

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Produtividade e estado nutricional em plantações de eucalipto em função de
variáveis edafoclimáticas**

Alvaro Andres Ramirez Palacio

Dissertação apresentada para a obtenção do título de
Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba
2021**

Alvaro Andres Ramirez Palacio
Engenheiro Florestal

Produtividade e estado nutricional em plantações de eucalipto em função de variáveis edafoclimáticas

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. **JOSÉ LEONARDO DE MORAES GONÇALVES**

Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais.
Opção em: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Ramirez Palacio, Alvaro Andres

Produtividade e estado nutricional em plantações de eucalipto em função de variáveis edafoclimáticas / Alvaro Andres Ramirez Palacio. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2021.

112 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Produção de *Eucalyptus* 2. Déficit hídrico 3. Nutrição florestal 4. Diagnose nutricional I. Título

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Gloria e Alvaro, pelo incentivo e inspiração.

Toda conquista minha é também de vocês.

A minha companheira, Mariana, pelo apoio, amor e paciência.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao Professor José Leonardo de Moraes Gonçalves, pela oportunidade e pelos ensinamentos;

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), à Universidade de São Paulo, ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais e a todos os professores e funcionários que contribuíram com a minha formação profissional;

Ao Programa Temático de Silvicultura e Manejo (PTSM) do IPEF, e ao seu coordenador, Alexandre de Vicente Ferraz, pelo apoio logístico e financeiro;

Ao Marcos Sandro Felipe (Eucatex), ao Rodolfo Costa (Vallourec) e ao James Stahl (Klabin), pelo suporte nos trabalhos de campo, por disponibilizar as informações necessárias para a condução dos estudos e pela troca de experiências;

Ao Ronaldo Silveira pelo incentivo, os ensinamentos e a amizade. A todos meus amigos da RR Agroflorestal pelos bons momentos que dividimos na minha passagem pela equipe;

Aos estagiários do PTSM, em especial à Vitoria Festucci, pelo imenso apoio nas atividades de campo e de laboratório. Também ao Bruno Horst, ao Rafael Monteleone e à Isabella Barbosa, que tiveram participação importante no projeto;

Aos meus amigos do PTSM, Liamara Masullo, Andressa Ávila, Adam Cruz, Amanda Segtowich, Ivanka Rosada, Antônio Florentino e Maria Isabel Higueta, pela convivência, amizade e companheirismo.

Ao Raúl Poppiel, ao Marcos Busanello, ao Geovanne Malatesta, e aos demais amigos que, de alguma forma, fizeram contribuições ao trabalho.

Muito obrigado!

EPÍGRAFE

*“Quanto mais aumenta nosso conhecimento,
mais evidente fica nossa ignorância”.*

John F. Kennedy

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	10
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	11
Referências.....	12
2. RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E ATRIBUTOS DO SOLO COM A PRODUTIVIDADE E O ESTADO NUTRICIONAL DE PLANTAÇÕES CLONAIIS DE EUCALIPTO	15
Resumo.....	15
Abstract	15
2.1. Introdução	16
2.2. Material e Métodos	;Error! Marcador no definido.
2.2.1. Localização das áreas de estudo.....	;Error! Marcador no definido.
2.2.2. Seleção das áreas de estudo	;Error! Marcador no definido.
2.2.3. Caracterização climática	;Error! Marcador no definido.
2.2.4. Caracterização edáfica	;Error! Marcador no definido.
2.2.5. Histórico de manejo	;Error! Marcador no definido.
2.2.6. Avaliações dendrométricas	;Error! Marcador no definido.
2.2.7. Avaliação do estado nutricional.....	;Error! Marcador no definido.
2.2.8. Análises estatísticas e modelagem matemática.....	;Error! Marcador no definido.
2.3. Resultados	;Error! Marcador no definido.
2.3.1. Clima no período de crescimento das árvores e atributos do solo	;Error!
Marcador no definido.	
2.3.2. Produtividade e estado nutricional das árvores.....	;Error! Marcador no definido.
2.3.3. Relações entre a produtividade, o estado nutricional e o clima;	Error! Marcador no definido.
no definido.	
2.3.4. Relações entre a produtividade e os atributos do solo;	Error! Marcador no definido.
definido.	
2.3.5. Relação entre a produtividade e os teores nutricionais foliares;	Error! Marcador no definido.
no definido.	
2.3.6. Regressões múltiplas relacionando a produtividade e os teores foliares às variáveis edafoclimáticas	;Error! Marcador no definido.

2.3.7. Variáveis edafoclimáticas que diferenciam as regiões;	Error! Marcador no definido.
2.4. Discussão	Error! Marcador no definido.
2.4.1. Efeito das condições edafoclimáticas na produtividade;	Error! Marcador no definido.
2.4.2. Efeito das condições edafoclimáticas na densidade da madeira;	Error! Marcador no definido.
2.4.3. Estado nutricional das árvores e sua relação com o clima e a produtividade	Error! Marcador no definido.
2.4.4. Diferenciação dos ambientes de produção	Error! Marcador no definido.
2.5. Conclusões	17
Referências	17
3. VALORES DE REFERÊNCIA REGIONAIS PARA DIAGNOSE NUTRICIONAL DE PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO	26
Resumo	26
Abstract	26
3.1. Introdução	27
3.2. Material e Métodos	Error! Marcador no definido.
3.2.1. Localização e características climáticas	Error! Marcador no definido.
3.2.2. Características geológicas e edáficas	Error! Marcador no definido.
3.2.3. Conformação do banco de dados	Error! Marcador no definido.
3.2.4. Caracterização das populações	Error! Marcador no definido.
3.2.5. Obtenção de faixas de suficiência pela Chance Matemática	Error! Marcador no definido.
3.2.6. Obtenção de faixas de suficiência pela Linha da Fronteira	Error! Marcador no definido.
3.2.7. Diagnósticos nutricionais a partir das faixas obtidas	Error! Marcador no definido.
3.3. Resultados	Error! Marcador no definido.
3.3.1. Produtividade e teores foliares médios das populações	Error! Marcador no definido.
3.3.2. Faixas de suficiência pela Chance Matemática Relativa	Error! Marcador no definido.
3.3.3. Faixas de suficiência pela Linha da Fronteira	Error! Marcador no definido.

3.3.4. Concordância nos diagnósticos nutricionais usando faixas regionais e gerais	!Error! Marcador no definido.
3.3.5. Produtividade por classe de estado nutricional	!Error! Marcador no definido.
3.3.6. Avaliação do estado nutricional das populações em estudo;	!Error! Marcador no definido.
3.4. Discussão	!Error! Marcador no definido.
3.4.1. Influência das características edafoclimáticas nos teores foliares, nas faixas de suficiência e níveis críticos	!Error! Marcador no definido.
3.4.2. Influência do método na determinação das faixas de suficiência e níveis críticos	!Error! Marcador no definido.
3.4.3. Avaliação do estado nutricional dos plantios.....	!Error! Marcador no definido.
3.5. Conclusões	28
Referências	29
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E APLICAÇÕES	36
4.1. Efeitos das condições ambientais.....	36
4.2. Diagnose nutricional de povoamentos florestais	37
Referências	37
Apêndice	!Error! Marcador no definido.

RESUMO

Produtividade e estado nutricional em plantações de eucalipto em função de variáveis edafoclimáticas

A disponibilidade de água e de nutrientes são os fatores abióticos que mais influenciam o crescimento das plantações florestais em ambientes tropicais. O estudo das interações entre as condições climáticas e os atributos do solo com a nutrição e o crescimento das árvores se torna essencial para a formulação de estratégias de manejo e de fertilização que permitam ganhos em produtividade com retorno financeiro e garantam a sustentabilidade da produção florestal. Os principais objetivos deste estudo foram: (1) identificar e quantificar os fatores ambientais mais limitantes da produção de madeira e do estado nutricional em plantações monoclonais de eucalipto em um amplo gradiente climático; (2) estabelecer valores de referência para a diagnose nutricional de plantios jovens de eucalipto por estratos climáticos. O estudo foi conduzido em plantações comerciais de *Eucalyptus urophylla* (clone AEC144), localizadas em Minas Gerais, São Paulo e Paraná. Para atingir o primeiro objetivo, foram selecionadas 14 parcelas por região, representando o gradiente de produtividade observado ao final da primeira rotação ($6,2 \pm 0,5$ anos). Calcularam-se os balanços hídricos sequenciais no período de crescimento dos plantios e avaliaram-se atributos físicos e químicos do solo nas parcelas, como também a produção e densidade da madeira e os teores nutricionais foliares. O incremento médio anual em volume de madeira variou em cinco vezes entre os locais mais ($76,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e menos ($15,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) produtivos, em função, principalmente, das diferenças na precipitação pluvial. A biomassa do tronco e a altura das árvores dominantes também apresentaram correlação positiva com a precipitação. A densidade básica da madeira variou entre $0,42 \text{ g cm}^{-3}$ e $0,55 \text{ g cm}^{-3}$, sendo influenciada positivamente pelo déficit hídrico e pelo espaçamento entre as árvores. Atributos físicos do solo, como o teor de argila e a capacidade de água disponível, influenciaram o crescimento dos plantios em São Paulo. Os teores foliares de N, P, K, Cu e Zn foram maiores nos locais com condições climáticas mais favoráveis ao crescimento das árvores. Para atingir o segundo objetivo, usaram-se análises foliares e dados de crescimento das árvores de 427 talhões com plantios entre 12 e 24 meses de idade. Obtiveram-se as faixas de suficiência e os níveis críticos dos nutrientes nas folhas para cada região e para o conjunto geral de dados, por meio dos métodos da Chance Matemática e da Linha da Fronteira. Os valores de referência obtidos foram influenciados pelas condições edafoclimáticas; além disso, verificou-se baixa concordância entre diagnósticos nutricionais usando faixas de suficiência gerais e regionais. Obtiveram-se maiores níveis críticos para B e menores níveis críticos para N, P, K, Ca, Mg, Zn e Mn em Minas Gerais; maiores níveis críticos para N e Mg em São Paulo; e maiores níveis críticos para P, Ca, S e Mn e menores para Cu no Paraná. Verificou-se uma alta frequência de talhões com deficiências de K e Zn em Minas Gerais e de P, K, Ca, Mg, e S em São Paulo. Estes resultados evidenciam os efeitos do estresse hídrico sobre a produtividade e o estado nutricional das plantações ao final da rotação. Por outro lado, sugerem que, na fase juvenil do crescimento, os níveis críticos refletem os efeitos dos fatores ambientais que interferem na absorção de nutrientes e no crescimento das árvores, indicando que, para a interpretação de análises foliares de plantios jovens de eucalipto, seja mais adequado o uso de valores de referência obtidos regionalmente.

Palavras-chave: Produção de *Eucalyptus*, Déficit hídrico, Nutrição florestal, Diagnose nutricional

ABSTRACT

Productivity and nutritional status of *Eucalyptus* plantations as a function of edaphoclimatic variables

Water and nutrients supplies are the abiotic factors that most influence the growth of forest plantations in tropical environments. Understanding the interactions between climatic conditions and soil attributes with tree growth and nutrition it becomes essential for the implementation of management and fertilization strategies in order to achieve productivity gains with financial returns, and guarantee a sustainable forest production. The main goals were: (1) to identify and quantify the most limiting environmental factors for wood production and nutritional status of clonal eucalyptus plantations in a broad climatic gradient; (2) to establish standard values for nutritional diagnosis of young eucalyptus plantations for climatic strata. The research was carried out at commercial plantations of *Eucalyptus urophylla* (clone AEC144) located in Minas Gerais, São Paulo and Paraná (Brazil). To achieve the first goal, 14 plots were selected in each region representing the productivity gradient observed at the end of the first rotation ($6,2 \pm 0,5$ years old). The water balance for the growth period of plantations was estimated. Physical and chemical soil attributes, wood density and production and foliar nutrient levels were also evaluated. The wood volume production varied by 5-fold between sites (from $15.3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ to $76.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$), mainly due to differences in rainfall. Stem biomass and mean height of dominant trees also were positively correlated with precipitation. The basic wood density varied between 0.42 g cm^3 and 0.55 g cm^3 , being positively influenced by the water deficit and spacing between trees. The soil clay content and the soil available water capacity influenced the productivity in São Paulo. Foliar contents of N, P, K, Cu and Zn were higher in regions that presented the most favorable climatic conditions for tree growth. For the achievement of the second goal, foliar analyses and trees growth data of 420 field plots with 12 to 24 months-old plantations were used. Sufficiency ranges and critical levels for leaf nutrient diagnosis in each region were determined by the Mathematical Chance and the Boundary-line approaches. Standard values were influenced by edaphoclimatic conditions, and also low concordance between diagnostics using general and regional sufficiency ranges was observed. The highest critical level for B and the lowest critical level for N, P, K, Ca, Mg, Zn e Mn were found in Minas Gerais; while, in São Paulo, were found the highest critical level for N and Mg, and in Paraná, the highest critical level for P, Ca, S and Mn. A high frequency of plots with K and Zn deficiency was observed in Minas Gerais, while in São Paulo the most common deficiencies were observed for P, K, Ca, Mg and S. These results evidence the effects of water stress on productivity and nutritional status of plantations at the end of the first rotation. Also, results suggest that, in the early growth stage, the leaf critical levels reflect the effects of environmental factors that interfere in the nutrient absorption and plant growth, indicating that for the interpretation of foliar analysis of young eucalyptus plantations it is more adequate to use reference values obtained for each specific region.

Keywords: *Eucalyptus* production, Water deficit, Forest nutrition, Nutritional diagnosis

1. INTRODUÇÃO GERAL

O setor de base florestal tem sido um importante motor de desenvolvimento, uma vez que promove mudanças econômicas locais, oferecendo novas oportunidades de trabalho e gerando renda para a população, bem como contribuindo com a adaptação e mitigação das mudanças climáticas e na provisão de serviços ecossistêmicos. Em 2019, a área total de plantações florestais no Brasil totalizou 9,0 milhões de hectares. Desse total, a maioria (77%) é representada pelo cultivo de eucalipto, com 6,97 milhões de hectares (IBA, 2021). A maior concentração de florestas plantadas ocorre nas regiões Sul e Sudeste, onde estão localizadas as principais indústrias de celulose, papel, painéis de madeira e siderúrgicas. Somente os estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná concentram 49% do total de área plantada com eucalipto no país.

A adoção de boas práticas de manejo, o melhoramento genético e adequadas condições edafoclimáticas para o desenvolvimento das plantações colocam o Brasil no primeiro lugar em produtividade florestal a nível mundial, considerando o volume de madeira produzido por área ao ano e por um dos menores ciclos entre o plantio e a colheita (IBA, 2021). No entanto, em 2019, o Brasil apresentou uma produtividade média de $35,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ nos plantios de eucalipto, o que representa uma ligeira queda em relação a anos anteriores, que pode estar associada ao efeito das mudanças climáticas, expansão para novas áreas com condições menos favoráveis ao desenvolvimento dos plantios e ao aumento da ocorrência de pragas e de doenças.

O crescimento das árvores é resultante da ação e da interação de fatores climáticos, edáficos e bióticos. O emprego adequado de técnicas de manejo permite maior disponibilização dos recursos e a mitigação dos efeitos de agentes redutores do crescimento, facilitando a obtenção de produtividades mais próximas ao potencial máximo de cada sítio (Sentelhas et al., 2016). A disponibilidade de água e de nutrientes são os fatores abióticos que mais influenciam o crescimento das plantações florestais em ambientes tropicais, onde a radiação e a temperatura são abundantes (Barros e Comerford, 2002; Stape, et al., 2004). Sob condições de déficit hídrico há redução do acúmulo de biomassa, em decorrência do fechamento dos estômatos por longos períodos durante o dia, para evitar a perda de água, o que ocasiona diminuição nas taxas fotossintéticas (Taiz et al., 2016; Saadaoui et al., 2017). O déficit hídrico pode conduzir também a estresses nutricionais, já que em condições de baixa disponibilidade de água no solo são afetados os processos de fluxo e de absorção de nutrientes (Nambiar and Sands, 1993).

Um dos maiores desafios da silvicultura, atualmente, é a seleção de materiais genéticos capazes de se adaptar às mudanças climáticas e a condições prolongadas de estresse hídrico (Gonçalves et al., 2017). Estudos de caso são necessários para aprimorar esses conhecimentos, de modo a realizar uma correta alocação dos materiais genéticos e adotar as melhores práticas de manejo para cada condição ambiental, que ajudem a superar estresses ambientais, permitam ganhos em produtividade e garantam a sustentabilidade da produção florestal.

Nesse contexto, foi realizada neste trabalho uma caracterização ampla de atributos climáticos e edáficos e do crescimento e estado nutricional de plantações comerciais do clone de *Eucalyptus urophylla* mais plantado no Brasil (clone AEC144), em três regiões consideradas importantes polos florestais, representando um extenso gradiente de condições ambientais. Posteriormente, verificou-se a influência das condições edafoclimáticas regionais na determinação dos níveis críticos e faixas de suficiência para a diagnose nutricional de plantações do mesmo clone em estágios juvenis.

Procurou-se atingir dois objetivos principais: (1) identificar e quantificar os fatores ambientais mais limitantes da produção de madeira e do estado nutricional em plantações monoclonais de eucalipto nas três regiões de estudo (capítulo 2), (2) estabelecer valores de referência para a interpretação de análises foliares em plantios jovens de eucalipto por estratos climáticos (capítulo 3).

Referências

- BARROS, N. F. de; COMERFORD, N. B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F. de; MELLO, J. W. V. de; COSTA, L. M. (Eds.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS), 2002. v. 2, p. 487- 592
- GONÇALVES, J. L. de M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. de B.; LIMA, W. de P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, n. August 2013, p. 6–27, 2013.
- GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; ROCHA, J. H. T.; BRANDANI, C. B.; HAKAMADA, R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests**, v. 79, n. 3, p. 169–183, 2017.
- IBA. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório IBA 2020**. 2021, 66 p.
- NAMBIAR, E.K.S. Relationships between water, nutrients and productivity in Australian forests: Application to wood production and quality. **Plant and Soil** 168-169: 427-435, 1995.
- SAADAOU, E., BEN YAHIA, K., DHAHRI, S., BEN JAMAA, M.L., KHOUJA, M.L. An overview of adaptative responses to drought stress in *Eucalyptus* spp. – **Forestry Studies** Metsanduslikud Uurimused 67, 86–96, 2017.

STAPE, J., BINKLEY, D., RYAN, M. G. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 17–31, 17 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I.A.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**, 6ª Edição. Porto Alegre, 888 p. 2016.

2. RELAÇÕES ENTRE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS E ATRIBUTOS DO SOLO COM A PRODUTIVIDADE E O ESTADO NUTRICIONAL DE PLANTAÇÕES CLONAIS DE EUCALIPTO

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi identificar e quantificar os fatores ambientais mais limitantes da produção de madeira e do estado nutricional em plantações clonais de *Eucalyptus urophylla* (clone AEC144) em um amplo gradiente climático. O estudo foi conduzido em plantações comerciais localizadas em Minas Gerais, São Paulo e Paraná. Foram selecionadas 14 parcelas por região representando o gradiente de produtividade observado ao final da primeira rotação ($6,2 \pm 0,5$ anos). Calcularam-se os balanços hídricos sequenciais no período de crescimento dos plantios e avaliaram-se atributos físicos e químicos do solo nas parcelas, como também a produção e densidade da madeira e os teores nutricionais foliares. O incremento médio anual em volume de madeira (IMAV) variou entre 15,3 e 76,6 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, em função, principalmente, das diferenças na precipitação pluvial. O IMAV diminuiu, em média, 4,4 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ para cada 100 mm ano⁻¹ a menos de chuva. A biomassa do tronco e a altura das árvores dominantes também apresentaram correlação positiva com a precipitação. A densidade básica da madeira variou entre 0,42 g cm⁻³ e 0,55 g cm⁻³, sendo influenciada positivamente pelo déficit hídrico e pelo espaçamento entre as árvores. O teor de argila e a capacidade de água disponível no solo influenciaram o crescimento dos plantios em São Paulo. Os atributos químicos do solo não apresentaram correlações significativas com a produtividade. Os teores foliares de N, P, K, Cu e Zn foram maiores nos locais com condições climáticas mais favoráveis ao crescimento das árvores. A temperatura do ar, a evapotranspiração potencial e o número de meses com déficit hídrico acima de 10mm foram as variáveis com maior poder discriminatório entre as regiões. Estes resultados evidenciam os efeitos das condições ambientais e do estresse hídrico sobre a produtividade e o estado nutricional das plantações de eucalipto ao final da rotação.

Palavras-chave: Produção de *Eucalyptus*, Déficit hídrico, Produtividade florestal, Nutrição florestal.

ABSTRACT

We aimed to identify and quantify the most limiting environmental factors for wood production and nutritional status of clonal plantations of *Eucalyptus urophylla* (clone AEC144) in a broad climatic gradient in Brazil. The study was carried out at commercial plantations located in Minas Gerais, São Paulo and Paraná. A total of 14 plots were selected in each region representing the productivity gradient observed at the end of the first rotation (6.2 ± 0.5 years old). The sequential water balance for the growth period of plantations was estimated. Physical and chemical soil attributes, wood density and production, and foliar nutrients content were also evaluated. The mean annual increment of wood volume (MAIV) varied between 15.3 and 76.6 m³ ha⁻¹ year⁻¹, mainly due to differences in rainfall. The MAIV decreased by about 4.4 m³ ha⁻¹ year⁻¹ for each 100 mm year⁻¹ decline in rain. The stem biomass and mean height of dominant trees were also positively correlated with precipitation. The basic wood density varied between 0.42 g cm³ and 0.55 g cm³, being positively influenced by the water deficit and spacing between trees. The soil clay content and the soil available water capacity promoted the wood production in São Paulo. The soil chemical attributes did not show significant correlations with productivity. Foliar content of N, P, K, Cu and Zn were higher in regions that presented the most favorable climatic conditions for tree growth. Air temperature, potential evapotranspiration and number of months with water deficit above 10mm were the variables with the greatest discriminatory power between regions. These results evidence the effects of some environmental factors and water stress on productivity and nutritional status of eucalyptus plantations at the end of the first rotation.

Keywords: *Eucalyptus* production, Water deficit, Forest productivity, Forest nutrition

2.1. Introdução

A produtividade das plantações florestais é influenciada por fatores ambientais que condicionam o potencial produtivo dos materiais genéticos (Sentelhas et al., 2016). Assim, para realizar um prognóstico preciso da produtividade esperada de um determinado genótipo de eucalipto em um sítio específico, uma caracterização abrangente do ambiente torna-se indispensável.

Há uma estreita relação entre a produtividade florestal e a disponibilidade de água, sendo o déficit hídrico um dos principais fatores limitantes da produção de madeira de eucalipto (Saadaoui et al., 2017; Gonçalves et al., 2017). Estudos recentes, compreendendo boa parte da geografia brasileira, mostraram um decréscimo na produção de madeira ao final da rotação de $0,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para cada 100 mm ano^{-1} a menos de chuva, e um declínio de $2,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ para cada 1°C de acréscimo na temperatura média do ar (Binkley et al., 2020). A qualidade dos sítios florestais, estimada em função da altura média das árvores dominantes, também tem sido correlacionada positivamente com a disponibilidade de água no solo (Scolforo et al., 2020; Gonçalves et al., 1990). Ao contrário, a densidade básica da madeira, tem mostrado uma relação inversamente proporcional à oferta hídrica, em virtude das modificações anatômicas que ocorrem nas fibras da madeira em resposta ao estresse hídrico (Rocha et al., 2020; Fernández et al., 2019; Barbosa et al., 2019).

Os atributos físicos do solo, como o teor de argila, também interferem no crescimento das árvores, por estarem relacionados à quantidade de água disponível no solo (Silva et al., 2020a; Gava e Gonçalves, 2008). Esta, por sua vez, tem efeito direto na nutrição dos plantios, já que a absorção de água pelas raízes é o principal veículo para que as árvores adquiram os nutrientes disponíveis no solo. De modo geral, as plantações de eucalipto no Brasil dependem da adição de fertilizantes para atingir altas produtividades (Barros e Novais, 1995), devido à maior parte dos sítios florestais estarem localizados em solos altamente intemperizados e de baixa fertilidade (Gonçalves, 2002). Por esse mesmo motivo, a ciclagem biogeoquímica dos nutrientes, intensificada a partir do segundo ano após plantio, tem um papel fundamental na manutenção do adequado estado nutricional e no crescimento das florestas (Laclau et al., 2003). Tanto a resposta às fertilizações, como os processos de ciclagem de nutrientes, são afetados diretamente por variáveis edafoclimáticas relacionadas à disponibilidade hídrica (Nambiar, 1995; Comerford, 2005; Laclau et al., 2010; de Melo et al., 2016; Silva et al., 2017).

O estudo da produtividade, das características da madeira e da dinâmica nutricional dos diferentes genótipos de eucalipto em resposta a variações climáticas e atributos do solo é indispensável para o planejamento florestal, por permitir aprimorar a predição da produção, auxiliar na correta alocação dos materiais genéticos e na implementação das melhores técnicas de manejo nos diversos ambientes de produção, ao mesmo tempo que contribui para uma melhor ocupação de novas áreas de expansão florestal. Nesse contexto, definiram-se os seguintes objetivos:

- i. Estudar o efeito do clima sobre a produtividade, a densidade da madeira e o estado nutricional de plantações monoclonais de *Eucalyptus urophylla*.
- ii. Identificar os atributos físicos e químicos do solo que mais influenciaram a produtividade e o estado nutricional das plantações nas regiões de estudo.
- iii. Estabelecer modelos empíricos das variáveis de produtividade e de teores nutricionais foliares em função de características edafoclimáticas.
- iv. Identificar as variáveis ambientais com maior poder discriminatório entre as regiões.

2.2. Conclusões

Observaram-se diferenças na produtividade de madeira de até cinco vezes entre as regiões estudadas. O incremento médio anual de volume e biomassa do tronco e a altura dominante foram influenciados positivamente pela disponibilidade hídrica. A densidade da madeira apresentou comportamento contrário.

Os teores de nutrientes nas folhas também foram afetados pelas condições climáticas. De forma geral, apresentaram relação inversa com a temperatura do ar.

Os atributos químicos do solo não afetaram significativamente a produtividade. Em São Paulo, os atributos físicos, associados à capacidade de armazenamento de água do solo, influenciaram o crescimento dos plantios.

A temperatura do ar, a evapotranspiração potencial e o número de meses com déficit hídrico acima de 10mm foram as variáveis com maior poder discriminatório, e permitiram separar as regiões em três ambientes de produção diferentes.

Referências

- ABATZOGLOU, J.T.; DOBROWSKI, S.Z.; PARKS, S.A.; HEGEWISCH, K.C. 2018. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. **Nature - Scientific Data** 5, n.170191, 2018.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ÁLVAREZ-ÁLVAREZ, P., KHOURI, E.A., CÁMARA-OBREGÓN, A., CASTEDO-DORADO, F., BARRIO-ANTA, M. Effects of foliar nutrients and environmental factors

on site productivity in *Pinus pinaster* Ait. Stands in Asturias (NW Spain). **Annals of Forest Science**, 2011, 68:497–509.

APIOLAZA, L.A., RAYMOND, C.A., YEO, B.J. Genetic Variation of Physical and Chemical Wood Properties of *Eucalyptus globulus*. **Silvae Genetica**, 54-4/5, p.160-166, 2005.

ARAUJO, M.J., PAULA, R.C., CAMPOE, O.C., CARNEIRO, R.L. Adaptability and stability of eucalypt clones at different ages across environmental gradients in Brazil. **Forest Ecology and Management**, 454, 117631, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRAZILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR-11941: madeira – determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 2003.

BARBOSA, T.L., OLIVEIRA, J.T.S., ROCHA, S.M.G., CÂMARA, A.P., VIDAURRE, G.B., ROSADO, A.M., LEITE, F.P. Influence of site in the wood quality of *Eucalyptus* in plantations in Brazil. **South. For. J. For. Sci.** 81 (3), 247–253, 2019.

BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F. Recomendação de fertilizantes minerais em plantios de eucalipto. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, IPEF, p.270-283, 2000.

BATISTA J.L.F., COUTO H.T.Z., FILHO D.F.S. **Quantificação de recursos florestais**. Piracicaba. 384 p, 2014.

BINKLEY D.; CAMPOE, O.C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R.L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v.405, p.271-283, 2017.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O.C.; ALVARES, C.A.; CARNEIRO, R.L.; STAPE, J.L. Variation in whole-rotation yield among *Eucalyptus* genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS Project. **Forest Ecology and Management** 462 (2020) 117953

BRAGA, F.A., BARROS, N.F., SOUZA, A.L., COSTA, L.M. Características ambientais determinantes da capacidade produtiva de sítios cultivados com eucalipto. **R. Bras. Ci. Solo**, 23:291-298, 1999.

- COHEN, J.; COHEN, P.; WEST, S.G.; AIKEN, L.S. **Applied multiple regression/correlation analysis for the behavioral sciences**. 3rd ed. Incorporated: Lawrence Erlbaum Associates. 1983.
- COMERFORD, N.B. Soil factors affecting nutrient bioavailability. In: BASSIRIRAD, H. (Ed.) **Nutrient acquisition by plants, an ecological perspective**. Berlin, Ecological Studies, v.181, p.1-14, 2005
- COSTA, S.E.L.; SANTOS, R.C.; VIDAURRE, G.B.; CASTRO, R.V.O.; ROCHA, S.M.G.; CARNEIRO, R.L.; CAMPOE, O.C.; SANTOS, C.P.S.; GOMES, I.R.F.; CARVALHO, N.F.O.; TRUGILHO, P.F. The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual increment of wood from eucalyptus clones. **Forest Ecology and Management**, 458, 117807, 2020.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª ed., Brasília, DF: EMBRAPA, 2018, 356 p.
- FERNÁNDEZ, M.E., BAROTTO, A.J., MEIER, A.M., GYENGE, J.E., TESÓN, N., MARTORELLO, A.S.Q., MERLO, E., SALDA, G.D., ROZENBERG, P., MONTEOLIVA, S. New insights into wood anatomy and function relationships: How Eucalyptus challenges what we already know. **Forest Ecology and Management** 454, 117638, 2019.
- GAVA, J.L. **Relações entre atributos do solo e qualidade da madeira de clone de Eucalyptus grandis para produção de celulose**. ESALQ-USP, Piracicaba, 54 p. 2005.
- GAVA, J. L.; GONCALVES, J. L. D. Soil attributes and wood quality for pulp production in plantations of Eucalyptus grandis clone. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 3, p. 306–313, 2008.
- GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, IPEF, 2000. p. 3-55.
- GONÇALVES, J. L. de M., ALVARES, C. A., GONÇALVES, T.D., MOREIRA, R.M., MENDES, J.C., GAVA, J.L. Soil and productivity mapping of Eucalyptus grandis

plantations, using a geographic information system. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 40, n. 94, p. 187-201, jun. 2012.

GONÇALVES, J. L. de M.; ALVARES, C. A.; HIGA, A. R.; SILVA, L. D.; ALFENAS, A. C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. de B.; LIMA, W. de P.; BRANCALION, P. H. S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J. P. D.; LACLAU, J. P.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, n. August 2013, p. 6–27, 2013.

GONÇALVES, J. L. M.; ALVARES, C. A.; ROCHA, J. H. T.; BRANDANI, C. B.; HAKAMADA, R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests**, v. 79, n. 3, p. 169–183, 2017.

GONÇALVES, J.L.M. Principais solos usados para plantações florestais. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (ed.). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002, p.1-45.

KARNA HANSSON, JEAN-PAUL LACLAU, LAURENT SAINT-ANDRÉ, LOUIS MARESCHAL, GREGORY VAN DER HEIJDEN, CLAUDE NYS, MANUEL NICOLAS, JACQUES RANGER, ARNAUD LEGOUT. Chemical fertility of forest ecosystems. Part 1: Common soil chemical analyses were poor predictors of stand productivity across a wide range of acidic forest soils. **Forest Ecology and Management** 461 (2020) 117843.

HERBERT, M. A. The Influence of Site Factors on the Foliar Nutrient Content of *Eucalyptus grandis* in Natal. **South African Forestry Journal**, v. 156, n. 1, p. 28–34, mar. 1991.

IPEF. **Programa Cooperativo TECHS-IPEF, Relatório Final** – 2012-2018. Piracicaba, IPEF, 2019.

LACLAU, J.P.; DELEPORTE, P.; RANGER, J.; BOUILLET, J.P.; KAZOTTI, G. Nutrient dynamics throughout the rotation of *Eucalyptus* clonal stands in Congo. **Annals of Botany**, 91, p. 879-892, 2003.

- LACLAU, J.P.; RANGER, J.; GONÇALVES, J.L.M.; MAQUERE, V.; KRUSCHE, A.V.; E, M'BOU, A.T.; NOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRE, L.; BOUILLET, J.P.; PICCOLO, M.C.; DELEPORTE, P. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations. Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. **Forest Ecology and Management** 259 (2010) 1771–1785.
- LEAL, S., PEREIRA, H., GRABNER, M., WIMMER, R. Clonal and site variation of vessels in 7-year-old *Eucalyptus globulus*. **IAWA Journal**, Vol. 24 (2), p.185–195, 2003.
- MALAN, F.S., HOON, H. Effect of Initial Spacing and Thinning on Some Wood Properties of *Eucalyptus grandis*. **South African Forestry Journal**, No. 163, p.13-20, 1992.
- MALAVOLTA, E., VITTI, G.C., OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2ª ed., Piracicaba, POTAFOS, 1997. 319 p.
- MANLEY, B.J.F. **Métodos estatísticos multivariados**. 3ª ed., Porto Alegre, Bookman, 2008, 229p.
- MIRANDA, I., TOMÉ, M., PEREIRA, H. The influence of spacing on wood properties for *Eucalyptus globulus* Labill pulpwood. **Appita Journal**, v. 56, No. 2, p.140-144, 2003.
- MOULIN, J.C., ARANTES, M.D.C., OLIVEIRA, J.G.L., CAMPINHOS, E., GOMES, F., VIDAURRE, G.B. Efeito do espaçamento, idade e irrigação no volume e densidade básica do eucalipto. **Floresta e Ambiente** 2017; 24: e00073914, p. 1-10, 2017.
- NAMBIAR, E.K.S. Relationships between water, nutrients and productivity in Australian forests: Application to wood production and quality. **Plant and Soil** 168-169: 427-435, 1995.
- PITA-BARBOSA, A.; HODECKER, B.E.R.; BARROS, N.F. Boron as mitigator of drought damage in *Eucalyptus*: a genotype-dependent mechanism? **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 112, p. 851-861, 2016.
- QUEIROZ, T.B., CAMPOE, O.C., MONTES, C.R., ALVARES, C.A., CUARTAS, M.Z., GUERRINI, I.A. Temperature thresholds for *Eucalyptus* genotypes growth across tropical and subtropical ranges in South America. **Forest Ecology and Management** 472 (2020) 118248.

- RAIJ, B.V.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade dos solos tropicais**. Campinas. Instituto Agrônômico de Campinas, 2001. 285 p.
- ROCHA, S.M.G., VIDAURRE, G.B., PEZZOPANE, J.E.M., ALMEIDA, M.N.F., CARNEIRO, R.L., CAMPOE, O.C., SCOLFORD, H.F., ALVARES, C.A., NEVES, J.C.L., XAVIER, A.C., FIGURA, M.A. Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. **Forest Ecology and Management**, 473, 118290, 2020.
- ROLIM, G. S., SENTELHAS, P. C., BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL TM para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n.1, p133-137, 1998.
- ROSSI, M. 2017. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. V.1. 118p.
- RYAN, M. G.; STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; FONSECA, S.; LOOS, R. A.; TAKAHASHI, E. N.; SILVA, C. R.; SILVA, S. R.; HAKAMADA, R. E.; FERREIRA, J. M.; LIMA, A. M. N.; GAVA, J. L.; LEITE, F. P.; ANDRADE, H. B.; ALVES, J. M.; SILVA, G. G. C. Factors controlling Eucalyptus productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1695–1703, 2010.
- SAADAOUI, E., BEN YAHIA, K., DHAHRI, S., BEN JAMAA, M.L., KHOUJA, M.L. An overview of adaptative responses to drought stress in *Eucalyptus* spp. – **Forestry Studies Metsanduslikud Uurimused** 67, 86–96, 2017.
- SARDANS, J., ALONSO, R., CARNICER, J., FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, M., VIVANCO, M.G., PEÑUELAS, J. Factors influencing the foliar elemental composition and stoichiometry in forest trees in Spain. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics** 18, 52–69, 2016.

- SARDANS, J., PEÑUELAS, J., COLL, M., VAYREDA, J., RIVAS-UBACH, A. Stoichiometry of potassium is largely determined by water availability and growth in Catalanian forests. **Functional Ecology** p 1-13, 2012.
- SAS INSTITUTE. **SAS/STAT® 14.2 User's guide**. Cary, NC: SAS Institute Inc. 2016.
- SCHÖNAU, A. P. G.; HERBERT, M. A. Relationship between Growth Rate and Foliar Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Potassium for *Eucalyptus grandis*. **South African Forestry Journal**, v. 120, n. 1, p. 19–23, 1982.
- SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.D.S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v.47, p719-734, 1933.
- SCOLFORO, J. R. S. **Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas**. Lavras: UFLA/FAEP, 1998. 463 p.
- SCOLFORO, H.F.; McTAGUE, J.P.; BURKHART, H.; ROISE, J.; ALVARES, C.A.; STAPE, J.L. Site index estimation for clonal eucalypt plantations in Brazil: A modeling approach refined by environmental variables. **Forest Ecology and Management**, 466, 118079, 2020.
- SENTELHAS, P.C.; BATTISTI, R.; MONTEIRO, L.A.; DUARTE, Y.C.N.; VISSÉS, F.A. Yield gap. Conceitos, definições e exemplos. **Informações Agrônomicas**, 155, p.9-12, 2016.
- SETTE JR, C.R. Relationship between climate variables, trunk growth rate and wood density of *Eucalyptus grandis* W. Mill ex Maiden trees. **Revista Árvore** 40 (2), p. 337–346, 2016.
- SETTE JR, C.R., OLIVEIRA, I.R., FILHO, M.T., YAMAJI, F.M. LACLAU, J.P. Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.36, n.6, p.1183-1190, 2012.
- SILVA, R.M.L.; HAKAMADA, R.E.; BAZANI, J.H.; OTTO, M.S.G.; STAPE, J.L. Fertilization Response, Light Use, and Growth Efficiency in Eucalyptus Plantations across Soil and Climate Gradients in Brazil. **Forests**, 7, 117, p.1-12, 2016.

- SILVA, M.K.A., ROSA, R., 2009. Diagnóstico do meio físico da bacia hidrográfica do rio São Francisco, no Estado de Minas Gerais/ Brasil. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 4393-4400.
- SILVA, V.E., BUZETTI, S., LACLAU, J.P., MONTANARI, R., PANOSSO, A.R., DIAS, S.C.M., SILVA, J.F. Consequences of soil attributes on the productivity and eucalypt drought response in two climate types in Brazil. **Ci. Fl.**, Santa Maria, v. 30, n. 1, p. 117-134, 2020a.
- SILVA, V.E., NOGUEIRA, T.A.R., ABREU-JUNIOR, C.H., HE, Z., BUZETTI, S., LACLAU, J.P., FILHO, M.C.M., GRILLI, E., MURGIA, I., CAPRA, J.F. Influences of edaphoclimatic conditions on deep rooting and soil water availability in Brazilian Eucalyptus plantations. **Forest Ecology and Management** 455, 117673, 2020b.
- STACKPOLE, D.J., VAILLANCOURT, R.E., ALVES, A., RODRIGUES, J., POTTS, B.M. Genetic Variation in the Chemical Components of *Eucalyptus globulus* Wood. G3: **Genes, Genomes, Genetics**, v.1, p.151-159, 2011.
- STAPE, J.L. **Production ecology of clonal *Eucalyptus* plantations in northeastern Brazil.** Colorado State University. Fort Collins, 2002, 225 p.
- STAPE, J., BINKLEY, D., RYAN, M. G. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1–2, p. 17–31, 17 2004.
- TAN, B., GRATTAPAGLIA, D., WUE, H.X., INGVARSSON, P.K. Genomic relationships reveal significant dominance effects for growth in hybrid *Eucalyptus*. **Plant Sci.** 267, 84–93, 2018.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The Water Balance. **Climatology**, v. 3, n. 1, p. 104, 1955.
- VIEIRA, M.F.R. **Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades da madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* para energia.** Dissertação (mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2011, 71 p.

WIMMER, R., DOWNES, G.M., EVANS, R. Temporal variation of microfibril angle in *Eucalyptus nitens* grown in different irrigation regimes. **Tree Physiol.** 22 (7), p. 449–457, 2002.

3. VALORES DE REFERÊNCIA REGIONAIS PARA DIAGNOSE NUTRICIONAL DE PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO

RESUMO

Para manter altas produtividades e garantir a sustentabilidade das plantações florestais, é necessário monitorar o estado nutricional das árvores por meio de análises foliares. Entretanto a acurácia dos diagnósticos nutricionais depende de os teores foliares utilizados como referência na interpretação das análises foliares. Considerando a carência de valores de referência nutricionais específicos para diferentes regiões e genótipos de eucalipto, no presente estudo, determinaram-se, pelos métodos da Chance Matemática e da Linha da Fronteira, as faixas de suficiência e os níveis críticos dos nutrientes nas folhas em três regiões com condições climáticas distintas (Paraná, São Paulo e Minas Gerais) para o clone de *Eucalyptus urophylla* mais plantado no Brasil (clone AEC144). Usaram-se análises foliares e dados de crescimento das árvores de 427 talhões com plantios entre 12 e 24 meses de idade. Os valores de referência obtidos foram influenciados pelas condições edafoclimáticas; além disso, verificou-se baixa concordância entre diagnósticos nutricionais usando faixas de suficiência gerais e regionais. Obtiveram-se maiores níveis críticos para B e menores níveis críticos para N, P, K, Ca, Mg, Zn e Mn em Minas Gerais; maiores níveis críticos para N e Mg em São Paulo; e maiores níveis críticos para P, Ca, S e Mn e menores para Cu no Paraná. Verificou-se uma alta frequência de talhões com deficiências de K e Zn em Minas Gerais e de P, K, Ca, Mg, e S em São Paulo. Conclui-se que o estabelecimento de valores de referência com maior especificidade, levando em conta as condições climáticas da região, pode contribuir para maior acurácia dos diagnósticos nutricionais, aprimorando as recomendações de fertilização e evitando perdas de produtividade.

Palavras-chave: Nutrição florestal, Análise foliar, Faixas de suficiência, Fertilização

ABSTRACT

To maintain a high and sustainable productivity in forest plantations, it is necessary to monitor the nutritional status of trees based on foliar analysis. The accuracy of the nutritional diagnosis depends on the leaf concentrations used as reference values for interpretations. Considering the lack of specific nutrient reference values for different regions and genotypes, in this study we determined sufficiency ranges and critical levels in three regions with different climatic conditions (Paraná, São Paulo and Minas Gerais) for the most planted *Eucalyptus urophylla* clone in Brazil (clone AEC144), by the Mathematical Chance and the Boundary-line approaches. We used data of foliar nutrient content and tree growth from 427 sites with 12 to 24 months-old plantations. The obtained reference values were influenced by edaphoclimatic conditions. Also, low concordance between nutritional diagnostics using general and regional sufficiency ranges was observed. The highest critical level for B and the lowest critical level for N, P, K, Ca, Mg, Zn e Mn were found in Minas Gerais; while, in São Paulo, were found the highest critical level for N and Mg, and, in Paraná, the highest critical level for P, Ca, S and Mn. A high frequency of plots with K and Zn deficiency was observed in Minas Gerais, while in São Paulo the most common deficiencies were observed for P, K, Ca, Mg and S. We concluded that for Brazilian conditions, with a large climatic gradient, establishing specific reference values for regions would contribute to a more accurate nutritional diagnosis, improving fertilizer recommendations as well as avoiding productivity losses.

Keywords: Forest nutrition, Leaf analyses, Sufficiency ranges, Fertilization

3.1. Introdução

Para manter altas produtividades nas plantações florestais e garantir a sua sustentabilidade, é recomendado monitorar o estado nutricional das árvores por meio de análises foliares, a fim de verificar a necessidade de adubações complementares (Neves et al., 2008; Bellote e Silva, 2000; Silveira et al., 2000). Entretanto a acurácia dos diagnósticos nutricionais depende de os teores foliares utilizados como referência na interpretação das análises foliares.

A disponibilidade de água no solo influencia o fluxo de nutrientes para as plantas e, junto à temperatura, afeta as taxas de absorção de nutrientes, refletindo-se nos teores foliares (Sardans et al., 2016; BassiriRad, 2000). Assim, o estabelecimento de valores de referência nutricional específicos por ambientes de produção, levando em conta as características edafoclimáticas do local, poderia contribuir para uma diagnose nutricional mais precisa, de modo a aprimorar as recomendações de fertilização, evitar perdas de produtividade e auxiliar no uso racional dos fertilizantes.

As demandas nutricionais do eucalipto podem variar em função do genótipo e da sua interação com o ambiente (Barros et al., 2000, Santana et al., 2002). Com o plantio de novos materiais genéticos, mais produtivos, em áreas novas, e com o emprego de novas técnicas de manejo, faz-se necessária a condução de novos estudos para a determinação dos ótimos nutricionais com maior especificidade (Lima Neto et al., 2020; Camacho et al., 2012).

Tradicionalmente, os níveis críticos e as faixas de suficiência dos nutrientes nas folhas têm sido gerados a partir de experimentos de calibração, onerosos e de longa duração, no caso do eucalipto (Wadt et al., 1998). No entanto existem alternativas para estabelecer, de forma mais prática e rápida, tais valores de referência, como os métodos da Chance Matemática (Wadt et al., 1996) e da Linha da Fronteira (Walworth et al., 1986), os quais possibilitam o uso de dados de monitoramento nutricional e de crescimento de plantações comerciais.

O método da Chance Matemática permite definir as faixas de suficiência a partir de intervalos de teores foliares nos quais há maior probabilidade de atingir altas produtividades, baseando-se na esperança matemática, e tendo como pressuposto o fato de que em grandes populações a frequência observada se aproxima da probabilidade (Wadt et al., 1996). Já o método da Linha da Fronteira, envolve a representação gráfica da produção em função dos teores dos nutrientes nas folhas mediante diagramas de dispersão, selecionando observações na região superior da nuvem de pontos para ajustar modelos polinomiais e obter os valores de referência a partir da produtividade máxima estimada por tais modelos (Souza et al. 2020). Esse método pressupõe que a linha da fronteira representa o efeito limitante do teor foliar em questão (variável independente) sobre a produtividade (variável dependente), e que todas as observações abaixo dessa linha resultam da influência de outros fatores de produção, diferentes daquele em estudo, sejam eles de ordem nutricional ou de qualquer outra natureza (Blanco-Macias et al. 2010; Walworth, 1986).

Considerando a carência de valores de referência nutricionais específicos para diferentes regiões e genótipos de eucalipto, no presente estudo, determinaram-se, por meio dos métodos da Chance Matemática e da Linha da Fronteira, as faixas de suficiência e os níveis críticos dos teores de nutrientes nas folhas em três regiões com condições edafoclimáticas distintas para o clone de *Eucalyptus urophylla* mais plantado no Brasil.

Objetivos:

- i. Estudar como os níveis críticos dos teores de nutrientes nas folhas podem variar em função das condições edafoclimáticas do sítio;
- ii. Estabelecer as faixas normais dos nutrientes nas folhas para plantios jovens do clone AEC144 (*E. urophylla*) em três regiões com características climáticas distintas;
- iii. Verificar o grau de concordância dos diagnósticos nutricionais, usando valores de referência para interpretação de análises foliares regionais e gerais;
- iv. Identificar as limitações nutricionais mais frequentes em cada região.

3.2. Conclusões

As faixas normais e níveis críticos dos nutrientes nas folhas foram influenciadas pelas condições edafoclimáticas, indicando que, para a interpretação de análises foliares de plantios jovens de eucalipto, seja mais adequado o uso de valores de referência obtidos regionalmente.

Por meio da Chance Matemática e da Linha da Fronteira, foi possível estabelecer faixas de suficiência para três regiões nos estados de São Paulo, de Minas Gerais e do Paraná. Os resultados são promissores para interpretar análises foliares de plantações jovens do clone AEC144 em ambientes semelhantes.

Os dois métodos apresentaram concordância em determinar maiores níveis críticos para B e menores níveis críticos para N, P, K, Ca, Mg, Zn e Mn em Minas Gerais; maiores níveis críticos para N e Mg em São Paulo; e maiores níveis críticos para P, Ca, S e Mn e menores para Cu no Paraná.

Verificou-se uma alta frequência (>25%) de talhões com deficiências de K e Zn em Minas Gerais e de P, Ca, Mg, e S em São Paulo, com aparente possibilidade de resposta a adubações complementares. Já no Paraná, observaram-se as menores frequências de talhões com teores abaixo dos níveis críticos estabelecidos.

Referências

- ALI, A.M. Nutrient sufficiency ranges in Mango using Boundary-Line approach and Compositional Nutrient Diagnosis Norms in El-Salhiya, Egypt. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 49:2, 186-201, 2018.
- ALMEIDA, E.I.B., DE DEUS, J.A.L., CORRÊA, M.C.M., CRISOSTOMO, L.A., NEVES, J.C.L. Linha de fronteira e chance matemática na determinação do estado nutricional de pitaia. **Revista Ciência Agronômica**, 47:4, 744-754, 2016.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, dez. 2013.
- ATTIWILL, P.M. Nutrient cycling in forests. In: NIERENBERG, W.A. **Encyclopedia of environmental biology**. San Diego, Academic Press, v.2, p.425-439, 1995.
- BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F. Recomendação de fertilizantes minerais em plantios de eucalipto. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, IPEF, 2000, p.270-283.
- BASSIRIRAD, H. Kinetics of nutrient uptake by roots: responses to global change. **New Phytologist**, 147, 155-169, 2000.
- BELLOTE, A.F.J.; SILVA, H.D. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus* spp. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, IPEF, 2000, p.106-133.
- BHAT, R., SUJATHA, S. Establishing leaf nutrient norms for arecanut by boundary line approach. **Journal of Plant Nutrition**, 36:6, 849-862, 2013.
- BLANCO-MACIAS, F., MGALLANES-QUINTANA, R., VALDEZ-CEPEDA, R. D., VASQUEZ-ALVARADO, R., OLIVARES-SÁENZ, E., GUTIERREZ-ORNELAS, E., VIDALES-CONTRERAS, J.A., MURILLO-AMADOR, B. Nutritional reference values for *Opuntia ficus-indica* determined by means of the boundary-line approach. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 173, 972-934, 2010.

- BLANCO-MACIAS, F., MGALLANES-QUINTANA, R., VALDEZ-CEPEDA, R. D., VASQUEZ-ALVARADO, R., OLIVARES-SÁENZ, E., GUTIERREZ-ORNELAS, E., VIDALES-CONTRERAS, J.A. Comparison between CND norms and Boundary-Line approach nutrient standards: *Opuntia ficus-indica* L. case. **Revista Chapingo Serie Horticultura**, 15:2, 217-223, 2009.
- CAMACHO, M.A.; VARGAS D.S.M.; CAMARGO, R.A.; NATALE, W. Faixas normais de nutrientes pelos métodos ChM, DRIS e CND e nível crítico pelo método de distribuição normal reduzida para laranja-pera. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 193-200, 2012.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, SBCS, p. 375-470, 2007.
- CPRM. Carta geológica do Brasil ao milionésimo. Folhas Paranapanema (SF.22) e Curitiba (SG.22). Escala 1:1.000.000. Serviço Geológico do Brasil, 2004.
- CPRM. Mapa geológico do estado de São Paulo. Escala 1:750.000. Serviço Geológico do Brasil, 2006.
- CPRM. Mapa geológico do estado de Minas Gerais. Serviço Geológico do Brasil, 2012.
- GOVERNO DO PARANÁ. Carta geológica da folha de Telêmaco Borba. Escala 1:250.000. 2005.
- DECHEN, A.R.; NACHTIGALL, G.R.; CARMELLO, Q.A.C.; SANTOS, L.A.; SPERANDIO, M.V.L. Micronutrientes. In: FERNANDES, M. S.; SOUZA, S.R.; SANTOS, L.A. (Ed.) **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, p. 491-562, 2018.
- De ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; GABRIELLI, G. C. Micronutrientes. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG. SBCS, p. 645-736, 2007.
- De MELO, E.A.S.; GONÇALVES, J.L.M.; ROCHA, J.H.T.; HAKAMADA, R.E.; BAZANI, J.H.; WENZEL, A.V.Q.; JUNIOR, J.C.A.; BORGES, J.S.; MALHEIROS, R.; LEMOS,

- C.C.Z.; FERREIRA, E.V.O.; FERRAZ, A.V. Response of clonal eucalypt plantations to N, P and K fertilizer application in different edaphoclimatic conditions. **Forests**, 7, 0002, p.1-15, 2016.
- EMBRAPA. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná. Escala 1:600.000, 2007.
- ERNANI, P.R.; ALMEIDA, J.A.; SANDOS, F.C. Potássio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG. SBCS, p. 551-594, 2007.
- FERNANDES, L.V. **Normas e determinação de faixas de suficiência para diagnose foliar com base no crescimento relativo de eucalipto**. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2010. 84 p.
- FICK, S. E., HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, 37(12), 4302–4315, 2017.
- GALDINO, M. P. **Valores de referência e faixas de suficiência para avaliação do estado nutricional da cultura do eucalipto no Brasil**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2015. 123 p.
- GONÇALVES, J.L.M.; MENDES, K.F.C.S.; SASAKI, C. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais e implantados do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.25, n.3, p.601-616, 2001.
- GONÇALVES, J.L.M. Fertilização de plantação de eucalipto. In: **Anais do II Encontro Brasileiro de Silvicultura**; Campinas. Piracicaba: PTSM/IPEF/ESALQ/FUPEF; 2011. p. 85-113.
- HERBERT, M. A. The Influence of Site Factors on the Foliar Nutrient Content of *Eucalyptus grandis* in Natal. *South African Forestry Journal*, v. 156, n. 1, p. 28–34, mar. 1991.
- HERNÁNDEZ-VIDAL, E.; BLANCO-MACÍAS, F.; GONZÁLEZ-TORRES, A.; VÉLIZ-DERAS, F.G.; GAYTÁN-ALEMÁN, L.; VALDEZ-CEPEDA, R.D. Boundary-Line Approach Macro-Nutrient Standards for *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller Variety “Rojo Pelón” Fruiting. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, p. 1-9, 2020.

- LIMA NETO A.J., NEVES JCL, MARTINEZ HEP, SOUSA JS, FERNANDES LV. Establishment of critical nutrient levels in soil and plant for eucalyptus. **Rev Bras Cienc Solo**. 2020; 44:e0190150.
- LOURENÇO, H.M. Diagnose nutricional de eucalipto e impacto da disponibilidade de água e nutrientes nos estoques de carbono do povoamento. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2012, 113 p.
- MALAVOLTA, E., VITTI, G.C., OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2ª ed., Piracicaba, POTAFOS, 1997. 319 p.
- MATOS, G.S.B.; FERNANDES, A.R.; WADT, P.G.S.; FRANZINI, V.I.; SOUZA, E.M.C.; RAMOS, H.M.N. Dris calculation methods for evaluating the nutritional status of oil palm in the Eastern Amazon. **Journal of Plant Nutrition**, v 41, n.10, p.1240-1251, 2018.
- NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; LEITE, R.A.; ALVAREZ, V, V.H.; SILVA, I.R. Monitoramento nutricional e recomendação de adubação. In: **Encontro Brasileiro de Silvicultura**, 2008, Curitiba. Encontro brasileiro de Silvicultura, v.1, p51-60, 2008.
- NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG. SBCS, p. 471-550, 2007.
- PAIM E.V., CUNHA, F.G. Atlas geoquímico da bacia do rio São Francisco: Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2018. 238 p.; 30 cm.
- PULITO, A.P.; GONÇALVES, J.H.T.; SMETHURST, P.; ARTHUR JUNIOR J.; ALVARES, C.A.; ROCHA, J.H.T.; HÜBNER, A.; MORAES, L.F.; MIRANDA, A.; KAMOGAWA, M.; GAVA, J.L.; CHAVES, R.; SILVA, C. Available nitrogen and responses to nitrogen fertilizer in Brazilian eucalypt plantations on soils of contrasting texture. **Forests**. 2015; 6:973-91.
- ROCHA, J. H. T.; GONÇALVES, J. L. M.; GAVA, J. L.; GODINHO, T. O.; MELO, E. A. S. C.; BAZANI, J. H.; HUBNER, A.; ARTHUR JUNIOR, J. C.; WICHERT, M. P. Forest residue maintenance increased the wood productivity of a Eucalyptus plantation over two short rotations. **Forest Ecology and Management**, v. 379, p. 1-10, 2016.

- ROY, S. Sedimentary manganese metallogenesis in response to the evolution of the Earth system. **Earth-Science Reviews**, 77(4):273-305, 2006.
- SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *E. grandis* e *E. saligna* em sítios florestais do estado de São Paulo. *Revista Árvore*, 26(4): 447- 457, 2002.
- SANTOS, E.F.; DONHA, R.M.A; ARAÚJO, C.M.M; JUNIOR, J.L.; CAMACHO, M.A. Faixas normais de nutrientes em cana-de-açúcar pelos métodos de ChM, DRIS e CDN e nível crítico pela distribuição normal reduzida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p. 1651-1658, 2013.
- SARDANS, J., ALONSO, R., CARNICER, J., FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, M., VIVANCO, M.G., PEÑUELAS, J. Factors influencing the foliar elemental composition and stoichiometry in forest trees in Spain. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, 18, 52–69, 2016.
- SARDANS, J., PEÑUELAS, J., COLL, M., VAYREDA, J., RIVAS-UBACH, A. Stoichiometry of potassium is largely determined by water availability and growth in Catalanian forests. **Functional Ecology**, p 1-13, 2012.
- SAS INSTITUTE. **SAS/STAT® 14.2 User's guide**. Cary, NC: SAS Institute Inc. 2016.
- SILVA, G.D.C.; NEVES, J.C.L.; ALVARES, V.H.; LEITE, F.P. Nutritional Diagnoses for eucalypt by DRIS, M-DRIS and CND. **Scientia Agricola**, v.61, n.5, p.507-515, 2004.
- SILVA, G.G.C. Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de eucalipto em resposta à disponibilidade de água e nutrientes. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Viçosa: UFV, 102p., 2006;
- SILVA, P. H. M.; POGGIANI, F.; LIBARDI, P. L.; GONÇALVES, A. N. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 67-78, 2013.
- SILVA, I.R.; MENDONÇA, E. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG. SBCS, p. 645-736, 2007.

- SILVA, M.K.A.; ROSA, R. Diagnóstico do meio físico da bacia hidrográfica do rio São Francisco, no Estado de Minas Gerais/Brasil. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 4393-4400.
- SILVEIRA, R.L.V.A.; HIGASHI, E.N.; GONÇALVES A.N.; MOREIRA, A. Avaliação do estado nutricional do Eucalyptus: Diagnose visual, foliar e suas interpretações. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba, IPEF, 2000. p.79-104.
- SCHÖNAU, A.P.G.; HERBERT, M.A. Relationship between Growth Rate and Foliar Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Potassium for Eucalyptus grandis. **South African Forestry Journal**, v. 120, n. 1, p. 19–23, 1982.
- SOUZA, H.A.; VIEIRA, P.F.M.; ROZANE, D.E.; SAGRILO, E.; LEITE, L.F.C.; FERREIRA, A.C.M. Critical levels and sufficiency ranges for leaf nutrient diagnosis by two methods in soybean grown in the Northeast of Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2020, 44:e0190125, p. 1-14.
- URANO, E.O.M.; KURIHARA, C.H.; MAEDA, S.; VITORINO, A.C.T.; GONÇALVES, M.C.; MARCHETTI, M.E. Determinação de teores ótimos de nutrientes em soja pelos métodos Chance Matemática, Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação e Diagnose da Composição Nutricional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p. 63-72, 2007.
- VITOUSEK, P.M.; SANFORD, R.L. Nutrient cycling in most tropical forests. **Ann. Ver. Ecol. Syst.**, 17:137-167, 1986.
- WALWORTH, J.L.; LETZSCH, W.S.; SUMNER, M.E. Use of boundary lines in establishing diagnostic norms. **Soil Sci Soc Am J**. 1986; v.50, p.123-128.
- WADT, P.G.S. **Os métodos da Chance Matemática e do Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS) na avaliação nutricional de plantios de eucalipto**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 1996. 123 p.

- WADT, P.G.S. NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V., V.H.; FONSECA, S.; BARROS, N.F. Valores de referência para macronutrientes em eucalipto obtidos pelos métodos DRIS e Chance Matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p. 685-692, 1998.
- WADT, P.G.S.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.B.; DIAS, L.E. Variações no estado nutricional de eucaliptos por influência do material genético e da idade da árvore. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.34, n.10, p.1797-1803, out. 1999.
- WADT, P.G.S.; Nutritional status of Eucalyptus grandis clones evaluated by critical level and DRIS methods. **Revista Árvore**, v.28, p.15-20, 2004.
- WADT, P.G.S.; ANGHINONI, I.; GUINDANI, R.H.P.; DE LIMA, A.S.T.; PUGA, A.P.; DA SILVA, G.S.; PRADO, R.M. Padrões nutricionais para lavouras arrozais irrigadas por inundação pelos métodos da CND e Chance Matemática. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p. 145-156, 2013.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E APLICAÇÕES

4.1. Efeitos das condições ambientais

O conhecimento das interações abióticas dos genótipos com os sítios traz informação relevante para a correta alocação dos materiais genéticos, para avaliar o impacto da variabilidade climática e dos atributos do solo na produtividade, nas propriedades da madeira e no manejo nutricional, para ajustar e aprimorar modelos de predição, e contribuir na definição de ambientes de produção e unidades de manejo florestal. Embora este estudo tenha sido conduzido em áreas comerciais, onde se pressupõe um efeito importante do manejo sobre o desenvolvimento dos plantios, os resultados foram consoantes com os obtidos em diversos trabalhos realizados em áreas experimentais nas mesmas condições edafoclimáticas (IPEF, 2019). Isso confirma que, numa escala geográfica ampla, as limitações ambientais se sobrepõem a pequenas diferenças no manejo das florestas, o que é interessante para definir o grau de intervenção por meio de práticas silviculturais e para a otimização do uso dos recursos, visando uma produção florestal sustentável.

No setor florestal brasileiro é amplamente conhecida a alta plasticidade fenotípica do clone AEC144, que lhe confere a capacidade de sobreviver e se adaptar bem a diferentes condições climáticas (Binkley et al., 2017; Araújo et al., 2019). Mesmo assim, neste estudo foi observada uma variação de cinco vezes na produtividade em volume de madeira, sendo explicada em 71% pela precipitação pluvial. Esse fato, além de reforçar a importância da disponibilidade hídrica na produção do eucalipto, sinaliza a possibilidade de uso de modelos empíricos para prever o potencial produtivo das regiões em função da precipitação. O uso destes modelos mais simples é especialmente útil em locais que dispõem de poucas informações prévias, como é o caso das novas áreas de fronteira e áreas de expansão dos empreendimentos florestais. Ainda, o desenvolvimento de modelos a partir de variáveis que reflitam os padrões de distribuição das chuvas e do déficit hídrico (i.e.: MDEF10) e a capacidade de armazenamento de água dos solos (i.e.: teor de argila e CAD), poderão gerar boas estimativas da produtividade ao nível regional.

A temperatura média do ar, além de apresentar relação negativa com a produtividade e com os teores de nutrientes nas folhas, apresentou ter alto poder discriminatório, pela análise discriminante canônica, indicando ser útil na separação e classificação de grandes ambientes de produção. As funções canônicas obtidas poderão auxiliar na classificação de novas parcelas. Além dos três mega ambientes identificados pela análise discriminante, parece ser adequada uma subdivisão das áreas estudadas em MG, devido às diferenças importantes observadas na produtividade entre as áreas com precipitação acima e abaixo de 1000 mm ano⁻¹.

4.2. Diagnose nutricional de povoamentos florestais

A importância de um correto diagnóstico nutricional reside na necessidade de utilizar os resultados das análises foliares para decidir realizar — ou não — adubações complementares, de modo a corrigir as deficiências nutricionais e diminuir, assim, as chances de perda da produtividade. Contudo, a interpretação das análises foliares por si só não garante uma recomendação de adubação eficaz. Essa decisão deve fundamentar-se numa análise mais ampla, que envolva a verificação de outras variáveis, como possíveis sintomas visuais de deficiências nutricionais ou variações nos índices de área foliar, atributos da fertilidade do solo que possam indicar baixa disponibilidade dos nutrientes aparentemente deficientes nas plantas, o crescimento das árvores relativo ao material genético, época de plantio e tipo de clima regional (i.e.: tropical, subtropical) e a aderência das adubações anteriores às recomendações técnicas. Uma análise integrada desses aspectos permitiria avaliar melhor a probabilidade de ocorrer, de fato, uma deficiência nutricional, e compreender se a mesma pode vir a limitar a produtividade. Por outro lado, a constatação das frequências com que ocorrem desvios nutricionais (deficiências ou excessos) facilita a implementação de ajustes nos programas de fertilização dos empreendimentos florestais, ao mesmo tempo que permite definir projetos de pesquisa direcionados à avaliação da resposta das árvores às adubações corretivas com aqueles nutrientes classificados como mais limitantes em cada região, permitindo ainda a validação dos valores de referência usados na diagnose nutricional.

As metodologias empregadas neste estudo, assim como outras amplamente utilizadas na diagnose nutricional das mais diversas culturas, como DRIS (Beaufils, 1973), IBKW (Kenworthy, 1961), CND (Parent e Dafir, 1992), etc., possuem tanto vantagens quanto limitações, e podem prover resultados divergentes. Não existe, atualmente, um consenso na literatura sobre qual método de diagnose nutricional é o mais adequado. Alguns autores coincidem em concluir que os métodos são complementares, e não excludentes, e em recomendar o uso simultâneo de vários deles para a interpretação de um mesmo conjunto de análises foliares (Almeida et al., 2016; Blanco-Macias et al., 2010). Os novos cenários de mudanças climáticas podem sugerir alterações nos níveis críticos dos nutrientes nas folhas. Do mesmo modo, a introdução de novos materiais genéticos e as mudanças nos patamares de produtividade, demandam uma atualização constante dos valores de referência para a diagnose nutricional do eucalipto, possível de ser realizado pelos métodos aqui testados.

Referências

ALMEIDA, E.I.B., DE DEUS, J.A.L., CORRÊA, M.C.M., CRISOSTOMO, L.A., NEVES, J.C.L. Linha de fronteira e chance matemática na determinação do estado nutricional de pitaia. **Revista Ciência Agrônômica**, 47:4, 744-754, 2016.

- ARAUJO, M.J., PAULA, R.C., CAMPOE, O.C., CARNEIRO, R.L. Adaptability and stability of eucalypt clones at different ages across environmental gradients in Brazil. **Forest Ecology and Management**, 454, 117631, 2019.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O.C.; ALVARES, C.A.; CARNEIRO, R.L.; STAPE, J.L. Variation in whole-rotation yield among *Eucalyptus* genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS Project. **Forest Ecology and Management** 462 (2020) 117953
- BLANCO-MACIAS, F., MGALLANES-QUINTANA, R., VALDEZ-CEPEDA, R. D., VASQUEZ-ALVARADO, R., OLIVARES-SÁENZ, E., GUTIERREZ-ORNELAS, E., VIDALES-CONTRERAS, J.A., MURILLO-AMADOR, B. Nutritional reference values for *Opuntia ficus-indica* determined by means of the boundary-line approach. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 173, 972-934, 2010.
- BEAUFILS, E.R. **Diagnosis and Recommendation Integrated Systems (DRIS)**. Pietermaritzburg, University of Natal, 1973. 132p.
- IPEF. **Programa Cooperativo TECHS-IPEF, Relatório Final – 2012-2018**. Piracicaba, IPEF, 2019.
- KENWORTHY, A. L. Interpreting the balance of nutrient-elements in leaves of fruit trees. In: REUTHER, W. *Plant analysis and fertilizers problems*. Washington: American Institute of Biological Science, p. 28-43, 1961.
- PARENT, L.E.; DAFIR, M.A. Theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.117, p 239-242, 1992.