessidade de padronização de abordagens e a ampliação da aplicação de técnicas integradas para melhorar a compreensão da EUA em diferentes escalas de medição e tempo.

O estudo experimental sobre a EUA em clones de *Eucalyptus* reforçou a importância da discriminação isotópica de carbono ($\delta^{13}C$) como ferramenta para avaliar a EUA em diferentes condições ambientais. Os resultados indicaram que a disponibilidade hídrica influencia diretamente a EUA, sendo que o clone de crescimento rápido (*Eucalyptus urophylla* - A1), apresentou maior eficiência e produtividade em comparação ao clone mais tolerantes à seca (*Eucalyptus grandis* × *E. camaldulensis* - C3). A correlação negativa entre $\delta^{13}C$ e EUA reforça a viabilidade do uso de métodos isotópicos para definir estratégias de alocação clonal em regiões com diferentes condições hídricas.

Diante desses achados, conclui-se que a pesquisa sobre a EUA tem avançado significativamente, tanto em nível teórico quanto aplicado. No entanto, ainda há desafios a serem superados, como a necessidade de estudos em escalas maiores e a incorporação de novas tecnologias para monitoramento da EUA em florestas plantadas. O uso de ferramentas isotópicas, associado a abordagens ecofisiológicas e modelagem climática, representa uma estratégia promissora para aprimorar o manejo de recursos hídricos e garantir a sustentabilidade da produção florestal em cenários de mudanças climáticas. Assim, este estudo contribui para o aprofundamento do conhecimento sobre a relação entre a assimilação de carbono e a disponibilidade de água, fornecendo subsídios para a tomada de decisão no setor florestal e para o desenvolvimento de estratégias mais resilientes frente às mudanças ambientais futuras.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Maria Naruna Felix De et al. Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. Forest Ecology and Management, v. 458, 15 fev. 2020.

ALVES, Bruno José Rodrigues et al. Emprego de Isótopos Estáveis para o Estudo do Carbono e do Nitrogênio no Sistema Solo-Planta. Processos biológicos no sistema solo-planta: ferramentas para uma agricultura sustentável. [S.l: s.n.], 2006. p. 343–368. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/268011790>.

ARES, Adrián; FOWNES, James H. Productivity, resource use, and competitive interactions of *Fraxinus uhdei* in Hawaii uplands. Canadian Journal of Forest Research, v. 31, n. 1, p. 132–142, 1 jan. 2001.

BAI, Shahla Hosseini et al. Ecophysiological status of different growth stage of understorey *Acacia leiocalyx* and *Acacia disparrima* in an Australian dry sclerophyll forest subjected to prescribed burning. Journal of Soils and Sediments, v. 13, n. 8, p. 1378–1385, set. 2013.

BASÍLIO, Josiana Jussara Nazaré et al. Fine Root Density Dynamics and Carbon Stock of *Eucalyptus* spp.: Interplay of Age, Genotype, and Edaphoclimatic Conditions. Plants, v. 13, n. 11, p. 1503, 30 maio 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/11/1503>.

BINKLEY, Dan et al. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. Forest Ecology and Management, v. 405, p. 271–283, 1 dez. 2017.

BINKLEY, Dan et al. Variation in whole-rotation yield among *Eucalyptus* genotypes in response to water and heat stresses: the techs project. Forest Ecology And Management, [S.L.], v. 462, p. 1-12, abr. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117953.
BOUVET, Jean Marc et al. Selecting for water use efficiency, wood chemical traits and biomass with genomic selection in a *Eucalyptus* breeding program. Forest Ecology and Management, v. 465, 1 jun. 2020.

BRIENEN, R. J.W. et al. Tree height strongly affects estimates of water-use efficiency responses to climate and CO_2 using isotopes. Nature Communications, v. 8, n. 1, 1 dez. 2017.
CAMPOE, Otávio C. et al. Climate and genotype influences on carbon fluxes and partitioning in *Eucalyptus* plantations. Forest Ecology and Management, v. 475, 1 nov. 2020.

CHAVES, Manuela M.; MAROCO, João P.; PEREIRA, João S. Understanding plant responses to drought - From genes to the whole plant. Functional Plant Biology. [S.l: s.n.]. 2003.

CIULLA, G.; D'AMICO, A. Building energy performance forecasting: A multiple linear regression approach. Applied Energy, v. 253, 1 nov. 2019.

CONDON, A. G. et al. Breeding for high water-use efficiency. nov. 2004, [S.l: s.n.], nov. 2004. p. 2447–2460.

CORREA-DÍAZ, A. et al. From Trees to Ecosystems: Spatiotemporal Scaling of Climatic Impacts on Montane Landscapes Using Dendrochronological, Isotopic, and Remotely Sensed Data. Global Biogeochemical Cycles, v. 34, n. 3, 1 mar. 2020.

CRAIG, Harmon. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 12, p. 133–149, 1957.

CROUS, Casparus J.; GREYLING, Izette; WINGFIELD, Michael J. Dissimilar stem and leaf hydraulic traits suggest varying drought tolerance among co-occurring *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* clones. Southern Forests, v. 80, n. 2, p. 175–184, 3 abr. 2018.

DIJKSTRA, Feike A. et al. Water, nitrogen and phosphorus use efficiencies of four tree species in response to variable water and nutrient supply. Plant and Soil, v. 406, n. 1–2, p. 187–199, 1 set. 2016.

ELLI, Elvis Felipe et al. Assessing the growth gaps of *Eucalyptus* plantations in Brazil – Magnitudes, causes and possible mitigation strategies. Forest Ecology and Management, v. 451, 1 nov. 2019.

FARQUHAR, G. D.; RICHARDS, R. A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes. Australian Journal of Plant Physiology, v. 11, n. 6, p. 539–552, 1984.

FERNANDES, Tarcísio J.G. et al. Simultaneous assessment, through sap flow and stable isotopes, of water use efficiency (WUE) in thinned pines shows improvement in growth, tree-climate sensitivity and WUE, but not in WUEi. Forest Ecology and Management, v. 361, p. 298–308, 1 fev. 2016.

FERNANDEZ-TSCHIEDER, Ezequiel; MARSHALL, John D.; BINKLEY, Dan. Carbon budget at the individual-tree scale: dominant *Eucalyptus* trees partition less carbon belowground. New Phytologist, v. 242, n. 5, p. 1932–1943, 1 jun. 2024.

FERREIRA, Eric B.; CAVALCANTI, Pórtya P.; NOGUEIRA, Denismar A. ExpDes: An R Package for ANOVA and Experimental Designs. Applied Mathematics, v. 05, n. 19, p. 2952–2958, 2014.

FLANAGAN, Lawrence B. et al. Using stable isotopes to quantify water sources for trees and shrubs in a riparian cottonwood ecosystem in flood and drought years. Hydrological Processes, v. 33, n. 24, p. 3070–3083, 30 nov. 2019.

GONÇALVES, José L.M. et al. Eucalypt plantation management in regions with water stress. Southern Forests, v. 79, n. 3, p. 169–183, 3 jul. 2017.

HAKAMADA, Rodrigo Eiji et al. Influence of stand density on growth and water use efficiency in *Eucalyptus* clones. Forest Ecology and Management, v. 466, 15 jun. 2020.

HALDER, Nirmol Kumar et al. Intra-specific patterns of $\delta^{13}C$, growth and wood density variation at sites of contrasting precipitation with implications for modelling carbon

sequestration of tropical tree species. Agroforestry Systems, v. 95, n. 8, p. 1429–1443, 1 dez. 2021.

HAN, Tuo et al. Contrasting response of water use efficiency to soil moisture availability: From leaf to ecosystem in an arid oasis. Ecological Indicators, v. 147, 1 mar. 2023.

HATFIELD, Jerry L.; DOLD, Christian. Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. Frontiers in Plant Science. [S.l.]: Frontiers Media S.A. , 19 fev. 2019

HUBBARD, Robert M. et al. Contrasting water use of two *Eucalyptus* clones across a precipitation and temperature gradient in Brazil. Forest Ecology and Management, v. 475, 1 nov. 2020.

IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (Paola Arias et al., Org.). [S.l: s.n.], 25 jul. 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.

KRUSE, Jörg et al. Optimization of photosynthesis and stomatal conductance in the date palm *Phoenix dactylifera* during acclimation to heat and drought. New Phytologist, v. 223, n. 4, p. 1973–1988, 2019.

LI, Chunyang. Population differences in water-use efficiency of *Eucalyptus microtheca* seedlings under different watering regimes. Physiologia Plantarum, v. 108, n. 2, p. 134–139, fev. 2000.

MA, Xiaowei et al. Biomass accumulation, allocation, and water-use efficiency in 10 *Malus rootstocks* under two watering regimes. Agroforestry Systems, v. 80, n. 2, p. 283–294, 2010.

MACFARLANE, C.; ADAMS, M. A.; WHITE, D. A. Productivity, carbon isotope discrimination and leaf traits of trees of *Eucalyptus globulus* Labill. in relation to water availability. Plant, Cell and Environment, v. 27, n. 12, p. 1515–1524, dez. 2004.

MERCHANT, Andrew et al. Site-specific responses to short-term environmental variation are reflected in leaf and phloem-sap carbon isotopic abundance of field grown Eucalyptus globulus. Physiologia Plantarum, v. 146, n. 4, p. 448–459, dez. 2012.

MUTANDA, Maltase et al. Determinants of the accuracy of using carbon isotopes in estimating water use efficiency of selected cereal and legume crops: A global perspective. Food and Energy Security. [S.l.]: John Wiley and Sons Inc., 1 jan. 2024

NICCOLI, Francesco et al. Tree species composition in mixed plantations influences plant growth, intrinsic water use efficiency and soil carbon stock. Forests, v. 12, n. 9, 1 set. 2021.

NOLAN, Rachael H. et al. Contrasting ecophysiology of two widespread arid zone tree species with differing access to water resources. Journal of Arid Environments, v. 153, p. 1–10, 1 jun. 2018.

NOVELLO, Valdir Felipe et al. Carbon isotopes applied to studies of climate and environmental changes. Derbyana, v. 42, 2021

NUNES, Flancer Novais et al. Carbon isotope discrimination and differential drought tolerance in eucalypt clones. Scientia Forestalis/Forest Sciences, v. 44, n. 112, p. 895–903, 2016.

OLIVEIRA, Thiago Wendling Gonçalves De et al. Changes in leaf physiology for eucalyptus genotypes with increase in integral water stress and its consequence for initial growth in central Chile. Scientia Forestalis/Forest Sciences, v. 50, 2022.

PITA, Pilar et al. Carbon isotope discrimination and its relationship to drought resistance under feld conditions in genotypes of *Eucalyptus globulus* Labill. Forest Ecology and Management, v. 141, p. 211–221, 2001.

SALAZAR-MORENO, Raquel; ROJANO-AGUILAR, Abraham; LÓPEZ-CRUZ, Irineo Lorenzo. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. Tecnología y Ciencias del Agua, v. 5, p. 177–183, 2014.

SANTOS, Wilma Roberta Dos et al. Water Use Efficiency for Caatinga Species: A Review for the 2009-2019 Period. Revista Brasileira de Geografia Fisica, v. 14, n. 5, p. 2573–2591, 2021.

SMITH, Millicent et al. Carbon Isotope Composition of Carbohydrates and Polyols in Leaf and Phloem Sap of *Phaseolus vulgaris* L. Influences Predictions of Plant Water Use Efficiency. Plant and Cell Physiology, v. 57, n. 8, p. 1756–1766, 1 ago. 2016.

VAISHNAV, Vivek et al. Genetic variation in carbon isotope discrimination-based water use efficiency of teak (*Tectona grandis* L. f.) and its association with growth and wood quality traits. Trees - Structure and Function, v. 35, n. 3, p. 799–807, 1 jun. 2021.

WANG, Ge et al. Mapping global research on sustainability of megaproject management: A scientometric review. Journal of Cleaner Production. [S.l.]: Elsevier Ltd., 20 jun. 2020

ZHANG, Zhiqiang et al. Forest water-use efficiency: Effects of climate change and management on the coupling of carbon and water processes. Forest Ecology and Management. [S.l.]: Elsevier B.V., 15 abr. 2023

ZHENG, Shunsheng et al. Relationship between stable carbon isotope discrimination and water use efficiency under deficit drip irrigation of kiwifruit in the humid areas of South China. Agricultural Water Management, v. 240, 1 out. 2020.