REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

ADAPTAÇÃO GENÉTICA DE *EUCALYPTUS* AO ESTRESSE CLIMÁTICO E SUAS IMPLICAÇÕES PARA A PRODUTIVIDADE NO CERRADO BRASILEIRO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

GENETIC ADAPTATION OF *EUCALYPTUS* TO CLIMATE STRESS AND ITS IMPLICATIONS FOR PRODUCTIVITY IN THE BRASILIAN CERRADO: A SYSTEMATIC REVIEW

ADAPTACIÓN GENÉTICA DE *EUCALYPTUS* AL ESTRÉS CLIMÁTICO Y SUS IMPLICACIONES PARA LA PRODUCTIVIDAD EN EL CERRADO BRASILEÑO: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

Marcos Antonio Negreiros Dias
Doutorando em Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal do Tocantins, Brasil
Email: marcos.negreiros@mail.uft.edu.br

Paulo Sérgio Rocha Lima
Mestre em Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal do Tocantins, Brasil
Email: paulosergio@ift.edu.br

Thais Bernardes de Oliveira
Mestra em Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal do Tocantins, Brasil
Email: thaisbernardes16@gmail.com

Vitor Dias Barros
Graduado em Engenharia Agrônoma, Universidade Uni Goiás, Brasil
Email: vitordiasbarros@hotmail.com

Lucas dos Santos Barbosa Marinho
Mestre em Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal do Tocantins, Brasil
Email: lucasmarinho1994@gmail.com

Raniere Alves Rodrigues
Mestrando em Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal do Tocantins, Brasil
Email: ranierealvesrodrigues@hotmail.com

Henrique de Souza Lima Júnior
Doutorando em Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal do Tocantins, Brasil
Email: henrique.oficial@hotmail.com

Rosilene da Costa Porto de Carvalho
Doutoranda em Produção Vegetal, Universidade Federal do Tocantins, Brasil
Email: rosilene.porto@mail.uft.edu.br

Ana Debora Ribeiro Cardoso Gusmão
Doutoranda em Produção Vegetal, Universidade Federal do Tocantins, Brasil
Email: anadebora.gusmao@gmail.com

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

Olavo da Costa Leite
Doutor em Ciências Florestais, Universidade Federal do Tocantins, Brasil
Email: olavo.leite@seduc.to.gov.br

Cristiano Bueno de Moraes
Doutor em Ciências Florestais, Universidade Federal do Tocantins, Brasil
Email: https://orcid.org/0000-0001-6988-0622

Resumo

As mudanças climáticas têm imposto desafios crescentes à silvicultura, especialmente em regiões tropicais sazonais, onde o aumento da temperatura, a irregularidade das precipitações e a intensificação de eventos extremos comprometem o crescimento, a sobrevivência e a produtividade das plantações florestais. Nesse contexto, o gênero *Eucalyptus* assume papel estratégico na silvicultura brasileira em razão de seu elevado potencial produtivo, ampla plasticidade ecológica e relevância para a cadeia de celulose, biomassa e madeira sólida. No entanto, em ambientes como o Cerrado brasileiro, a manutenção da produtividade depende cada vez mais da capacidade dos materiais genéticos de responder ao estresse hídrico e à variabilidade climática. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo analisar, por meio de uma revisão sistemática da literatura, a adaptação genética de *Eucalyptus* ao estresse climático e suas implicações para a produtividade no Cerrado brasileiro. Metodologicamente, a pesquisa caracterizou-se como uma revisão sistemática de abordagem qualitativa e natureza exploratória, conduzida conforme as diretrizes do protocolo PRISMA. A busca foi realizada nas bases *Scopus e Web of Science*, com descritores relacionados a melhoramento genético, tolerância à seca, interação genótipo × ambiente, produtividade e mudanças climáticas. Inicialmente, foram recuperados 371 registros; após as etapas de triagem e elegibilidade, 30 artigos compuseram o corpus final da revisão qualitativa. A interpretação dos estudos foi realizada por meio da Análise de Conteúdo de Bardin, permitindo a organização das evidências em categorias analíticas centrais. Os resultados indicaram que a adaptação genética de *Eucalyptus* constitui fator decisivo para a manutenção da produtividade florestal em ambientes sujeitos a déficit hídrico, uma vez que clones mais adaptados apresentam maior eficiência no uso da água, maior estabilidade fisiológica e melhor desempenho sob condições limitantes. Além disso, a interação genótipo × ambiente, aliada ao uso de ferramentas modernas de seleção genética, amplia a precisão da recomendação clonal e reduz riscos produtivos e econômicos. Conclui-se que a adaptação genética é estratégica para aumentar a resiliência, a estabilidade produtiva e a sustentabilidade da silvicultura de *Eucalyptus* no Cerrado frente às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Silvicultura; variabilidade ambiental; tolerância a seca; estabilidade produtiva; ecofisiologia florestal.

Abstract

Climate change has imposed increasing challenges on forestry, particularly in seasonal tropical regions, where rising temperatures, irregular precipitation patterns, and the intensification of extreme climatic events compromise the growth, survival, and productivity of forest plantations. In this context, the genus *Eucalyptus* plays a strategic role in Brazilian forestry due to its high productive potential, broad ecological plasticity, and importance for the pulp, biomass, and solid wood production chains. However, in environments such as the Brazilian Cerrado, maintaining productivity increasingly depends on the capacity of genetic materials to respond to water stress and climatic variability. Therefore, this study aimed to analyze, through a systematic literature review, the genetic adaptation of *Eucalyptus* to climatic stress and its implications for productivity in the Brazilian

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

Cerrado. Methodologically, the research was characterized as a systematic review with a qualitative approach and exploratory nature, conducted following the guidelines of the PRISMA protocol. The literature search was performed in the Scopus and Web of Science databases using descriptors related to genetic improvement, drought tolerance, genotype × environment interaction, productivity, and climate change. Initially, 371 records were retrieved; after screening and eligibility stages, 30 articles composed the final corpus of the qualitative review. The interpretation of the selected studies was carried out using Bardin's Content Analysis, allowing the organization of evidence into central analytical categories. The results indicated that the genetic adaptation of *Eucalyptus* is a decisive factor for maintaining forest productivity in environments subject to water deficit, as more adapted clones exhibit greater water-use efficiency, higher physiological stability, and better performance under limiting conditions. Furthermore, genotype × environment interaction, combined with the use of modern genetic selection tools, increases the accuracy of clonal recommendation and reduces productive and economic risks. It is concluded that genetic adaptation represents a strategic approach to increasing resilience, productive stability, and the sustainability of *Eucalyptus* forestry in the Cerrado under climate change scenarios.

Keywords: Silvicuture; Environmental variability; Drought tolerance; Productive stability; Forest ecophysiology.

Resumen

El cambio climático ha impuesto desafíos crecientes a la silvicultura, especialmente en regiones tropicales estacionales, donde el aumento de la temperatura, la irregularidad de las precipitaciones y la intensificación de eventos extremos comprometen el crecimiento, la supervivencia y la productividad de las plantaciones forestales. En este contexto, el género *Eucalyptus* asume un papel estratégico en la silvicultura brasileña debido a su elevado potencial productivo, amplia plasticidad ecológica y relevancia para la cadena de celulosa, biomasa y madera sólida. Sin embargo, en ambientes como el Cerrado brasileño, el mantenimiento de la productividad depende cada vez más de la capacidad de los materiales genéticos para responder al estrés hídrico y a la variabilidad climática. Ante ello, el presente estudio tuvo como objetivo analizar, mediante una revisión sistemática de la literatura, la adaptación genética de *Eucalyptus* al estrés climático y sus implicaciones para la productividad en el Cerrado brasileño. Metodológicamente, la investigación se caracterizó como una revisión sistemática de enfoque cualitativo y naturaleza exploratoria, realizada conforme a las directrices del protocolo PRISMA. La búsqueda se llevó a cabo en las bases Scopus y Web of Science, con descriptores relacionados con mejoramiento genético, tolerancia a la sequía, interacción genotipo × ambiente, productividad y cambio climático. Inicialmente, se recuperaron 371 registros; tras las etapas de cribado y elegibilidad, 30 artículos integraron el corpus final de la revisión cualitativa. La interpretación de los estudios se realizó mediante el Análisis de Contenido de Bardin, lo que permitió organizar las evidencias en categorías analíticas centrales. Los resultados indicaron que la adaptación genética de *Eucalyptus* constituye un factor decisivo para el mantenimiento de la productividad forestal en ambientes sujetos a déficit hídrico, ya que los clones más adaptados presentan mayor eficiencia en el uso del agua, mayor estabilidad fisiológica y mejor desempeño en condiciones limitantes. Además, la interacción genotipo × ambiente, aliada al uso de herramientas modernas de selección genética, amplía la precisión de la recomendación clonal y reduce riesgos productivos y económicos. Se concluye que la adaptación genética es estratégica para aumentar la resiliencia, la estabilidad productiva y la sostenibilidad de la silvicultura de *Eucalyptus* en el Cerrado frente al cambio climático.

Palabras clave: Silvicultura; Variabilidad ambiental; Tolerancia a la sequía; Estabilidad productiva; Ecofisología forestal.

1. Introdução

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

As mudanças climáticas têm se consolidado como um dos principais fatores de transformação dos sistemas naturais e produtivos no século XXI, afetando diretamente a dinâmica dos ecossistemas florestais e a sustentabilidade da produção de madeira em escala global. O aumento da temperatura média, as alterações no regime de precipitação e a intensificação de eventos climáticos extremos tendem a influenciar processos fisiológicos das plantas, comprometendo o crescimento, a sobrevivência e a produtividade das plantações florestais. Em espécies de rápido crescimento, como *Eucalyptus*, amplamente cultivadas em regiões tropicais e subtropicais, tais mudanças podem intensificar o estresse hídrico e reduzir o desempenho produtivo, especialmente em ambientes com forte sazonalidade climática, como o Cerrado brasileiro (Dvorak, 2012; Rubilar et al., 2020; Hubbard et al., 2020; Silva et al., 2022).

O gênero *Eucalyptus* ocupa posição estratégica na silvicultura mundial e brasileira devido ao seu elevado potencial produtivo, ampla plasticidade ecológica e diversidade de aplicações industriais, incluindo a produção de celulose, biomassa energética e madeira sólida. No Brasil, os elevados níveis de produtividade observados nas plantações resultam da integração entre condições ambientais favoráveis, manejo silvicultural intensivo e avanços expressivos nos programas de melhoramento genético. A seleção de clones superiores e híbridos adaptados tem permitido ganhos significativos em volume de madeira, qualidade tecnológica e estabilidade produtiva, fortalecendo a competitividade da cadeia florestal no contexto da bioeconomia (Li et al., 2022; Oliveira et al., 2020; Ferreira et al., 2023).

Entretanto, em regiões caracterizadas por elevada variabilidade climática, como o Cerrado, a manutenção da produtividade florestal depende cada vez mais da capacidade dos materiais genéticos de responder às restrições ambientais, particularmente ao déficit hídrico. A literatura demonstra que diferentes espécies e clones de *Eucalyptus* apresentam respostas contrastantes frente ao estresse hídrico, refletindo variações genéticas associadas à eficiência no uso da água, regulação estomática e plasticidade fenotípica. Assim, a adaptação genética tem sido considerada um elemento central para o desenvolvimento de plantações mais resilientes às mudanças climáticas (Silva et al., 2017; Mueller et al., 2019; Gándara et al., 2025).

Apesar dos avanços da literatura em ecofisiologia e melhoramento genético de *Eucalyptus*, observa-se ainda certa fragmentação entre estudos que investigam respostas fisiológicas ao estresse climático e aqueles que analisam seus efeitos sobre a

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

produtividade e a viabilidade econômica da silvicultura. Essa lacuna evidencia a necessidade de sínteses que integrem evidências científicas sobre adaptação genética, interação genótipo × ambiente e desempenho produtivo, especialmente em regiões sujeitas à intensificação de estresses climáticos (Balocchi et al., 2023; Paludeto et al., 2026).

1.1 Objetivos Gerais

O presente estudo teve como objetivo analisar, por meio de uma revisão sistemática da literatura, a adaptação genética de *Eucalyptus* ao estresse climático e suas implicações para a produtividade no Cerrado brasileiro.

2. Metodologia

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão sistemática de literatura, de abordagem qualitativa e natureza exploratória, desenvolvida com o objetivo de analisar evidências científicas sobre a adaptação genética de *Eucalyptus* ao estresse climático e suas implicações para a produtividade e a viabilidade da silvicultura no Cerrado brasileiro. A análise foi conduzida com base no método dedutivo, permitindo interpretar criticamente resultados provenientes de estudos sobre melhoramento genético florestal, tolerância à seca, interação genótipo × ambiente e produtividade de plantações.

Para assegurar rigor metodológico, transparência e reprodutibilidade, a revisão foi conduzida conforme as diretrizes do protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados Scopus (Elsevier) e Web of Science (*Clarivate Analytics*), selecionadas por sua ampla cobertura internacional de periódicos científicos nas áreas de Ciências Florestais, Ecologia, Genética e Produção Florestal.

A estratégia de busca foi construída a partir de descritores em língua inglesa combinados por operadores booleanos, de forma a recuperar estudos relacionados à adaptação genética e desempenho produtivo de *Eucalyptus* sob condições de estresse climático. Entre os principais termos utilizados destacam-se: *Eucalyptus*, *genetic improvement, forest breeding, clonal selection, drought tolerance*, *water stress, climate change, genotype by environment interaction, productivity e growth*. Esses descritores foram combinados em diferentes estratégias de busca para ampliar a sensibilidade da recuperação dos registros.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

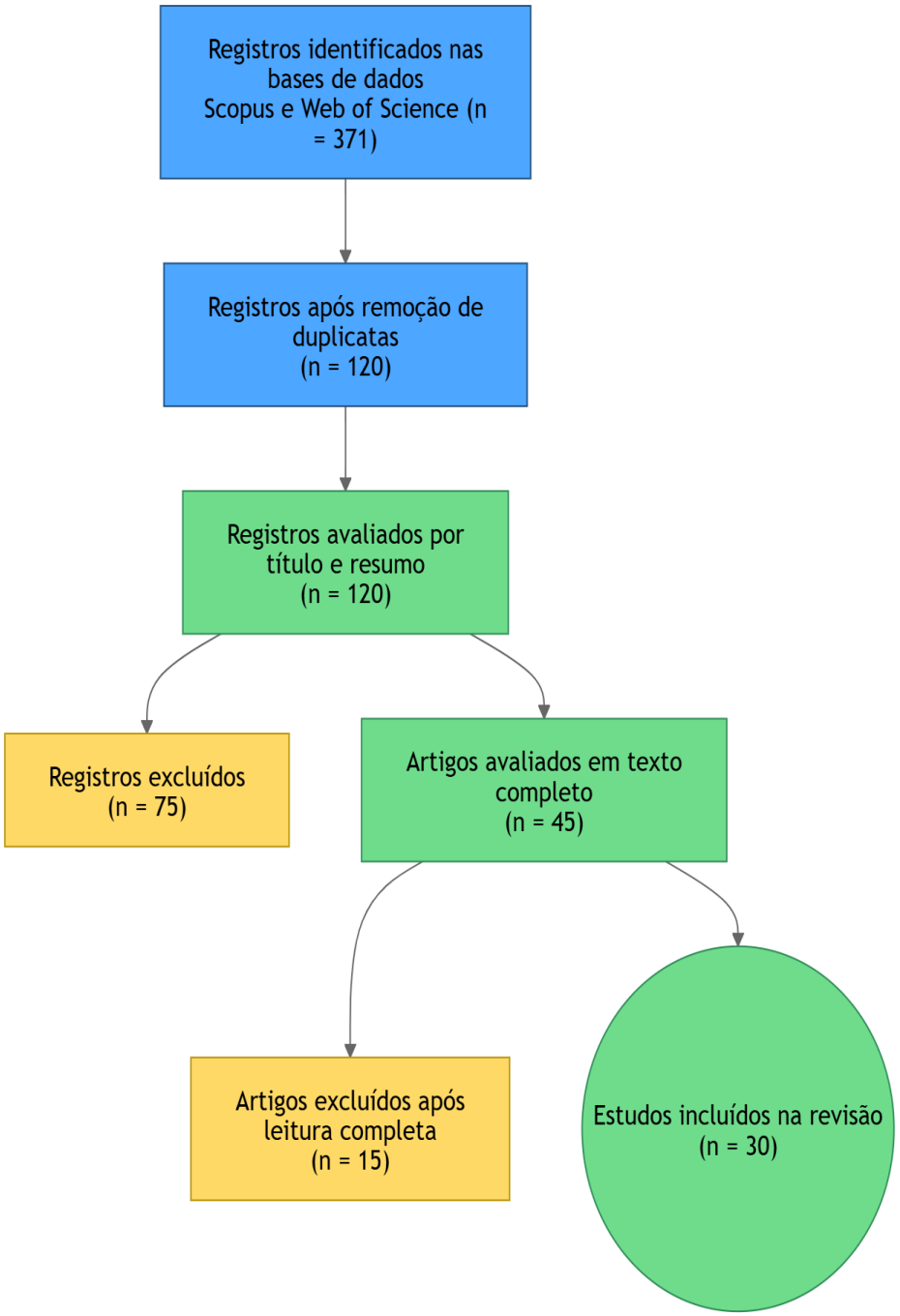
Foram considerados artigos científicos publicados de 2004 até o ano de 2026, priorizando estudos revisados por pares com aderência direta aos temas de melhoramento genético, adaptação ao estresse hídrico, interação genótipo × ambiente e produtividade de plantações de *Eucalyptus*. Foram excluídos documentos duplicados, estudos sem relação com o gênero *Eucalyptus*, bem como trabalhos exclusivamente anatômicos ou moleculares sem interface com adaptação produtiva ou desempenho silvicultural.

O processo de seleção dos estudos seguiu as etapas do protocolo PRISMA. Na fase de identificação foram recuperados 371 registros nas bases *Scopus e Web of Science*. Após a remoção de trabalhos não relacionados ao gênero *Eucalyptus*, permaneceram 120 artigos potencialmente relevantes. Na etapa de triagem, realizou-se a leitura de títulos e resumos, considerando a presença de termos relacionados a mudanças climáticas, seca e estresse hídrico, resultando em 45 estudos elegíveis. Posteriormente, após leitura integral e aplicação de critérios adicionais relacionados à produtividade florestal, desempenho genético e implicações econômicas da adaptação, o corpus final foi composto por 30 artigos incluídos na revisão qualitativa, conforme figura 1.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

Figura 1 - Fluxograma do processo de seleção de estudos baseado nas diretrizes PRISMA



Fonte: Os autores (2026)

Para o tratamento e interpretação das informações selecionadas foi adotada a Análise de Conteúdo proposta por Bardin, técnica amplamente utilizada em revisões científicas qualitativas. O procedimento analítico foi conduzido em três etapas: a) pré-análise, em que se realizou a leitura do corpus bibliográfico de 30 artigos, identificando padrões recorrentes e conceitos centrais relacionados à adaptação genética de *Eucalyptus*

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

sob estresse hídrico.; b) exploração do material, com identificação das unidades de registro e agrupamento por afinidade temática, como adaptação genética ao estresse hídrico, interação genótipo versus ambiente, respostas ecofisiológica, produtividade florestal e implicações econômicas; e c) tratamento e interpretação dos resultados, as categorias identificadas foram analisadas de forma integrada, permitindo estabelece relações entre adaptação genética, resposta ecofisiológica, produtividade florestal e implicações econômicas da silvicultura sob estresse climático.

Com o objetivo de sistematizar as evidências identificadas na literatura, os estudos selecionados foram organizados em uma matriz analítica contendo autores representativos, categorias temáticas e principais evidências científicas identificadas. Essa síntese encontra-se apresentada na Tabela 1, na qual são apresentadas as categorias analíticas utilizadas na interpretação dos resultados.

Tabela 1 - Categorias analíticas e principais evidências identificadas na literatura sobre adaptação genética de *Eucalyptus* ao estresse climático

Categoria Analítica	Autores Representativos	Principais Evidências Identificadas
Adaptação genética ao estresse hídrico	Gándara et al. (2025); Silva et al. (2017); Blackman et al. (2024); Luis et al. (2022)	Estudos demonstram variações genéticas significativas na tolerância ao estresse hídrico entre clones e espécies de *Eucalyptus*.
Interação genótipo × ambiente (G×E)	Rubilar et al. (2020); Mueller et al. (2019); Li et al. (2024); Munhoz et al. (2021)	Evidências indicam que a interação G×E influencia diretamente crescimento, sobrevivência e estabilidade produtiva.
Parâmetros genéticos e seleção clonal	Oliveira et al. (2020); Ferreira et al. (2023); Komakech & Fossey (2025)	Os estudos indicam potencial de ganhos genéticos significativos em características relacionadas à produtividade e adaptação ambiental.
Respostas ecofisiológicas ao estresse climático	Hubbard et al. (2020); Ferraresso et al. (2020); Liang et al. (2022)	Alterações fisiológicas permitem maior tolerância a condições de seca e estresse ambiental.
Produtividade e crescimento florestal	André et al. (2021); Queiroz et al. (2020); Silva et al. (2022)	A adaptação genética contribui para manutenção do crescimento mesmo em ambientes limitantes.
Modelagem genética e ferramentas de seleção	Balocchi et al. (2023); Paludeto et al. (2026); Ferreira et al. (2023)	Ferramentas avançadas permitem maior precisão na seleção e recomendação de genótipos adaptados.
Implicações econômicas da adaptação genética	Dvorak (2012); Whitock et al. (2004); Rojas et al. (2017)	O uso de genótipos adaptados reduz riscos produtivos e aumenta retorno econômico da silvicultura.

Fonte: os autores (2026)

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

A combinação entre o protocolo PRISMA e a Análise de Conteúdo de Bardin conferiu rigor metodológico, sistematização e confiabilidade à revisão, permitindo identificar padrões científicos, convergências temáticas e lacunas de pesquisa relacionadas à adaptação genética de *Eucalyptus* às mudanças climáticas e suas implicações para a produtividade e a sustentabilidade da silvicultura.

3.Revisão da Literatura

3.1 Mudanças climáticas e seus impactos na silvicultura

As mudanças climáticas têm sido amplamente reconhecidas como um dos principais fatores de transformação dos sistemas naturais e produtivos no século XXI, afetando diretamente a dinâmica dos ecossistemas florestais e a sustentabilidade da produção de madeira em escala global. Entre os principais vetores dessas transformações destacam-se o aumento da temperatura média global, as alterações nos regimes de precipitação e a maior frequência de eventos climáticos extremos, fatores que exercem influência direta sobre o crescimento, a sobrevivência e a produtividade das plantações florestais (Dvorak, 2012; Silva et al., 2022).

O aumento da temperatura global tem provocado mudanças significativas nos processos ecofisiológicos das plantas, alterando padrões de evapotranspiração, metabolismo vegetal e eficiência do uso da água. Em espécies do gênero *Eucalyptus*, amplamente cultivadas em regiões tropicais e subtropicais, o aumento da temperatura pode afetar tanto a fotossíntese quanto a respiração, interferindo no balanço energético das plantas e, consequentemente, no crescimento e na produção de biomassa. Estudos indicam que o aumento da temperatura, quando associado à redução da disponibilidade hídrica, pode amplificar o estresse fisiológico das árvores, comprometendo a estabilidade produtiva das plantações (Hubbard et al., 2020; Silva et al., 2022).

Nesse sentido, verifica-se que além da elevação térmica, as mudanças climáticas também têm promovido alterações relevantes nos padrões de precipitação, especialmente em regiões tropicais sazonais, como o Cerrado brasileiro. Nessas regiões, a variabilidade interanual das chuvas e a intensificação de períodos de seca podem reduzir a disponibilidade de água no solo durante fases críticas do crescimento das plantas. A literatura demonstra que a disponibilidade hídrica é um dos principais fatores limitantes da produtividade florestal, especialmente em plantações comerciais de *Eucalyptus*, cuja demanda hídrica pode variar significativamente entre espécies e clones (Rubilar et al., 2020; Queiroz et al., 2020). Nesse contexto, mudanças nos regimes pluviométricos podem

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

comprometer o desempenho silvicultural e exigir a adoção de materiais genéticos mais adaptados às condições de déficit hídrico.

Outro aspecto relevante das mudanças climáticas refere-se à intensificação de eventos extremos, como ondas de calor, secas prolongadas e variações abruptas de temperatura. Esses eventos têm potencial para gerar impactos severos sobre plantações florestais, afetando tanto a sobrevivência quanto o crescimento das árvores. A ocorrência de secas severas, por exemplo, pode provocar fechamento estomático prolongado, redução da assimilação de carbono e alterações no funcionamento hidráulico das plantas, aumentando a vulnerabilidade fisiológica das espécies florestais (Blackman et al., 2024; Luis et al., 2022). Em sistemas produtivos baseados em monoculturas florestais, essa vulnerabilidade tende a ser ampliada, uma vez que a homogeneidade genética pode aumentar a sensibilidade das plantações a variações ambientais extremas.

No contexto da silvicultura comercial, esses fatores climáticos representam desafios importantes para a manutenção da produtividade e da estabilidade dos sistemas de produção florestal. As plantações de *Eucalyptus*, embora reconhecidas por sua elevada plasticidade ecológica e adaptabilidade a diferentes ambientes, apresentam respostas diferenciadas frente às condições de estresse climático, dependendo do material genético utilizado e das características do sítio de plantio (Gándara et al., 2025; Mueller et al., 2019). Dessa forma, a interação entre genótipo e ambiente torna-se um elemento central para compreender a vulnerabilidade ou a resiliência das plantações florestais frente às mudanças climáticas.

Entre os impactos mais relevantes associados às alterações climáticas destaca-se o déficit hídrico, considerado um dos principais fatores limitantes do crescimento de plantações florestais em regiões tropicais sazonais. O estresse hídrico pode afetar diretamente processos fisiológicos essenciais, como fotossíntese, condutância estomática e transporte de água no xilema, reduzindo o crescimento e a produção de biomassa das árvores (Rubilar et al., 2020; Silva et al., 2017). Em condições severas, o déficit hídrico pode levar ao colapso hidráulico dos tecidos vegetais, resultando em mortalidade parcial ou total das plantas. Nesse sentido, a capacidade de tolerância à seca tem sido considerada um dos principais critérios para programas de melhoramento genético voltados à adaptação climática de espécies florestais.

As projeções climáticas indicam que a intensificação de eventos de seca e a maior irregularidade das precipitações podem afetar significativamente a produtividade florestal em diferentes regiões do mundo, incluindo áreas tradicionalmente favoráveis ao cultivo de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

Eucalyptus. Estudos de modelagem e análise ecofisiológica sugerem que, em cenários climáticos futuros, a produtividade florestal poderá apresentar maior variabilidade espacial e temporal, exigindo estratégias de adaptação que integrem manejo silvicultural, seleção genética e planejamento territorial da produção florestal (Hubbard et al., 2020; Queiroz et al., 2020).

Nesse contexto, a compreensão dos impactos das mudanças climáticas sobre a silvicultura torna-se fundamental para o desenvolvimento de estratégias de adaptação que garantam a sustentabilidade da produção florestal. A integração entre estudos ecofisiológicos, genética florestal e planejamento silvicultural tem sido apontada como um caminho promissor para reduzir a vulnerabilidade das plantações e aumentar a resiliência dos sistemas produtivos frente às novas condições climáticas. Dessa forma, a adaptação genética de espécies e clones de *Eucalyptus* emerge como uma estratégia central para manter a produtividade e a estabilidade econômica das plantações florestais em ambientes sujeitos a crescente variabilidade climática.

3.2 Melhoramento genético de *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus* ocupa posição de destaque na silvicultura mundial, sendo amplamente cultivado em diferentes regiões tropicais e subtropicais devido ao seu elevado potencial produtivo, ampla plasticidade ecológica e múltiplas aplicações industriais. A expansão global das plantações de *Eucalyptus* está diretamente associada ao avanço dos programas de melhoramento genético, que ao longo das últimas décadas têm possibilitado ganhos expressivos em produtividade, qualidade da madeira e adaptação a diferentes condições ambientais (Li et al., 2022; Balocchi et al., 2023). Esses avanços têm sido fundamentais para consolidar o papel das florestas plantadas como importantes fontes renováveis de matéria-prima para as cadeias industriais de papel, celulose, biomassa energética e produtos de madeira sólida.

A expansão das plantações de *Eucalyptus* também está relacionada à crescente demanda global por produtos florestais e à necessidade de sistemas produtivos mais eficientes no uso da terra. Em diversos países, incluindo Brasil, China, Chile, África do Sul e Austrália, programas de melhoramento genético têm sido responsáveis por aumentar significativamente o desempenho produtivo das plantações, por meio da seleção de genótipos superiores e do desenvolvimento de clones híbridos com maior tolerância a estresses ambientais e maior eficiência fisiológica (Mueller et al., 2019; Komakech; Fossey,

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

2025). Nesse contexto, a interação entre genética, ambiente e manejo silvicultural constitui um dos pilares da moderna silvicultura de plantações.

No Brasil, o cultivo de *Eucalyptus* representa um dos setores mais dinâmicos da economia florestal, desempenhando papel estratégico na produção de madeira para diferentes segmentos industriais. A elevada produtividade alcançada nas plantações brasileiras resulta da combinação entre condições climáticas favoráveis, avanços tecnológicos no manejo silvicultural e, sobretudo, do contínuo aprimoramento dos programas de melhoramento genético (Oliveira et al., 2020; Ferreira et al., 2023). Estudos indicam que os ganhos genéticos acumulados ao longo das últimas décadas permitiram elevar substancialmente o incremento médio anual das plantações, posicionando o Brasil entre os países com maior produtividade florestal do mundo.

A produção de madeira proveniente de plantações de *Eucalyptus* constitui a base da indústria nacional de celulose e papel, um dos principais segmentos da bioeconomia florestal brasileira. A competitividade dessa cadeia produtiva está fortemente relacionada à disponibilidade de matéria-prima de alta qualidade, produzida em ciclos relativamente curtos e com elevada eficiência no uso dos recursos naturais. Nesse sentido, o melhoramento genético tem contribuído diretamente para aumentar a produtividade volumétrica das plantações, reduzir o tempo de rotação e melhorar características tecnológicas da madeira, aspectos essenciais para a eficiência industrial e a competitividade do setor (André et al., 2021; Bilik et al., 2025).

Além de sua importância para a produção de celulose, as plantações de *Eucalyptus* também desempenham papel relevante na geração de biomassa energética, madeira serrada, painéis e outros produtos florestais de valor agregado. Essa diversificação de usos reforça o papel estratégico do gênero no contexto da bioeconomia florestal, na qual os recursos renováveis provenientes de florestas plantadas contribuem para a substituição de materiais de origem fóssil e para a promoção de cadeias produtivas mais sustentáveis. Nesse cenário, a seleção de materiais genéticos adaptados a diferentes condições ambientais tem sido fundamental para garantir a estabilidade produtiva das plantações e ampliar a eficiência dos sistemas florestais (Paludeto et al., 2026; Balocchi et al., 2023).

Ademais, outro fator que contribui para o sucesso global das plantações de *Eucalyptus* é a elevada adaptabilidade ecológica do gênero. Espécies e híbridos de *Eucalyptus* apresentam ampla variabilidade genética, o que permite sua adaptação a uma grande diversidade de condições edafoclimáticas. Essa característica tem sido explorada em programas de melhoramento genético voltados à seleção de clones com maior

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

tolerância a fatores limitantes, como déficit hídrico, temperaturas elevadas e baixa fertilidade dos solos (Gándara et al., 2025; Rubilar et al., 2020). A capacidade de adaptação genética a diferentes ambientes torna o gênero particularmente adequado para a expansão de plantações em regiões com condições climáticas desafiadoras, como o Cerrado brasileiro.

3.3 Adaptação genética ao estresse hídrico e Interação genótipo x ambiente

A adaptação genética ao estresse hídrico constitui um dos principais desafios e, simultaneamente, uma das mais importantes linhas de investigação nos programas contemporâneos de melhoramento de *Eucalyptus*. Em regiões tropicais sazonais, como o Cerrado brasileiro, a ocorrência de períodos prolongados de déficit hídrico pode limitar significativamente o crescimento das plantações florestais, exigindo a seleção de genótipos capazes de tolerar condições ambientais adversas sem comprometer o desempenho produtivo. Nesse contexto, a tolerância à seca tem sido considerada um dos principais atributos desejáveis nos programas de melhoramento genético, uma vez que diferentes espécies e clones de *Eucalyptus* apresentam respostas contrastantes à disponibilidade hídrica, refletindo a ampla variabilidade genética existente no gênero (Rubilar et al., 2020; Silva et al., 2017).

A tolerância ao estresse hídrico está frequentemente associada à plasticidade fenotípica das plantas, entendida como a capacidade de um mesmo genótipo expressar diferentes respostas morfológicas, fisiológicas ou bioquímicas em função das condições ambientais. Em *Eucalyptus*, essa plasticidade tem sido observada em características como desenvolvimento radicular, controle estomático e eficiência no uso da água, permitindo que determinados genótipos mantenham níveis relativamente estáveis de crescimento mesmo sob condições de baixa disponibilidade hídrica. Estudos ecofisiológicos indicam que clones tolerantes à seca tendem a apresentar maior eficiência no uso da água, associada a mecanismos de regulação estomática e manutenção da atividade fotossintética em condições de estresse, contribuindo para maior resiliência das plantações em ambientes limitantes (Hubbard et al., 2020; Blackman et al., 2024).

As respostas fisiológicas das plantas ao estresse hídrico envolvem uma série de mecanismos adaptativos que atuam em diferentes níveis da organização vegetal. Entre os principais processos destacam-se alterações na condutância estomática, redução da transpiração, ajustes osmóticos e modificações no potencial hídrico foliar. Tais mecanismos permitem que as plantas reduzam perdas de água e mantenham o

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

funcionamento do sistema hidráulico mesmo sob condições de déficit hídrico prolongado. Em estudos conduzidos com diferentes genótipos de *Eucalyptus*, verificou-se que clones com maior tolerância à seca apresentam maior estabilidade fisiológica e maior capacidade de manutenção das trocas gasosas em comparação com materiais genéticos mais sensíveis, evidenciando a importância da seleção genética para ambientes sujeitos a estresse climático (Luis et al., 2022; Ferraresso et al., 2020).

A variação genética entre clones constitui outro aspecto fundamental para compreender a adaptação de plantações florestais a condições ambientais adversas. Os programas de melhoramento genético têm demonstrado que diferentes genótipos de *Eucalyptus* apresentam níveis distintos de crescimento, sobrevivência e eficiência fisiológica quando submetidos a condições de estresse hídrico. Essa variabilidade genética permite a seleção de materiais superiores capazes de manter elevados níveis de produtividade mesmo em ambientes com disponibilidade hídrica limitada, reforçando a importância da diversidade genética como base para o desenvolvimento de sistemas florestais mais resilientes às mudanças climáticas (Gándara et al., 2025; Rubilar et al., 2020).

Além da adaptação genética ao estresse hídrico, a interação entre genótipo e ambiente (G×E) constitui um dos principais fatores que influenciam o desempenho produtivo de plantações florestais. O conceito de interação genótipo × ambiente refere-se à variação na resposta de diferentes genótipos quando avaliados em ambientes distintos, indicando que o desempenho relativo de um clone pode variar conforme as condições edafoclimáticas do local de plantio. Em programas de melhoramento de *Eucalyptus*, a análise da interação G×E é essencial para identificar genótipos com maior estabilidade produtiva e maior adaptabilidade a diferentes condições ambientais (Mueller et al., 2019; Li et al., 2024).

A presença de interação significativa entre genótipo e ambiente implica que determinados clones podem apresentar elevado desempenho produtivo em um ambiente específico, mas não necessariamente em outros locais com características ambientais distintas. Essa variabilidade de resposta reforça a necessidade de avaliar materiais genéticos em diferentes condições ambientais, permitindo identificar clones com ampla adaptabilidade ou com desempenho específico para determinadas regiões. Nesse sentido, estudos de avaliação multiambiente têm demonstrado que a estabilidade produtiva das plantações está diretamente relacionada à capacidade dos genótipos de manter

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

desempenho consistente diante de variações climáticas e edáficas (Ferreira et al., 2023; Munhoz et al., 2021).

A compreensão da interação genótipo × ambiente também tem implicações diretas para o planejamento do zoneamento genético e para a recomendação de materiais genéticos em escala regional. O zoneamento genético consiste na identificação de regiões com características ambientais semelhantes nas quais determinados genótipos apresentam desempenho superior e maior estabilidade produtiva. Essa abordagem permite otimizar a alocação de materiais genéticos e reduzir riscos associados à variabilidade climática, contribuindo para maior eficiência produtiva e maior sustentabilidade dos sistemas florestais (Oliveira et al., 2020; Queiroz et al., 2020).

Dessa forma, a integração entre adaptação genética ao estresse hídrico e análise da interação genótipo × ambiente constitui um elemento central para o desenvolvimento de estratégias de melhoramento genético voltadas à silvicultura em regiões sujeitas a elevada variabilidade climática. A seleção de genótipos tolerantes à seca, aliada à recomendação adequada de materiais genéticos para diferentes condições ambientais, representa uma estratégia fundamental para aumentar a resiliência das plantações de *Eucalyptus* e garantir a estabilidade produtiva em cenários climáticos futuros.

3.4 Respostas ecofisiológicas ao estresse climático

As respostas ecofisiológicas das plantas constituem um dos principais mecanismos de adaptação das espécies florestais frente às condições adversas impostas pelas mudanças climáticas, especialmente em ambientes caracterizados por elevada variabilidade hídrica e térmica. Em plantações de *Eucalyptus*, tais respostas envolvem ajustes fisiológicos que permitem às árvores manter o funcionamento metabólico mesmo sob condições de estresse ambiental. Entre os principais processos fisiológicos envolvidos destacam-se as trocas gasosas, o potencial hídrico foliar e a condutância estomática, parâmetros amplamente utilizados para avaliar a capacidade de adaptação das plantas ao déficit hídrico e às variações climáticas (Hubbard et al., 2020; Silva et al., 2017).

As trocas gasosas representam um indicador fundamental do funcionamento fisiológico das plantas, refletindo o equilíbrio entre assimilação de carbono, transpiração e disponibilidade hídrica. Em condições de estresse hídrico, a redução da disponibilidade de água no solo tende a provocar alterações na taxa fotossintética, na transpiração e na eficiência de uso da água. Estudos conduzidos com diferentes espécies e clones de *Eucalyptus* demonstram que materiais genéticos mais tolerantes ao estresse hídrico

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

apresentam maior capacidade de manter a atividade fotossintética e o equilíbrio das trocas gasosas mesmo sob condições de baixa disponibilidade hídrica, o que contribui para a manutenção do crescimento e da produtividade das plantações (Silva et al., 2017; Rubilar et al., 2020).

Outro parâmetro ecofisiológico amplamente utilizado para avaliar a resposta das plantas ao estresse climático é o potencial hídrico foliar, que expressa o estado hídrico dos tecidos vegetais e a capacidade das plantas de absorver e transportar água ao longo do sistema vascular. Em situações de déficit hídrico prolongado, o potencial hídrico tende a diminuir, refletindo maior tensão no sistema hidráulico das plantas. Entretanto, genótipos mais adaptados ao estresse hídrico apresentam maior capacidade de tolerar baixos valores de potencial hídrico sem comprometer o funcionamento fisiológico, o que indica maior resistência ao colapso hidráulico e maior estabilidade fisiológica em ambientes limitantes (Ferraresso et al., 2020; Luis et al., 2022).

A condutância estomática também desempenha papel central na regulação das trocas gasosas e na adaptação das plantas às condições de estresse hídrico. Esse parâmetro reflete o grau de abertura dos estômatos, estruturas responsáveis pelo controle da transpiração e da assimilação de dióxido de carbono. Em condições de déficit hídrico, muitas espécies florestais apresentam redução da condutância estomática como mecanismo de defesa, limitando a perda de água por transpiração. Em *Eucalyptus*, esse mecanismo de regulação estomática tem sido amplamente documentado, sendo considerado uma estratégia fisiológica importante para aumentar a eficiência no uso da água e reduzir os efeitos do estresse hídrico sobre o metabolismo vegetal (Hubbard et al., 2020; Blackman et al., 2024).

Esses ajustes ecofisiológicos integram um conjunto mais amplo de estratégias de adaptação fisiológica que permitem às plantas sobreviver e manter níveis mínimos de funcionamento metabólico em ambientes sujeitos a condições climáticas adversas. Entre essas estratégias destacam-se alterações no balanço hídrico da planta, ajustes osmóticos, modificações na estrutura do sistema radicular e mudanças na alocação de carbono entre diferentes órgãos da planta. Esses mecanismos permitem que determinados genótipos mantenham maior estabilidade fisiológica mesmo em cenários de estresse climático prolongado, o que pode resultar em maior sobrevivência e melhor desempenho produtivo das plantações (Gándara et al., 2025; Liang et al., 2022).

Nesse contexto, a eficiência no uso da água emerge como um atributo ecofisiológico particularmente relevante para a adaptação das plantações florestais em

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

regiões caracterizadas por déficit hídrico sazonal, como o Cerrado brasileiro. A eficiência no uso da água refere-se à relação entre a quantidade de carbono assimilado pela planta e a quantidade de água perdida por transpiração. Genótipos com maior eficiência no uso da água conseguem produzir maior quantidade de biomassa por unidade de água consumida, o que representa uma vantagem adaptativa significativa em ambientes com disponibilidade hídrica limitada. Estudos demonstram que diferentes clones de *Eucalyptus* apresentam variações substanciais nesse atributo, reforçando a importância da seleção genética de materiais mais eficientes em condições de estresse hídrico (Rubilar et al., 2020; Hubbard et al., 2020).

Por fim, a combinação desses mecanismos ecofisiológicos influencia diretamente a capacidade de sobrevivência das plantas em ambientes limitantes. Em cenários de mudanças climáticas, caracterizados por maior frequência de eventos extremos e maior irregularidade na disponibilidade hídrica, a sobrevivência das plantações florestais dependerá cada vez mais da capacidade das espécies e clones de ajustar seu funcionamento fisiológico às novas condições ambientais. Dessa forma, o entendimento das respostas ecofisiológicas ao estresse climático torna-se fundamental para orientar programas de melhoramento genético e estratégias de manejo silvicultural voltadas à adaptação das plantações de *Eucalyptus* às condições climáticas futuras (Blackman et al., 2024; Luis et al., 2022).

3.5 Produtividade florestal sob condições de estresse climático e ferramentas modernas de seleção genética

A produtividade florestal em plantações comerciais de *Eucalyptus* é fortemente influenciada pelas condições ambientais, especialmente pela disponibilidade hídrica e pelas variações climáticas que afetam os processos fisiológicos e o crescimento das árvores. Em regiões tropicais sazonais, como o Cerrado brasileiro, o estresse hídrico constitui um dos principais fatores limitantes da produtividade florestal, podendo reduzir significativamente o crescimento em altura, diâmetro e volume de madeira das plantações. A magnitude desses impactos, entretanto, depende tanto das características do ambiente quanto do material genético utilizado, uma vez que diferentes genótipos apresentam níveis distintos de tolerância às condições de estresse climático (Rubilar et al., 2020; Queiroz et al., 2020).

A redução da disponibilidade hídrica pode comprometer processos fisiológicos fundamentais, como fotossíntese, transporte de água e assimilação de carbono, resultando

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

em diminuição da produção de biomassa e da produtividade volumétrica das plantações. Em cenários de déficit hídrico prolongado, as árvores podem apresentar redução do incremento em diâmetro e altura, além de maior suscetibilidade à mortalidade e ao ataque de pragas e doenças. Nesse contexto, a manutenção da produtividade florestal depende da capacidade das espécies e clones de *Eucalyptus* de manter desempenho relativamente estável mesmo sob condições ambientais limitantes (Silva et al., 2022; Hubbard et al., 2020).

Apesar das limitações impostas pelo estresse climático, estudos indicam que determinadas espécies e clones de *Eucalyptus* apresentam elevada capacidade de adaptação a ambientes com disponibilidade hídrica restrita, mantendo níveis satisfatórios de crescimento e produtividade. Essa adaptabilidade está associada à interação entre características genéticas e respostas ecofisiológicas que permitem às plantas ajustar seu metabolismo e otimizar o uso dos recursos disponíveis. Dessa forma, a seleção de materiais genéticos mais adaptados às condições ambientais específicas tem sido considerada uma estratégia fundamental para reduzir os efeitos negativos do estresse climático sobre a produtividade florestal (Mueller et al., 2019; Gándara et al., 2025).

Nesse cenário, o avanço das ferramentas modernas de seleção genética tem desempenhado papel decisivo na otimização dos programas de melhoramento de *Eucalyptus*. Tradicionalmente, a seleção de genótipos superiores baseava-se principalmente na avaliação fenotípica de características relacionadas ao crescimento e à qualidade da madeira. Contudo, o desenvolvimento de novas abordagens baseadas em genética quantitativa e biologia molecular tem permitido aumentar a precisão e a eficiência dos processos de seleção, acelerando o desenvolvimento de materiais genéticos mais produtivos e adaptados a diferentes condições ambientais (Balocchi et al., 2023; Ferreira et al., 2023).

Entre as ferramentas mais promissoras destaca-se a seleção genômica, que utiliza marcadores moleculares distribuídos ao longo do genoma para prever o desempenho de genótipos antes mesmo da avaliação em campo. Essa abordagem permite reduzir o tempo necessário para o desenvolvimento de novos materiais genéticos e aumentar a acurácia das estimativas de valor genético, contribuindo para maior eficiência dos programas de melhoramento florestal. Em espécies de *Eucalyptus*, a seleção genômica tem sido aplicada com sucesso na identificação de genótipos superiores para características relacionadas à produtividade, adaptação climática e qualidade da madeira (Balocchi et al., 2023).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

Outra abordagem inovadora que vem ganhando destaque nos programas de melhoramento florestal é a integração de modelos multiambiente e análises baseadas em dados ambientais, conhecida como enviromics. Essa estratégia combina informações genéticas e ambientais para prever o desempenho de diferentes genótipos em múltiplas condições de sítio, permitindo otimizar a recomendação clonal e aumentar a estabilidade produtiva das plantações. Estudos recentes demonstram que a integração entre genética e variáveis ambientais pode melhorar significativamente a capacidade de previsão do desempenho de clones de *Eucalyptus*, contribuindo para a seleção de materiais mais adaptados às condições climáticas específicas de cada região (Paludeto et al., 2026; Ferreira et al., 2023).

Além disso, o uso de modelos estatísticos avançados que consideram simultaneamente múltiplos caracteres e múltiplos ambientes tem permitido identificar genótipos com alto desempenho produtivo e maior estabilidade frente às variações ambientais. Esses modelos são particularmente importantes em cenários de mudanças climáticas, nos quais a variabilidade ambiental tende a aumentar, exigindo materiais genéticos capazes de manter desempenho consistente em diferentes condições de crescimento (Ferreira et al., 2023; Li et al., 2024).

Dessa forma, a integração entre conhecimento ecofisiológico, análise da interação genótipo × ambiente e ferramentas modernas de seleção genética representa um avanço significativo para o desenvolvimento de sistemas florestais mais produtivos e resilientes. Em regiões sujeitas a estresse climático, como o Cerrado brasileiro, a adoção dessas estratégias torna-se essencial para garantir a sustentabilidade da produção florestal, permitindo a seleção de genótipos capazes de manter altos níveis de produtividade mesmo em cenários climáticos cada vez mais desafiadores.

3.6 Implicações econômicas da adaptação genética

A adaptação genética de espécies florestais às condições ambientais constitui um dos principais fatores que influenciam a sustentabilidade econômica da silvicultura moderna. No caso das plantações de *Eucalyptus*, amplamente utilizadas na produção de madeira industrial, celulose e biomassa energética, os avanços no melhoramento genético têm contribuído significativamente para o aumento da produtividade e para a redução dos riscos associados às variações climáticas. A seleção de genótipos mais adaptados às condições ambientais específicas permite aumentar o rendimento das plantações e reduzir perdas associadas a estresses abióticos, como déficit hídrico, altas temperaturas e

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

irregularidade no regime de chuvas, fatores que têm se tornado mais frequentes em cenários de mudanças climáticas (Mueller et al., 2019; Rubilar et al., 2020; Silva et al., 2022).

Do ponto de vista econômico, os ganhos de produtividade decorrentes do melhoramento genético representam um dos principais mecanismos de geração de valor na silvicultura de *Eucalyptus*. Estudos indicam que a seleção de clones superiores pode resultar em aumentos expressivos no incremento médio anual (IMA) e na produção volumétrica de madeira, elevando a eficiência do uso da terra e ampliando a rentabilidade das plantações florestais (Oliveira et al., 2020; Ferreira et al., 2023). Em ambientes com maior limitação hídrica ou variabilidade climática, esses ganhos tornam-se ainda mais relevantes, uma vez que a adaptação genética dos materiais plantados pode determinar a viabilidade produtiva dos sistemas florestais (Queiroz et al., 2020; Loiola et al., 2025).

Além do aumento da produtividade, a adaptação genética também desempenha papel fundamental na redução do risco produtivo, aspecto diretamente relacionado à avaliação econômica de projetos florestais. Genótipos com maior tolerância ao estresse hídrico, maior eficiência no uso da água e maior estabilidade fisiológica apresentam menor probabilidade de falhas de estabelecimento ou perdas de crescimento em anos climaticamente adversos. Essa maior estabilidade produtiva contribui para reduzir a incerteza associada ao desempenho das plantações e aumentar a previsibilidade do retorno financeiro dos investimentos florestais (Hubbard et al., 2020; Gándara et al., 2025; Blackman et al., 2024).

Outro aspecto relevante refere-se à estabilidade produtiva ao longo do ciclo florestal, fator essencial para a viabilidade econômica da silvicultura comercial. A presença de interação genótipo × ambiente (G×E) indica que o desempenho produtivo dos materiais genéticos depende das condições ambientais do sítio, o que reforça a importância da seleção de genótipos capazes de manter desempenho consistente em diferentes ambientes. Estudos que analisam testes multiambiente demonstram que a escolha de materiais geneticamente estáveis contribui para reduzir a variabilidade da produção e aumentar a segurança econômica dos sistemas florestais (Munhoz et al., 2021; Li et al., 2024).

Sob a perspectiva da cadeia produtiva florestal, a adaptação genética também contribui para garantir o suprimento contínuo de matéria-prima para setores industriais dependentes da produção florestal, como as indústrias de celulose, papel, energia e produtos de madeira sólida. Plantios mais produtivos e resilientes permitem maior

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

regularidade no fornecimento de madeira e maior eficiência logística e industrial, fatores que fortalecem a competitividade do setor florestal. Nesse contexto, a produtividade elevada de plantações de *Eucalyptus* no Brasil tem sido associada diretamente aos avanços obtidos nos programas de melhoramento genético e manejo silvicultural (André et al., 2021; Bilik et al., 2025).

A adoção de materiais genéticos superiores também pode contribuir para reduzir custos operacionais e aumentar a eficiência do uso dos recursos naturais. Genótipos com maior crescimento e maior eficiência no uso da água e de nutrientes podem demandar menor intensidade de manejo e menor necessidade de intervenções corretivas, aumentando a eficiência econômica e ambiental dos sistemas produtivos. Dessa forma, o melhoramento genético não apenas amplia a produtividade das plantações, mas também contribui para otimizar o uso dos insumos e melhorar a eficiência global da produção florestal (Balocchi et al., 2023; Paludeto et al., 2026).

Apesar dessas evidências, a literatura científica ainda apresenta limitações importantes na integração entre parâmetros genéticos e análises econômicas formais. A maioria dos estudos concentra-se na avaliação de parâmetros genéticos, ecofisiológicos ou produtivos, enquanto as implicações econômicas da adaptação genética são frequentemente discutidas de forma indireta ou inferencial. Trabalhos que integram explicitamente modelos econômicos, como análise de fluxo de caixa ou comparação entre diferentes estratégias de manejo e material genético, ainda são relativamente escassos na literatura florestal (Dvorak, 2012; Whittock et al., 2004).

Nesse sentido, a integração entre genética florestal e economia aplicada representa uma agenda de pesquisa relevante para o avanço do conhecimento na área. A incorporação de modelos que considerem simultaneamente ganhos genéticos, variabilidade climática e desempenho produtivo pode contribuir para estimar com maior precisão o valor econômico da adaptação genética em sistemas florestais. Além disso, o desenvolvimento de modelos de simulação que integrem dados genéticos, variáveis ambientais e projeções climáticas poderá fornecer subsídios importantes para o planejamento estratégico da produção florestal em cenários de mudanças climáticas (Ferreira et al., 2023; Paludeto et al., 2026).

Dessa forma, embora a literatura científica evidencie de forma consistente que a adaptação genética contribui para o aumento da produtividade e da resiliência das plantações de *Eucalyptus*, ainda são necessários estudos que explorem de maneira mais aprofundada as implicações econômicas desses avanços tecnológicos. A integração entre

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

genética florestal, ecofisiologia, modelagem climática e análise econômica poderá ampliar a compreensão sobre os benefícios econômicos da adaptação genética e contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes e sustentáveis para a silvicultura em ambientes sujeitos à crescente variabilidade climática.

5. Resultados e Discussão

A análise dos estudos selecionados revelou que a adaptação genética de *Eucalyptus* ao estresse climático constitui um eixo estruturante para a manutenção da produtividade florestal em ambientes com elevada variabilidade hídrica, como o Cerrado brasileiro. A triangulação da literatura permitiu identificar convergência entre estudos ecofisiológicos, genéticos e silviculturais ao demonstrar que a resposta das plantações às mudanças climáticas não depende exclusivamente da intensidade do estresse ambiental, mas sobretudo da interação entre o material genético empregado, as características do sítio e a capacidade fisiológica de ajuste das plantas. Nesse sentido, o corpus analisado indica que a adaptação genética deve ser compreendida não apenas como um atributo biológico, mas como uma estratégia técnica de redução de vulnerabilidade produtiva em contextos de crescente instabilidade climática, especialmente quando associada a práticas de recomendação clonal e zoneamento genético mais precisas, permitindo maior resiliência do sistema produtivo florestal (Dvorak, 2012; Mueller et al., 2019; Rubilar et al., 2020; Hubbard et al., 2020; Queiroz et al., 2020).

Os resultados evidenciam que o estresse hídrico permanece como o principal fator limitante da produtividade de plantações de *Eucalyptus* em ambientes tropicais sazonais, afetando direta e indiretamente variáveis fisiológicas e morfométricas associadas ao crescimento. A literatura revisada mostra que a redução da água disponível no solo compromete processos essenciais, como assimilação de carbono, transporte hídrico e manutenção do turgor celular, resultando em menor incremento em altura, diâmetro e volume de madeira. Entretanto, a intensidade desses efeitos não é uniforme entre materiais genéticos, uma vez que clones mais tolerantes conseguem manter maior estabilidade fisiológica e melhor desempenho produtivo mesmo sob condições de seca prolongada. Essa evidência reforça a noção de que a produtividade florestal sob mudanças climáticas deve ser interpretada como expressão fenotípica de uma interação complexa entre ambiente restritivo e capacidade adaptativa dos genótipos, e não apenas como resposta passiva ao déficit hídrico (Silva et al., 2017; Rubilar et al., 2020; Ferraresso et al., 2020; Luis et al., 2022; Blackman et al., 2024).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

Na triangulação dos estudos sobre adaptação genética, observa-se consenso quanto ao fato de que a tolerância à seca está associada a um conjunto integrado de mecanismos morfofisiológicos, dentre os quais se destacam maior eficiência no uso da água, regulação estomática mais eficiente, manutenção das trocas gasosas em condições de restrição hídrica e maior resistência ao colapso hidráulico. Trabalhos centrados em fisiologia vegetal mostraram que clones tolerantes tendem a apresentar condutância estomática mais ajustada, menor perda de água por transpiração e maior capacidade de manter o metabolismo fotossintético em níveis operacionais mesmo em cenários de forte limitação hídrica. Quando esses achados são confrontados com estudos de desempenho em campo, percebe-se que tais atributos ecofisiológicos não são apenas indicadores laboratoriais, mas mecanismos com repercussão concreta sobre sobrevivência, crescimento e estabilidade produtiva, tornando-se, portanto, relevantes para os programas de melhoramento florestal voltados à adaptação climática (Silva et al., 2017; Hubbard et al., 2020; Ferraresso et al., 2020; Luis et al., 2022; Liang et al., 2022; Gándara et al., 2025).

Outro resultado importante da revisão foi a confirmação de que a interação genótipo × ambiente representa um componente central na explicação da variabilidade do desempenho de *Eucalyptus* em diferentes regiões de cultivo. Os estudos multiambiente analisados mostram que não há superioridade genética absoluta desvinculada do contexto ambiental, de modo que clones altamente produtivos em um ambiente podem apresentar redução significativa de desempenho em outro. Essa constatação desloca o foco do melhoramento genético de uma lógica exclusivamente baseada em médias gerais para abordagens mais refinadas, orientadas à estabilidade produtiva, adaptabilidade específica e recomendação regionalizada de materiais genéticos. Assim, a interação G×E não deve ser vista como obstáculo metodológico, mas como informação estratégica para orientar o zoneamento genético e ampliar a eficiência da implantação florestal em ambientes climaticamente heterogêneos (Mueller et al., 2019; Oliveira et al., 2020; Munhoz et al., 2021; Ferreira et al., 2023; Li et al., 2024).

A literatura também mostrou que o melhoramento genético de *Eucalyptus* evoluiu substancialmente de modelos tradicionais centrados em seleção fenotípica para abordagens mais integradas, que combinam genética quantitativa, seleção genômica, análise multiambiente e uso de variáveis ambientais. Esse avanço metodológico amplia a capacidade de identificar genótipos não apenas mais produtivos, mas também mais estáveis e responsivos às restrições climáticas. Nesse cenário, ferramentas como seleção genômica e enviromics têm sido apontadas como particularmente promissoras, pois

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

permitem prever desempenho em diferentes contextos ambientais e reduzir o tempo necessário para incorporação de novos materiais aos programas operacionais. A convergência entre esses estudos sugere que a nova fronteira do melhoramento genético florestal não está apenas na obtenção de maiores ganhos de crescimento, mas na construção de sistemas de recomendação genética adaptativa, capazes de responder com maior precisão aos desafios impostos pela variabilidade climática (Balocchi et al., 2023; Ferreira et al., 2023; Li et al., 2024; Paludeto et al., 2026).

Do ponto de vista silvicultural, os estudos revisados indicam que a adaptação genética possui implicações diretas na manutenção da produtividade em áreas com restrição hídrica, especialmente quando associada à adequação do material genético às condições edafoclimáticas locais. Em vez de depender exclusivamente de incrementos de manejo para compensar limitações ambientais, a literatura sugere que a escolha do genótipo passa a ocupar papel tão ou mais decisivo que o próprio pacote silvicultural. Isso é particularmente relevante para o Cerrado, onde a sazonalidade climática, a irregularidade das chuvas e os solos frequentemente limitantes impõem elevada pressão seletiva sobre os materiais plantados. Nesse contexto, os estudos convergem ao indicar que a recomendação correta de clones pode mitigar perdas de produtividade, ampliar a eficiência do uso dos recursos ambientais e reduzir a exposição do sistema florestal a falhas de estabelecimento e crescimento (Queiroz et al., 2020; Oliveira et al., 2020; André et al., 2021; Silva et al., 2022; Stape; Alvares, 2025).

A discussão dos resultados também evidencia que a produtividade de *Eucalyptus* sob estresse climático não pode ser interpretada apenas em termos de volume de madeira, mas deve incorporar a noção de estabilidade produtiva. Em ambientes sujeitos à oscilação climática, não basta selecionar materiais com alto potencial produtivo em anos favoráveis; torna-se prioritário identificar genótipos capazes de manter rendimento relativamente consistente sob diferentes cenários ambientais. Essa mudança de enfoque é particularmente importante para a sustentabilidade da produção florestal, pois a instabilidade interanual do desempenho representa risco técnico e econômico para toda a cadeia produtiva. Assim, estabilidade passa a ser atributo estratégico, aproximando os objetivos do melhoramento genético das demandas reais da silvicultura empresarial em cenários de mudança do clima (Mueller et al., 2019; Munhoz et al., 2021; Ferreira et al., 2023; Li et al., 2024).

No plano econômico, os resultados da revisão mostram que a adaptação genética exerce influência indireta, porém consistente, sobre a rentabilidade e a competitividade da

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

silvicultura. Embora poucos estudos tratem explicitamente de métricas econômicas, a triangulação dos achados permite inferir que maiores níveis de produtividade, menor mortalidade, melhor adequação ao ambiente e maior previsibilidade de desempenho se traduzem em redução de risco e aumento de retorno econômico. A produtividade volumétrica elevada, quando combinada com estabilidade de rendimento, impacta positivamente a oferta de matéria-prima para cadeias como celulose, energia, painéis e madeira sólida, fortalecendo a eficiência logística e industrial do setor. Assim, mesmo quando a literatura não explicita indicadores como VPL, TIR ou custo evitado, os estudos convergem ao demonstrar que a adaptação genética possui valor econômico intrínseco, por reduzir perdas, ampliar a segurança produtiva e sustentar a competitividade da produção florestal em ambientes restritivos (Whittock et al., 2004; Dvorak, 2012; André et al., 2021; Bilik et al., 2025; Paludeto et al., 2026).

A análise integrada dos estudos também sugere que a adaptação genética de *Eucalyptus* deve ser interpretada como componente da bioeconomia florestal, uma vez que sustenta a produção renovável de biomassa e madeira em cenários de crescente pressão climática. O fortalecimento dessa base produtiva tem implicações que transcendem a escala do talhão, influenciando o fornecimento industrial, a competitividade internacional da celulose brasileira e a capacidade do setor de responder a demandas por matérias-primas renováveis. Nesse aspecto, o melhoramento genético aparece como elo entre ciência florestal, sustentabilidade produtiva e eficiência econômica, reforçando a ideia de que o avanço genético não é apenas uma inovação técnica, mas um ativo estratégico para a cadeia florestal contemporânea (Li et al., 2022; Ferreira et al., 2023; Balocchi et al., 2023; Bilik et al., 2025;).

Apesar da robustez dos achados, a revisão também revelou limitações importantes na literatura disponível. A principal delas reside na dissociação ainda frequente entre estudos genéticos e estudos econômicos. Grande parte dos trabalhos concentra-se em parâmetros como crescimento, sobrevivência, herdabilidade, resposta fisiológica ou estabilidade genotípica, mas raramente converte esses resultados em métricas econômicas objetivas. Como consequência, a literatura oferece forte base para inferir benefícios produtivos da adaptação genética, mas ainda apresenta lacunas na quantificação de seus efeitos sobre rentabilidade, custo de oportunidade, mitigação de risco financeiro ou retorno sobre investimento em programas de melhoramento. Tal lacuna limita a tradução dos resultados científicos em instrumentos mais robustos de tomada de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

decisão para o setor florestal (Whittock et al., 2004; Dvorak, 2012; Ferreira et al., 2023; Paludeto et al., 2026).

Diante disso, uma das principais agendas futuras apontadas pela triangulação da literatura é a necessidade de integração entre genética florestal, modelagem climática aplicada e economia da produção florestal. A incorporação de cenários climáticos futuros aos modelos de recomendação genética, associada à quantificação de ganhos econômicos decorrentes da adaptação, pode representar um avanço decisivo para a silvicultura de *Eucalyptus* em regiões como o Cerrado. Estudos que articulem dados de crescimento, atributos ecofisiológicos, informações ambientais e indicadores econômicos poderão oferecer base mais sólida para estimar o valor real da adaptação genética em contextos de mudança do clima. Nessa perspectiva, o futuro da pesquisa não parece residir apenas em selecionar materiais mais produtivos, mas em construir modelos preditivos integrados capazes de orientar, simultaneamente, a decisão genética, o planejamento silvicultural e a gestão econômica do risco climático (Queiroz et al., 2020; Ferreira et al., 2023; Li et al., 2024; Paludeto et al., 2026).

Em síntese, os resultados desta revisão indicam que a adaptação genética de *Eucalyptus* ao estresse climático constitui um fator decisivo para a manutenção da produtividade, da estabilidade e da viabilidade econômica da silvicultura em ambientes de Cerrado. A convergência entre estudos de ecofisiologia, genética quantitativa, seleção multiambiente e desempenho silvicultural demonstra que a resposta às mudanças climáticas depende, em grande medida, da capacidade de selecionar e recomendar materiais genéticos compatíveis com a variabilidade ambiental. Assim, a adaptação genética deixa de ser um tema restrito ao melhoramento florestal e passa a assumir papel central no planejamento estratégico da produção, na redução de vulnerabilidades e na sustentação da competitividade da cadeia florestal frente aos desafios climáticos contemporâneos (Rubilar et al., 2020; Hubbard et al., 2020; Oliveira et al., 2020; Ferreira et al., 2023; Gándara et al., 2025; Paludeto et al., 2026).

4. Considerações Finais

Conclui-se que as mudanças climáticas, caracterizadas principalmente pelo aumento da temperatura média global, maior irregularidade no regime de precipitação e intensificação de eventos extremos, representam um dos principais desafios para a sustentabilidade dos sistemas florestais produtivos. Nesse contexto, os resultados da literatura convergem ao demonstrar que a seleção de genótipos adaptados ao déficit

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

hídrico, associada à compreensão da interação genótipo × ambiente e às respostas ecofisiológicas das plantas, constitui estratégia central para manter a produtividade das plantações.

Os estudos analisados indicam que clones com maior eficiência no uso da água, maior estabilidade fisiológica e maior plasticidade fenotípica apresentam desempenho superior em ambientes sujeitos a restrições climáticas, contribuindo para maior resiliência e estabilidade produtiva das plantações florestais.

Além disso, os achados da literatura demonstram que os avanços no melhoramento genético, aliados ao uso de ferramentas modernas de seleção, como seleção genômica, modelos multiambiente e abordagens baseadas em “genética x ambiente x modelagem preditiva”, têm ampliado significativamente a capacidade de identificar e recomendar materiais genéticos mais adaptados às condições ambientais específicas. Tais avanços contribuem não apenas para o aumento da produtividade florestal, mas também para a redução de riscos produtivos e para a estabilidade econômica da cadeia florestal.

Contudo, a literatura ainda apresenta lacunas relevantes quanto à quantificação direta dos impactos econômicos da adaptação genética, evidenciando a necessidade de estudos que integrem genética florestal, ecofisiologia e modelagem econômica em cenários de mudança climática. Dessa forma, recomenda-se que futuras pesquisas avancem na construção de modelos integrados que permitam estimar os ganhos econômicos associados à adoção de genótipos adaptados, bem como no desenvolvimento de estratégias de zoneamento genético e planejamento silvicultural que ampliem a sustentabilidade e a competitividade da silvicultura de *Eucalyptus* em ambientes sujeitos à crescente variabilidade climática.

Referências

ANDRE, J.; OLIVEIRA, R.; SETTE, C.; ALFENAS, A.; ZAUZA, E.; DE S, L.; NOVAES, E. Wood volume of *Eucalyptus* clones established under different spacings in the Brazilian Cerrado. **Forest science**, v. 67, 2021. DOI: https://doi.org/10.1093/forsci/fxab016

ARUNKUMAR, A.; CHAUHAN, S. Non-destructive selection of genotypes with better wood properties from morphologically superior genotypes of *Eucalyptus* pellita**. Current Science,** Bengaluru, v. 118, n. 12, p. 1953–1958, 2020. DOI: https://doi.org/10.18520/cs/v118/i12/1953-1958

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

BALOCCHI, C.; DURÁN, R.; NÚÑEZ, P.; ORDÓÑEZ, J.; RAMÍREZ, M.; ZAPATA-VALENZUELA, J. Genomic selection: an effective tool for operational *Eucalyptus* globulus clonal selection. **Tree Genetics & Genomes,** Berlin, v. 19, n. 3, art. 33, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s11295-023-01609-7

BILIK, A.; TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; ANGELO, H. Technological potential of *Eucalyptus* dunnii wood from different fertilization and genetic sources for the production of edge-glued panels. **Maderas: Ciencia y Tecnología,** Concepción, v. 27, p. e2727, 2025. DOI: https://doi.org/10.22320/s0718221x/2025.27

BLACKMAN, C. J.; HALLIWELL, B.; BRODRIBB, T. J. All together now: a mixed-planting experiment reveals adaptive drought tolerance in seedlings of 10 *Eucalyptus* species. **Plant Physiology**, Oxford, v. 197, n. 2, p. 1324–1338, 2024. DOI: https://doi.org/10.1093/plphys/kiae63

CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; HUBBARD, R. M.; STAHL, J. A.; MOREIRA, G. G.; MORAES, L. F.; STAPE, J. L.; LUIZ, L. F. Climate and genotype influences on carbon fluxes and partitioning in *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management,** Amsterdam, v. 475, p. 118445, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118445

DVORAK, W. S. Water use in plantations of eucalypts and pines: a discussion paper from a tree breeding perspective. **International Forestry Review**, Wallingford, v. 14, n. 1, p. 110–120, 2012. DOI: https://doi.org/10.1505/146554812799973118

FERRARESSO, C. J.; ALMEIDA, M. R.; PAULA, R. C.; QUEIROZ, T. B.; HAKAMADA, R. E.; MAEDA, E.; HUBBARD, R. M. Quantifying turgor loss point and leaf water potential across contrasting *Eucalyptus* clones and sites within the TECHS research platform. **Forest Ecology and Management,** Amsterdam, v. 475, p. 118454, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118454

FERREIRA, F. M.; CHAVES, S. F.; PEIXOTO, M. A. M.; ALVES, R. S.; COELHO, I. F.; RESENDE, M. D. V.; SANTOS, G. A.; BHERING, L. L. Multi-trait multi-environment models for selecting high-performance and stable *Eucalyptus* clones. Acta **Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 45, e61626, 2023. DOI: https://doi.org/10.4025/actasciagron.v45i1.61626

GÁNDARA, J.; NIÓN, M.; GONZÁLEZ-TÁLICE, J.; ROSS, S.; VILLAR, J.; FERNÁNDEZ, M. E. Similar but unique: physiological response to drought and growth of pure species and interspecific hybrid clones of *Eucalyptus*. **Trees,** v. 39, art. 36, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s00468-025-02609-x

HUBBARD, R. M.; CARNEIRO, R. L.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; FIGURA, M. A.; MOREIRA, G. G.; GONÇALVES, J. L. M. Contrasting water use of two *Eucalyptus* clones across a precipitation and temperature gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 475, p. 118407, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118407

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

KOMAKECH, C.; FOSSEY, A. Provenance variation, genetic parameters, and potential gains in *Eucalyptus* viminalis subsp. nobilis tested in two high-altitude cool temperate sites in the summer rainfall region of South Africa. **Southern Forests: A Journal of Forest Science**, Pretoria, v. 87, n. 1, p. 1–12, 2025. DOI: https://doi.org/10.2989/20702620.2024.2402705

LIANG, Y.; BAI, T.; LIU, B.; YU, W.; TENG, W. Different antioxidant regulation mechanisms in response to aluminum-induced oxidative stress in *Eucalyptus* species. **Ecotoxicology and Environmental Safety,** Amsterdam, v. 241, p. 113748, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113748

LI, M.; SHI, J.; LUO, J.; GAN, S. Progresses of *Eucalyptus* genetics and breeding studies in China [我国桉树遗传育种研究进展]. **Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)**, Nanjing, v. 46, n. 6, p. 41–50, 2022. DOI: https://doi.org/10.12302/j.issn.1000-2006.202206036

LI, G.; LU, Z.; YANG, D.; HU, Y.; XU, J. Age trends of genetic parameters and genotype-by-environment interactions for growth traits of *Eucalyptus* urophylla clones in South China. **PeerJ,** San Diego, v. 12, e18218, 2024. DOI: https://doi.org/10.7717/peerj.18218

LOIOLA, A.; PINHEIRO, E.; SOUZA, A.; SILVA, S.; SILVA, P.; HORA, A.; ARAÚJO, P. Influence of environmental factors on the survival and growth of *Eucalyptus* tereticornis provenances in the Brazilian semi-arid**. Forest Ecology and Management,** Amsterdam, v. 593, p. 122925, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122925

LUIS, J. U.; AGUAYO, P.; CONEJERA, D.; RUBILAR, R.; BALOCCHI, C.; VALENZUELA, S. Transcriptomic response in foliar and root tissues of a drought-tolerant *Eucalyptus* globulus genotype under drought stress. **Trees,** Berlin, v. 36, n. 2, p. 567–582, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s00468-021-02241-5

MUELLER, D. S. P.; BRUNE, A.; ALVARES, C. A.; ALCARDE, A. B.; ALMEIDA, W. S.; TEIXEIRA, M. D. M.; GRATTAPAGLIA, D.; PEREIRA, R. D. Selecting for stable and productive families of *Eucalyptus* urophylla across a country-wide range of climates in Brazil. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 49, n. 7, p. 792–801, 2019. DOI: https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0052

MUNHOZ, L. F.; SANTOS, O. P.; ROSA, R. A.; TEIXEIRA, B. V.; TAMBARUSSI, E. V. Genetic control of productivity and genotype-by-environment interaction for *Eucalyptus* dorrigoensis in southern Brazil. **Cerne**, Lavras, v. 27, n. 1, e-2594, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/01047760202127012594

OLIVEIRA, R. A.; GONÇALVES, R. C.; NERES, D. C.; MARTINS, A. P.; RIBEIRO, D. L.; SILVA, L.; VALVERDE, E. Z.; GUEDES, A. C.; FIORAVANTE, C. R.; APARECIDA, A.; ALFENAS, A. C.; NOVAES, E. Evaluation of genetic parameters and clonal selection of *Eucalyptus* in the Cerrado region. **Crop Breeding and**

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

Applied Biotechnology, Viçosa, v. 20, n. 3, e32702035, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/1984-70332020v20n3a35

PALUDETO, J. G.; MARCATTI, G. E.; ESTOPA, R. A.; KLAPŠTĚ, J.; BESPALHOK-FILHO, J. C.; RESENDE, R. T. Integrating enviromics to predict performance and guide clonal deployment in *Eucalyptus* spp. **Forest Ecology and Management,** Amsterdam, v. 608, p. 123604, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2026.123604

QUEIROZ, T. B.; CAMPOE, O. C.; MONTES, C. R.; RODRIGUES, R. R.; ALVARES, C. A.; CUARTAS, L. A.; GUERRINI, I. A. Temperature thresholds for *Eucalyptus* genotypes growth across tropical and subtropical ranges in South America. **Forest Ecology and Management,** Amsterdam, v. 472, p. 118248, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118248

RUBILAR, R. A.; HUBBARD, R. M.; EMHART, V.; MARDONES, O.; QUEZADA, J.; MEDINA, A.; VALENZUELA, H.; ESPINOZA, J.; BURGOS, Y.; BOZO, D. Climate and water availability impacts on early growth and growth efficiency of *Eucalyptus* genotypes: the importance of G×E interactions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 458, p. 117763, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117763

ROJAS, P.; IPINZA, R.; GUTIÉRREZ, B.; MOLINA, M.; ARNOLD, R. Breeding *Eucalyptus* globulus for lower rainfall sites in the Bio-Bío region of Chile. **Australian Forestry,** Canberra, v. 80, n. 2, p. 111–118, 2017. DOI: https://doi.org/10.1080/00049158.2017.1319260

SILVA, M.; RUBILAR, R.; ESPINOZA, J.; YÁÑEZ, M.; EMHART, V.; QUEZADA, J. Gas-exchange response and survival of young *Eucalyptus* spp. commercial genotypes under water stress. **Bosque,** Concepción, v. 38, n. 1, p. 45–53, 2017. DOI: https://doi.org/10.4067/S0717-92002017000100009

SILVA, V. F.; BUZZETTI, S.; MONTANARI, R.; PANOSSO, A. R.; DIAS, M. S.; SILVA, J. A. Influence of the climate on productivity and the *Eucalyptus* drought response and a proposal for maximizing wood productivity as a function of soil attributes in Brazil. **Ciência Florestal,** Santa Maria, v. 32, n. 3, p. 1290–1306, 2022. DOI: https://doi.org/10.5902/1980509832690

STAPE, J. L.; ALVARES, C. A. Water table depth contributes to tropical *Eucalyptus* plantation yields in sandstone-derived landscapes. **Forest Ecology and Management,** Amsterdam, v. 589, p. 122771, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122771

TADIYA, R.; BARTHWAL, S.; GINWAL, H. S.; SINGH, H. H.; SINGH, F. Integrative leaf transcriptomic and physiological insights into salt stress responses in *Eucalyptus*: a comparative analysis of two contrasting clones. **Plant Gene**, Amsterdam, v. 44, p. 100551, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.plgene.2025.100551

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 07/03/2026 - **Accepted:** 08/03/2026
Vol: 13.02
DOI: 10.66104/vx749p90
Pages: 1-31

WHITTOCK, S. P.; GREAVES, B. L.; APIOLAZA, L. A. A cash flow model to compare coppice and genetically improved seedling options for *Eucalyptus* globulus pulpwood plantations. **Forest Ecology and Management,** Amsterdam, v. 191, n. 1–3, p. 267–274, 2004. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.12.013