



RAQUEL OLIVEIRA BATISTA

**CINÉTICA DE ABSORÇÃO DE NUTRIENTES,
MORFOLOGIA RADICULAR E EFICIÊNCIA
NUTRICIONAL DE CLONES DE CEDRO
AUSTRALIANO**

LAVRAS – MG

2014

RAQUEL OLIVEIRA BATISTA

**CINÉTICA DE ABSORÇÃO DE NUTRIENTES, MORFOLOGIA
RADICULAR E EFICIÊNCIA NUTRICIONAL DE CLONES DE CEDRO
AUSTRALIANO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto

LAVRAS – MG

2014

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Batista, Raquel Oliveira.

Cinética de absorção de nutrientes, morfologia radicular e eficiência nutricional de clones de cedro australiano / Raquel Oliveira Batista. – Lavras : UFLA, 2014.

104 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Antonio Eduardo Furtini Neto.

Bibliografia.

1. Aspectos morfológicos radiculares. 2. Parâmetros cinéticos. 3. Influxo de nutrientes. 4. Absorção. 5. Translocação. 6. Utilização de macronutrientes. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 634.9756

RAQUEL OLIVEIRA BATISTA

**CINÉTICA DE ABSORÇÃO DE NUTRIENTES, MORFOLOGIA
RADICULAR E EFICIÊNCIA NUTRICIONAL DE CLONES DE CEDRO
AUSTRALIANO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 18 de Julho de 2014.

Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto	UFLA
Dr. Valdemar Faquin	UFLA
Dra. Maria Lígia de Souza Silva	UFLA
Dr. Silvio Júnio Ramos	Instituto Tecnológico Vale
Dra. Sheila Isabel do Carmo Pinto	IFMG - Bambuí
Dr. Silvino Guimarães Moreira	UFSJ

Dr. Antonio Eduardo Furtini Neto
Orientador

LAVRAS – MG

2014

Aos meus pais, Jorge e Teresinha; aos meus irmãos, Marco Antônio (in memoriam), Rafael e Rosana e a toda minha família, pelo amor incondicional.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é a realização de uma grande conquista: Doutorado em Ciência do Solo. Tal objetivo foi possível de ser alcançado graças ao apoio de uma equipe fantástica: Iluminação Divina, Família, Amigos, Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, Professores, Laboratoristas, Funcionários, Estagiários e Órgãos de Fomento à Pesquisa. O caminho foi longo e com diversos obstáculos, mas todos foram superados e transformados em um valioso aprendizado. Neste contexto, é com muita alegria e satisfação que venho agradecer a todos que fizeram parte dessa trajetória.

A Deus, pela inspiração e proteção para contemplar mais uma conquista.

À minha família, pelo companheirismo, pelo carinho e pelo amor proporcionados durante todos esses anos. Ao meu pai Jorge e à minha mãe Teresinha, pelos inúmeros incentivos de coragem e determinação, que me proporcionaram força para encarar com sabedoria as fases da vida. Aos meus irmãos Rafael e Rosana, pelas palavras de sabedoria e pelo apoio em todos os momentos.

À cidade de Lavras, pelo acolhimento aconchegante e pela qualidade de moradia.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Ciência do Solo (DCS), pela oportunidade de aperfeiçoamento.

Ao professor Antonio Eduardo Furtini Neto, meu orientador, pelo profissionalismo, disponibilidade, amizade, confiança, bom senso, paciência e pela valiosa orientação. A sua missão de educar pessoas é sábia e grandiosa, sou grata pela oportunidade de aprendizagem diante dos seus ensinamentos.

A todos os professores do DCS pelo convívio e pelas disciplinas ministradas que contribuíram para a minha formação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudos e recursos financeiros.

À Bela Vista Florestal pelo suporte para a realização deste trabalho.

A EMBRAPA (CNPMS) pela avaliação das raízes através do “WinRhizo” sob a orientação do pesquisador Dr. Paulo César Magalhães.

Ao pesquisador Dr. Álvaro Vilela Resende da Embrapa Milho e Sorgo, pelo incentivo e apoio para a realização do Doutorado.

Aos professores Fátima Maria de Souza Moreira, Valdemar Faquin, Moacir de Souza Dias Junior e à Pós-Doutoranda Ana Rosa Ribeiro Bastos, pela participação da banca do exame de minha qualificação, com sugestões que promoveram melhorias significativas no trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Valdemar Faquin, Dr.^a Maria Lígia de Souza Silva, Dr. Silvio Júnio Ramos, Dr.^a Sheila Isabel do Carmo Pinto e Dr. Silvino Guimarães Moreira, pela valiosa contribuição com sugestões e alterações para melhoria da tese.

Ao professor e amigo Geraldo pela amizade, pelo convívio, pelas prosas, pelo carinho e pelas sábias palavras sempre proferidas no momento certo.

Aos professores Francisco e Vicente, pelos inúmeros incentivos. Os admiro e respeito pela força de vontade em nos transmitir que todos os obstáculos são meros acontecimentos para a nossa evolução pessoal e profissional.

Ao professor Alfredo, símbolo de força e determinação, pelo carinho e dedicação a todos do DCS, sempre ajudando com dicas valiosas para o nosso aperfeiçoamento profissional.

Ao professor Antonio Claudio Davide, do Departamento de Ciências Florestais da UFLA, pela oportunidade de iniciar os trabalhos científicos na área de silvicultura e pelas sugestões e ensinamentos.

Ao corpo técnico administrativo do DCS, em especial os laboratoristas Roberto, Humberto, Gilson, Cristina e Adalberto (Laboratórios de Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas), pelo auxílio nas análises químicas e as secretárias Dirce, Maria Alice, Regina e Riqueline, pela presteza em diversas situações.

Aos servidores, em especial Dona Eliana, Miriam, Cleuza e Sr. Antônio por proporcionarem um ambiente limpo e agradável para o nosso trabalho.

Aos pós-graduandos do DCS: Clério, Julian, Luana, Laíze, Geila, Paula Sant'Anna, Breno, Guilherme Dinali, Wesley, Gabriela Camargos, Maykom, Hécio, Geanderson, Davi, André, Rômulo Alexandrino, Rômulo Duarte, Douglas Amaral, Viviane, Sara, Eduardo, Elaine, Bruno Moretti, Kaio Dias, Damiany, Raphael Siqueira, Eduane, Cristiano, Karine Dias, Bruno Benatti, Guilherme Amaral, Ana Paula Corguinha, Dani Andrade, Jessé, Rodolfo, Livia Coelho, Malu, Paulo Boldrin, Bruno Montoani, Nilma, Vanessa, Márcia Rufini, Fabrício Ávila, Vladimir, Leandro, Sílvia e Zélio, pelo convívio durante essa temporada, compartilhando conhecimentos e vivências, além das descontrações e risadas em nossas eventuais festas.

Às adoráveis amigas Doutoradas Daniele, Amanda, Gabriela Pinheiro e Bárbara Zini, pela amizade, pelo companheirismo, pela alegria e pelos inúmeros gestos de amor e carinho. Tenho certeza que conquistei grandes amigas e agradeço-as por tudo.

À companheira e amiga Pós-Doutoranda Soami Deccetti, pela amizade, pelo convívio e pela participação em todas as etapas do presente trabalho.

Aos estagiários Cassiano e Sabrina, do DCS, pela dedicação e pela colaboração durante a execução dos experimentos.

Às “flatmates” Karen Paiva, Ana Carla, Rimena e Maria Izabel, pela amizade e pela convivência em harmonia.

À eterna família 303 (Karen, Lucinéia, Paula, Milena e Emiliane) e agregados (Quedes, Willian, Gregório, Daniel, Felipe e Vladimir) pela convivência e amizade.

Aos companheiros caninos Tuí, Duquesa e Pretinha, pelos diversos momentos de diversão.

Enfim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução deste valioso trabalho e, que, de certa forma, me transformaram em uma pessoa melhor.

MEU SINCERO AGRADECIMENTO A TODOS VOCÊS!!!

“Oh, que maravilha é este mundo criado por Deus! É repleto de infinita Sabedoria! É repleto de infinito Amor! É repleto de infinita Vida! É repleto de infinita Provisão! É repleto de infinita Alegria! É repleto de infinita Harmonia! Obrigado Senhor!”.

Mestre Masaharu Taniguchi

RESUMO

Em função das exigências do setor florestal por produtos de melhor qualidade, é crescente a busca por informações que possam se refletir na redução de custos de produção, com o aproveitamento do potencial produtivo de materiais genéticos superiores. Neste contexto, a utilização de genótipos mais eficientes no aproveitamento dos nutrientes disponíveis é uma prática que pode qualificar o empreendimento florestal. Os objetivos do presente estudo foram caracterizar e diferenciar clones de cedro-australiano, cultivados em solução nutritiva, quanto à morfologia radicular, aos parâmetros cinéticos de absorção de P, K, Ca e Mg (V_{max} , K_m , C_{min} e influxo), ao crescimento, à produção de biomassa e as eficiências de absorção, translocação e utilização de macronutrientes. Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação e câmara de crescimento, com a utilização de quatro clones de cedro-australiano: HE, XF, XD e XE, distribuídos em experimento com delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições. Foram determinados, após 45 dias de cultivo em solução nutritiva, características morfológicas do sistema radicular e da parte aérea, os parâmetros cinéticos de absorção de P, K, Ca e Mg, atributos relacionados à produção de biomassa e os índices de eficiência nutricional. Os genótipos estudados apresentam diferenças quanto ao crescimento, à produção de biomassa e às eficiências de absorção, translocação e utilização de macronutrientes. As características morfológicas radiculares variam entre os clones de cedro-australiano, tendo destaque para o clone XD que apresentou um maior desenvolvimento do sistema radicular. Em condições de variações na disponibilidade, os clones XF e XE apresentam maior plasticidade na absorção de P e K, respectivamente, e o clone HE na absorção de Ca e Mg. Quanto à eficiência nutricional, os clones podem ser categorizados considerando a seguinte ordem: HE > XE > XD > XF. O clone HE se destacou como mais eficiente na absorção e utilização de N, P, K, Ca e S, refletindo em um maior crescimento vegetativo e produção de biomassa. Estas informações podem permitir a alocação dos mesmos para sítios florestais com distintas condições de fertilidade do solo, racionalizando a atividade florestal.

Palavras-chave: Atributos morfológicos radiculares. Influxos de nutrientes. Absorção. Translocação. Utilização de macronutrientes.

ABSTRACT

Due to the requirements of the forest sector on better quality products, is increasing the search for information that may be reflected in the reduction of production costs, with the use of the productive potential of superior genetic materials. In this context, the use of more efficient genotypes in utilization of available nutrients is a practice that can qualify the forestry enterprise. The aims of this study were characterize and differentiate Australian cedar clones, in nutrient solution, regarding root morphology, kinetic parameters of uptake of P, K, Ca and Mg (V_{max} , K_m , C_{min} and influx), plant growth, biomass production and absorption, translocation and macronutrient utilization's efficiencies. The experiments were conducted in greenhouse and plat growth room with the use of four of Australian cedar clones: HE, XF, XD and XE distributed on an experiment with completely randomized design with five replications. After 45 days of cultivation in nutrient solution were determined morphological characteristics of the root system and aerial part, the kinetic parameters uptake of P, K, Ca and Mg, related to biomass production attributes and indexes of nutritional efficiency. The genotypes evaluated presented differences related to growth, biomass production and absorption, translocation and macronutrient utilization's efficiencies. The morphological root characteristics range among the Australian cedar clones, having as a highlight, clones XD which presented a greater development of the root system. Under conditions of variations in the availability, both clones XF and XE present greater plasticity in the uptake of P and K, respectively and clone HE in the uptake of Ca and Mg. As to the nutritional efficiency, the clones can be categorized considering the following order: HE>XE>XD>XF. Clone HE stood out as the most efficient in the uptake and utilization of N, P, K, Ca and S, reflecting into a greater vegetative growth and biomass yield. This information can enable the allocation of them to the forest sites with distinct conditions of soil fertility, making forest business rational.

Keywords: Morphological root attributes. Nutrient inflows. Uptake. Traslocation. Macronutrient utilization.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	13
1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Cedro-Australiano (<i>Toona ciliata</i> var. <i>australis</i> M. Roem.)	15
2.2	Eficiência nutricional em plantas	18
2.2.1	Aspectos morfológicos radiculares	18
2.2.2	Aspectos fisiológicos	22
2.2.3	Índices utilizados para a avaliação da eficiência nutricional em plantas	25
3	CONSIDERAÇÕES GERAIS	28
	REFERÊNCIAS	29
	SEGUNDA PARTE	40
	ARTIGO 1 Morfologia radicular e cinética de absorção de nutrientes por clones de cedro-australiano.....	40
	ARTIGO 2 Eficiência nutricional para macronutrientes em clones de cedro-australiano.....	70

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

Diante da evolução em tecnologia e da gestão florestal nos últimos anos, o Brasil se destaca como uma das principais potências da indústria mundial de base florestal. A maioria dos produtos florestais provém de florestas plantadas, sendo estas representadas por cerca de 7,2 milhões de hectares compostos por eucalipto e pinus, principalmente, além de outras espécies como a Acácia-Negra (*Acacia mearnsii*), Acácia Australiana (*Acacia mangium*), Araucária (*Araucaria angustifolia*), Pópulus (*Populus spp.*), Teca (*Tectona grandis*), Seringueira (*Hevea brasiliensis*) e Paricá (*Schizolobium amazonicum*). No âmbito nacional, o setor florestal é considerado um indutor de desenvolvimento econômico e social, além de boa parte basear a produção de acordo com os preceitos ambientais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF, 2013).

As florestas plantadas minimizam as pressões exercidas em florestas nativas e, em geral, apresentam madeira com qualidade atrativa no mercado. Apesar da sua recente exploração no Brasil, o cedro-australiano tem-se mostrado uma espécie de alto valor agregado para o abastecimento de madeira, principalmente, para a indústria moveleira e construção civil. No entanto, estudos sobre o manejo adequado desta espécie florestal ainda são incipientes.

O grande desafio dos empreendedores do setor é otimizar a relação custo-benefício, aproveitando as diversas condições edafoclimáticas do país. Um dos gargalos para alcançar tal finalidade pode ser representado pela seleção de materiais genéticos adaptados às variações ambientais (LIMA et al., 2005), particularmente, às distintas disponibilidades de nutrientes.

A eficiência nutricional de uma planta pode ser avaliada com o auxílio da análise de aspectos morfológicos, fisiológicos e índices específicos. Dentre os aspectos morfológicos, o sistema radicular é um dos mais estudados, uma vez que quanto mais desenvolvido, maior volume de solo poderá ser explorado para garantir o suprimento de água e nutrientes às plantas. Considerando a fisiologia vegetal, a capacidade de absorção de íons pode ser avaliada através de parâmetros cinéticos como a velocidade máxima de absorção (V_{max}), a constante de Michaelis-Menten (K_m), a concentração mínima do nutriente na solução (C_{min}) e o influxo (NIELSEN; BARBER, 1978; PINTO, 2009; VILELA; ANGHINONI, 1984). Índices que expressam a eficiência do vegetal em absorver (SWIADER; CHYAN; FREIJI, 1994), translocar (LI; MCKEAN; ALLEN, 1991) e utilizar (SIDDIQI; GLASS, 1981) os nutrientes disponíveis também são importantes para esta caracterização.

Estas informações podem fornecer subsídios para empresas florestais e produtores rurais alocarem os genótipos de interesse para distintos sítios florestais, bem como adotarem diferenciados regimes de adubação (FARIA et al., 2008). Estas medidas podem refletir no uso racional de corretivos e fertilizantes, reduzindo os custos de produção, além de contribuir para a manutenção da sustentabilidade florestal.

Considerando a escassez de informações sobre a eficiência nutricional da espécie, o objetivo deste trabalho foi caracterizar e diferenciar, na fase de muda, clones de cedro-australiano quanto à capacidade de absorção de nutrientes por meio da determinação de características morfológicas radiculares e de parâmetros cinéticos de absorção de Ca, Mg, K e P, bem como avaliar o crescimento, a produção de biomassa e os índices de absorção, translocação e de utilização dos macronutrientes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cedro-Australiano (*Toona ciliata* var. *australis* M. Roem.)

O cedro-australiano (*Toona ciliata*) é a espécie mais abrangente do gênero *Toona*, pois ocorre naturalmente distribuída em regiões da Índia e do Paquistão, ao sul e nordeste da China e na costa leste da Austrália (BYGRAVE; BYGRAVE, 2005; EDMONDS, 1993). Nas florestas tropicais do leste da Austrália, esta espécie ocorre, principalmente, em áreas desde “New South Wales” até “Queensland” (MCPHEE et al., 2004). No entanto, em suas regiões de origem há poucas áreas de cultivo do cedro-australiano. Esta condição é reflexo do extrativismo sem censura e da suscetibilidade da espécie ao ataque da praga *Hypsipyla robusta*, responsável por danos irreversíveis nas árvores (BYGRAVE; BYGRAVE, 2005).

Pertencente à família Meliaceae, o cedro-australiano juntamente com espécies arbóreas dos gêneros *Swietenia*, *Khaya*, *Cedrela*, *Chukrasia*, *Xylocarpus* e *Toona*, apresentam sensibilidade ao ataque da broca do ponteiro (*Hypsipyla grandella* e *Hypsipyla robusta*). Esta é a principal praga desta família vegetal e apresenta distribuição pantropical, causando danos econômicos nas florestas tropicais da América, África, Ásia e Oceania (BYGRAVE; BYGRAVE, 2005; SCHABEL et al., 1999). Em síntese, a broca (*Hypsipyla grandella*) encontra condições favoráveis para o seu crescimento na América Central e do Sul, tendo espécies do gênero *Swietenia* e *Cedrela*, como principais hospedeiros. Por outro lado, a broca (*Hypsipyla robusta*) se desenvolve melhor em regiões da África, Ásia e Oceania, com destaque da Austrália, tendo preferência por árvores pertencentes ao gênero *Khaya*, *Toona* e *Chukrasia* (BYGRAVE; BYGRAVE, 2005; GRIFFITHS, 2000). Neste contexto, foram

realizados estudos que demonstram a viabilidade do cultivo do cedro-australiano no Brasil.

A árvore é considerada de grande porte, podendo atingir 40 m de altura e alcançar 1,0 m de diâmetro a altura do peito, segundo relatos de Bygrave e Bygrave (2005). A madeira desta espécie pode ser utilizada para diversas finalidades, sendo o seu uso mais nobre para serraria (SOUZA; BARROSO; CARNEIRO, 2010). É largamente utilizada nas obras de entalhe e esculturas, na construção civil e naval, na confecção de lápis e de instrumentos musicais, compensados e móveis, dentre outras (WORLD AGROFORESTRY CENTRE, 2014).

Pinheiro, Lani e Couto (2006) relatam que o tronco da árvore é retilíneo e de acordo com Pereyra et al. (2006) a madeira apresenta densidade básica média de $0,337 \text{ g cm}^{-3}$, podendo ser considerada uma madeira leve. Tais características contribuem para a obtenção de madeira com boa qualidade para a confecção, particularmente, de móveis, agregando valor ao empreendimento.

O cedro-australiano foi denominado de “Red Gold”, ou seja, ouro vermelho, devido à coloração avermelhada e à valorização da madeira. Esta espécie foi descoberta no século XVIII e no século XX foi relatada a presença de poucos fragmentos remanescentes. A madeira desta árvore foi muito utilizada para construção naval e civil, particularmente em função da excelente qualidade e da resistência às diversas pragas, obtendo produtos com maior durabilidade (BYGRAVE; BYGRAVE, 2005).

O cultivo do cedro-australiano no Brasil teve início em meados da década de 70, sendo impulsionado apenas no final dos anos 80, com a distribuição de mudas aos produtores rurais, às escolas de ciências agrárias e aos demais interessados, realizada por uma empresa do setor florestal. Os motivos da expansão do cultivo desta espécie no país se devem a sua boa adaptação às condições edafoclimáticas e à resistência ao ataque da broca *Hypsipyla*

grandella, além da valorização de sua madeira (SOUZA; BARROSO; CARNEIRO, 2010).

No Brasil, o cedro-australiano adaptou-se melhor em áreas com precipitação anual igual ou superior a 1.100 mm, em solos de boa drenagem e em locais com ausência de geadas. O cultivo dessa espécie em solos rasos deve ser evitado, pois compromete o seu crescimento/desenvolvimento. O estabelecimento da cultura pode ser realizado tanto em baixas quanto em elevadas altitudes (até 1.700 m), sendo mais sensível a altitudes mais acentuadas (LORENZI et al., 2003; SOUZA; BARROSO; CARNEIRO, 2010). Esta espécie apresenta uma alta exigência nutricional, além de ser pouco tolerante a acidez do solo (BENATTI et al., 2012; BRAGA, 2011).

Vilela e Stehling (2012) relatam que o cedro-australiano possui potencial para atingir um incremento médio anual de $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, dependendo das boas condições de cultivo, como solo, clima, precipitação e tratos culturais. Os autores mencionam um recente estudo desenvolvido na Universidade Federal de Lavras (UFLA), com árvores de 18 anos providas de Venda Nova do Imigrante – ES. Neste estudo, os autores observaram uma média de 3,9 toras de aproximadamente 2,8 m de comprimento, além de um volume médio de madeira serrada de $0,85 \text{ m}^3$ por árvore.

Todo e qualquer empreendimento florestal requer um bom planejamento para adquirir o máximo retorno possível, analisando, previamente, aspectos desde a implantação das florestas plantadas até o escoamento final da matéria-prima. Informações a respeito dos melhores tratos culturais da espécie florestal alvo são indispensáveis para explorar o seu potencial produtivo com maior segurança. Para o cultivo do cedro-australiano, isto não ocorre de forma diferente, portanto, levando em consideração essa estratégia, bem como a qualidade da madeira compatível com a de outras espécies, como o mogno (*Swietenia macrophylla*) e o cedro brasileiro (*Cedrella fissilis*), por exemplo, o

seu plantio apresenta-se como uma alternativa promissora para o mercado madeireiro. A madeira de cedro-australiano é valorizada no mercado nacional e internacional. De acordo com Stehling (2014), a confecção de forros, lambris, portas e janelas com a madeira de cedro-australiano, torna-se atrativa devido aos melhores preços, sendo comercializados, no Sul de Minas, por até R\$ 2.500,00 o m³, sendo o caso de lambris feitos com madeira de 8 anos. Segundo a International Tropical Timber Organization - ITTO (2014), a madeira serrada foi cotada na Malásia, em 2010, por U\$ 683 o m³.

Apesar da boa adaptação do cedro-australiano no país, especialmente nas regiões sudeste, sul e centro oeste, pesquisas sobre o seu cultivo ainda são necessárias, uma vez que há poucas informações a respeito das práticas silviculturais e exigências nutricionais adequadas ao seu manejo com o intuito de favorecer um custo-benefício atrativo aos produtores rurais.

2.2 Eficiência nutricional em plantas

Um fator de grande relevância a ser considerado para a adoção de regimes de adubação para uma cultura, bem como a sua alocação para sítios com distinta disponibilidade de nutrientes é a eficiência que a mesma possui em aproveitar os nutrientes disponíveis na solução do solo. Levando em consideração a variabilidade genética existente entre espécies e genótipos, tais finalidades podem ser alcançadas pela avaliação de alguns aspectos, tais como aspectos morfológicos, fisiológicos e índices de eficiência nutricional.

2.2.1 Aspectos morfológicos radiculares

A demanda por nutrientes é impulsionada pelas exigências metabólicas das plantas, o que ocasiona no controle sobre as quantidades de nutrientes a

serem absorvidas pelas células radiculares (GREGORY, 2006). Neste caso, fatores intrínsecos das plantas e condições ambientais podem interferir no processo de absorção de nutrientes pelo sistema radicular.

A variabilidade genética existente entre espécies reflete em diferenças na capacidade de desenvolver raízes para explorar o solo em busca de água e nutrientes, distinguindo-se quanto ao comprimento, volume, diâmetro médio, área superficial, dentre outras características. Esta constatação foi abordada por alguns autores em estudos com espécies florestais tais como Acácia-Negra (CECONI et al., 2008), *Eucalyptus* sp. (MELLO; GONÇALVES; OLIVEIRA, 1998; NAVROSKI et al., 2010; VIEIRA; SCHUMACHER; LIBERALESSO, 2012), *Pinus (Pinus pinaster)* (BAKKER; AUGUSTO; ACHAT, 2006), Cedro-Japonês (*Cryptomeria japonica*) (KONÔPKA et al., 2006) e Pópulus (BLOCK; REES; KNIGHT, 2006).

Considerações de Pinto (2009) a respeito de diferenças na morfologia radicular entre genótipos de eucalipto evidenciam capacidades diferenciadas na absorção de nutrientes pelas raízes. Este fato também foi abordado por Sanes et al. (2013) em um experimento com arroz irrigado, em que a morfologia de raízes variou entre os materiais genéticos avaliados, apresentando diferenças na absorção de K, por exemplo.

Na literatura específica, verifica-se a indicação de algumas características do sistema radicular consideradas mais importantes na distinção de genótipos e espécies quanto à eficiência de absorção de nutrientes, como é o caso da área e comprimento das raízes (BAPTISTA; FERNANDES; SOUZA, 2000; VILELA; ANGHINONI, 1984). Neste caso, plantas com raízes mais longas e mais finas podem ser mais eficientes na absorção de nutrientes pouco móveis no solo, como o K e o P (ZONTA et al., 2006).

De acordo com Vogt et al. (1989) as raízes de espécies arbóreas podem ser separadas em três categorias, levando em consideração o tamanho e a

morfologia: raízes grossas, raízes de diâmetro médio – ambas apresentam baixa taxa de regeneração, e raízes finas – com alta taxa de regeneração. Dentre estas categorias, as raízes finas são as principais responsáveis pela absorção de água e nutrientes (FITTER, 1991). Com isto, torna-se válido o conhecimento da região onde acontece maior atividade das raízes, que pode auxiliar no manejo do fornecimento de nutrientes via solo (SANTOS; COELHO; AZEVEDO, 2005).

Em espécies de eucalipto, o predomínio de raízes finas é comumente observado sob condições de campo (WITSCHORECK; SCHUMACHER; CALDEIRA, 2003). No estudo realizado por Batista et al. (2013) com clones de eucalipto cultivados em solução nutritiva, os autores avaliaram a extensão de raízes em diferentes classes de diâmetro e observaram que o sistema radicular desses genótipos foi formado por um percentual aproximado de 80% de raízes finas absorventes.

Em sítios florestais sob condições de limitação de nutrientes, como é o caso de solos altamente intemperizados em regiões tropicais, ocorre a proliferação de raízes finas nas camadas superficiais com maior presença de matéria orgânica. Segundo Laclau et al. (2004) esta é uma estratégia da planta para adquirir nutrientes nestas condições, pelo suprimento via decomposição da matéria orgânica. Tal consideração também foi reportada por Janssens et al. (2002) em florestas de *Pinus* spp..

A dinâmica do sistema radicular auxilia na manutenção dos equilíbrios biológicos e químicos do solo (ZOBEL, 2005). Na revisão de literatura realizada por Freitas, Barroso e Carneiro (2008) a respeito da dinâmica de raízes de espécies arbóreas, os autores verificaram que esta é sensível às condições edafoclimáticas distintas, variando em função das espécies, idade do povoamento, disponibilidade de recursos, competição entre os indivíduos, manejo, dentre outros.

O sistema radicular pode ser afetado por mudanças sazonais, estimulando a produção ou a mortalidade de raízes. Segundo Konôpka et al. (2006), foi observado uma maior produção de raízes finas de cedro-japonês devido ao estresse hídrico sofrido pelas plantas, e uma menor taxa de mortalidade até o final do verão, sendo esta a estação em que a espécie apresentou alto poder de absorção de água e nutrientes. Diferenças sazonais associadas à profundidade de distribuição na produção de raízes finas foram observadas por Janssens et al. (2002) em florestas de Pinus (*Pinus sylvestris* L.).

Os nutrientes podem afetar de forma diferenciada o crescimento do sistema radicular das plantas. A título de exemplo, o Ca é responsável pela integridade da membrana plasmática e da parede celular; o P é componente essencial de membranas biológicas via fosfolipídeos e participa de processos metabólicos endergônicos, tais como na síntese de macromoléculas (amido, proteínas e lipídeos); e o B é constituinte de parede celular e auxilia no transporte de açúcares na planta (MARSCHNER, 2012). Levando em consideração a importância do B no crescimento raízes, Reis (2011) verificou que a adubação com este nutriente em eucalipto sob condições de déficit hídrico promoveu o crescimento do sistema radicular, mitigando os efeitos negativos deste estresse, devido à baixa disponibilidade de água para as plantas. Em um estudo com cedro-australiano, Furtini Neto et al. (2014) observaram que a deficiência de B afetou, consideravelmente, o desenvolvimento do sistema radicular, comprovando a importância deste nutriente para a formação de raízes desta espécie.

A longevidade das raízes finas pode ser influenciada pela interação de fatores, dentre eles, a espécie, a idade, o diâmetro das raízes, a estação do ano e o solo. Estas interações foram observadas por Block, Rees e Knight (2006) nas raízes de plantas de Pópulus. Levando em consideração a influência da espécie na longevidade das raízes finas (< 1 mm), observa-se, por exemplo, um tempo

médio de 0,2 anos para a mortalidade de raízes de Sitka Spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carrière) (ALEXANDER; FAIRLEY, 1983) e de 3,3 anos para o Pinus (*Pinus sylvestris* L.) (JANSSENS et al., 2002).

Para o setor florestal, a escolha por genótipos ou espécies que apresentam um sistema radicular mais desenvolvido associado a uma maior porcentagem de raízes finas, pode garantir uma maior absorção de nutrientes da solução do solo. No entanto, esta informação aliada aos aspectos fisiológicos como parâmetros cinéticos de absorção de íons e aos índices de eficiência nutricional, permitem distinguir os materiais genéticos mais eficientes no aproveitamento de nutrientes sob distintas condições de disponibilidade no solo.

2.2.2 Aspectos fisiológicos

Dentre os aspectos fisiológicos, os parâmetros cinéticos de absorção de nutrientes representados pela velocidade máxima de absorção – V_{max} , pela constante de Michaelis-Menten – K_m , pela concentração mínima – C_{min} e pelo influxo (I), predizem a respeito da maior ou menor capacidade de absorção de íons pelas plantas a uma dada concentração no meio. O valor de V_{max} refere-se à quantidade do nutriente absorvida quando todos os sítios dos carregadores presentes nas membranas das células das raízes estiverem saturados; K_m indica a concentração de nutriente/íon em solução na qual é atingida a metade da velocidade máxima de absorção, sendo que, quanto menor o seu valor, maior a afinidade do íon com os sítios de absorção (EPSTEIN; HAGEN, 1952); C_{min} corresponde à concentração mínima na qual as raízes podem extrair um nutriente a partir da solução (MARSCHNER, 2012) e o influxo (I) equivale à quantidade de nutriente absorvido por unidade de massa de raiz, por unidade de tempo.

Esses parâmetros são necessários para operar modelos mecanísticos baseados em princípios de transporte de solutos e são úteis para prever os

impactos do cultivo de florestas plantadas sobre o capital e fluxo de nutrientes no solo (LIMA et al., 2005; NEVES, 2000).

De maneira geral, a taxa de absorção de íons por células de plantas, tecidos vegetais e raízes de plantas intactas satura com o aumento da concentração de íons no meio externo (MARSCHNER, 2012). Epstein e Hagen (1952) sugeriram que esta relação era semelhante à que existe entre uma enzima e o seu substrato, assim como foi proposta por Michaelis e Menten (1913) ao desenvolver a teoria geral da cinética enzimática. Esta é simplificada por uma função assintótica entre a velocidade de reação e a concentração do substrato, expressa pela equação matemática $V = V_{max} \cdot C / (K_m + C)$, em que V é a velocidade de reação, V_{max} é a velocidade máxima de reação, C é a concentração do substrato e K_m corresponde à concentração que atinge metade de V_{max} . Esta função foi aplicada para a absorção de nutrientes por raízes de plantas, sendo modificada por Nielsen e Barber (1978) com a inclusão da concentração mínima (C_{min}), ou seja, $I = V_{max} \cdot (C - C_{min}) / [K_m + (C - C_{min})]$.

Materiais genéticos distintos podem apresentar diferentes valores de V_{max} , K_m , C_{min} e influxo, o que reflete em diferenças na capacidade de absorção de um determinado nutriente. Encontram-se na literatura valores de parâmetros cinéticos de absorção determinados para a cultura do eucalipto para o N (GARNETT et al., 2003; GRESPAN; DIAS; NOVAIS, 1998; VALE, 1982), para o P (FURTINI NETO, 1994; VALE, 1982) e para o K, o Ca e o Mg (LIMA et al., 2005). Estes estudos foram realizados mediante a cinética com cada nutriente, isoladamente. Por outro lado, Pinto (2009) propôs a realização de uma cinética de absorção de P, K, Ca e Mg de forma conjunta em clones de eucalipto, em que permitiu abranger as possíveis interações entre os íons utilizados. Tal pesquisa ainda é incipiente, tanto quanto ao método proposto como à utilização de materiais genéticos propagados vegetativamente. Dentre os

estudos citados, apenas os realizados por Lima et al. (2005) e Vale (1982) também utilizaram mudas originadas pela propagação vegetativa.

Levando-se em consideração outras espécies, há estudos que comprovam diferenças na absorção de elementos pela análise de parâmetros cinéticos, como visto para o arroz (MARTINS, 2010; MOREIRA et al., 2003; SANES et al., 2013), feijão (ROSA et al., 2009; SILVEIRA; CARDOSO, 2004), cajueiro (ALVES et al., 2012), gramíneas (BRIX et al., 2010; RUBIO et al., 1997), soja (ANDRADE; ROSOLEM, 2011; SCHONINGER; GATIBONI; ERNANI, 2013), milho (ALVES et al., 2002; COSTA et al., 2000; HORN et al., 2006; MACHADO; FURLANI, 2004; SAMAL et al., 2010), cana-de-açúcar (MARTINS, 2010), *Pinus* sp. (CAMBRAIA et al., 1992) e beterraba (SAMAL et al., 2010).

Em um estudo de cinética de absorção de K realizado por Sanes et al. (2013) com genótipos de arroz, os autores verificaram que os parâmetros cinéticos (V_{max} , K_m e C_{min}) variaram entre os mesmos, o que permitiu distinguí-los quanto à velocidade de absorção do nutriente por unidade de raiz. Neste trabalho, a análise do influxo do K permitiu classificar os genótipos quanto ao potencial de aquisição do nutriente em diferentes grupos: maior potencial, potencial intermediário e menor potencial.

Baptista, Fernandes e Souza (2000) relatam que a combinação de maiores valores de V_{max} e menores valores de K_m e C_{min} obtida com uma cultivar de arroz cultivada em solução nutritiva com 20 mg L^{-1} de N, sugere a possibilidade desta adaptar-se a ambientes com menor disponibilidade deste elemento, em função da sua maior eficiência de absorção.

Genótipos de espécies florestais que apresentam maior eficiência na absorção de nutrientes, geralmente, são alvos para alcançar uma rentabilidade desejada aos empreendedores do setor florestal. Segundo Lima et al. (2005), empresas florestais desenvolvem pesquisas voltadas à seleção de materiais

genéticos adaptados às diversas condições ambientais com o intuito de promover a otimização da relação custo-benefício. Neste caso, a avaliação de parâmetros cinéticos de absorção de nutrientes pode auxiliar na execução desta tarefa.

2.2.3 Índices utilizados para a avaliação da eficiência nutricional em plantas

Os índices de eficiência nutricional, geralmente, são utilizados para caracterizar e diferenciar materiais genéticos quanto a absorção, a translocação e o uso de nutrientes disponíveis sob condições distintas.

A eficiência de absorção de nutrientes expressa a quantidade de elemento absorvido por unidade de massa seca do sistema radicular (SWIADER; CHYAN; FREIJI, 1994). Com a utilização deste índice, Lima et al. (2005) no estudo da eficiência nutricional de clones de eucalipto, verificaram diferenças entre os mesmos quanto à eficiência de absorção de K, Ca e Mg. Estes resultados corroboram com os apresentados por Tomaz et al. (2008) no trabalho com mudas enxertadas de cafeeiro. A alta eficiência de absorção é regulada por mecanismos que diferem entre as espécies, tais como a produção de um sistema radicular bem desenvolvido ou maior influxo de nutrientes pela alta capacidade de absorção por unidade de raiz (FÖHSE; CLAASSEN; JUNGK, 1988).

A eficiência de translocação de nutrientes reflete a quantidade de elemento absorvido que foi transportado para a parte aérea (LI; MCKEAND; ALLEN, 1991). O uso deste índice de eficiência nutricional permitiu distinguir seis clones de eucalipto quanto à translocação de macronutrientes para a biomassa aérea no estudo realizado por Pinto et al. (2011). Fernandes et al. (2007) avaliaram a eficiência nutricional para P, Ca e Mg em mucuna preta (*Stizolobium atterimum*), mucuna cochinchinensis (*Stilozobium cochinchinensis*) e feijão-de-porco (*Canavalia ensiformes*), utilizando diferentes

doses de calcário e P. Os autores verificaram que esta última leguminosa foi mais eficiente no transporte desses nutrientes para a parte aérea.

A eficiência na utilização expressa a capacidade de empregar os nutrientes na síntese da biomassa (CLARKSON; HANSON, 1980; SIDDIQI; GLASS, 1981), podendo variar dentro de uma espécie de planta em decorrência das diferenças genótípicas que podem ocorrer, bem como da interação genótipo-ambiente. No estudo realizado por Abichequer, Bohnen e Anghinoni (2003) com a avaliação da eficiência de uso de P por variedades de trigo na presença e ausência de Al, os autores observaram uma redução deste índice para todos os genótipos cultivados com o acréscimo do Al na solução nutritiva. Fontes, Gama-Rodrigues e Gama-Rodrigues (2013) enfatizam que a eficiência de utilização de P em espécies arbóreas pode ser utilizada como um indicador do estado nutricional das plantas, pois permite prever quedas irreversíveis nas produções de biomassa total, em função de doses excessivas do nutriente. Segundo Graham (1984), genótipos altamente eficientes no uso de nutrientes podem ser mais produtivos devido a alta conversão dos nutrientes em biomassa, em função do transporte mais ágil da seiva bruta no xilema e da rápida assimilação, apresentando uma menor demanda nutricional.

De acordo com Baligar e Fageria (1997) os índices de eficiência nutricional quanto à capacidade das plantas em absorver, transportar e utilizar nutrientes varia com a espécie ou genótipo, com o tipo de solo e com fatores ambientais. A combinação de condições adversas de clima e solo podem ocasionar limitações no potencial produtivo de espécies florestais, porém, segundo Moraes et al. (1990) esta situação pode ser revertida com a adoção de práticas silviculturais, tais como o uso de fertilizantes e a seleção de genótipos mais adaptados a essas condições com o adicional de serem mais eficientes na utilização dos nutrientes disponíveis para as plantas.

A eficiência nutricional é variável entre os genótipos das plantas. Esta afirmativa é constatada em alguns trabalhos, em que se verificam diferenças no aproveitamento dos nutrientes (FARIA et al., 2008; FONTES; GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2013; FURTINI NETO et al., 1996; LIMA et al., 2005; MORAIS et al., 1990; NEVES, 2000; PINTO et al., 2011; SANTANA; BARROS, NEVES, 2002). Este comportamento confere a necessidade de seleção de genótipos que adaptam às condições distintas de solo, principalmente àquelas de baixa disponibilidade de nutrientes. Neste contexto, o cultivo de espécies de rápido crescimento e de baixa demanda por nutrientes torna-se estratégico, uma vez que grande parte dos plantios florestais tem-se expandido para áreas com solos que apresentam baixa fertilidade natural.

Os solos destinados aos plantios florestais são geralmente limitantes em alguns nutrientes como o P, o K, o Ca e o Mg (BARROS; NOVAIS, 1996; SILVEIRA et al., 2004). O eucalipto, por exemplo, é uma cultura que se adapta a baixos níveis de fertilidade do solo, além de ser pouco sensível a acidez do solo, tolerando altos níveis de Al e Mn (NOVAIS; BARROS; NEVES, 1990). Por outro lado, o cedro-australiano é uma espécie exigente em nutrientes na solução do solo e não tolera solos ácidos (BENATTI et al., 2012; BRAGA, 2011). Desta forma, verifica-se que cada espécie possui sua particularidade quanto às exigências nutricionais. Portanto, carece uma devida atenção no fornecimento dos nutrientes para cada cultura em quantidades adequadas, para garantir o equilíbrio nutricional das plantas sem comprometer o seu potencial produtivo.

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Pelo que foi abordado, verifica-se que o cultivo de genótipos com alta eficiência nutricional é estratégico para um melhor aproveitamento dos nutrientes disponíveis no solo. Com isto, pode proporcionar um retorno atrativo às empresas florestais e aos empreendedores do setor, em função do melhor ganho de biomassa por unidade de nutriente absorvido, reduzindo assim, os custos com fertilizantes e corretivos, sem comprometer a produtividade.

De forma geral, plantas eficientes nutricionalmente apresentam um sistema radicular extensivo, parâmetros cinéticos e índices que as qualificam como eficientes em absorver, translocar e utilizar nutrientes sob baixa e, ou, alta disponibilidade no solo. No entanto, nem sempre os genótipos apresentam todas as características desejadas de eficiência para todos os nutrientes. Desse modo, deve-se ressaltar a importância de estudos que caracterizam e distinguem materiais genéticos quanto ao aproveitamento de nutrientes, com o intuito de explorar o potencial produtivo dos mesmos, considerando seus aspectos de maior relevância.

REFERÊNCIAS

ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H.; ANGHINONI, I. Absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo submetidas à toxidez de alumínio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 373-378, mar./abr. 2003.

ALEXANDER, I. J.; FAIRLEY, R. I. Effects of N fertilization on populations of fine roots and mycorrhizae in spruce humus. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 71, p. 49-53, 1983.

ALVES, F. A. L. et al. Cinética de absorção de K^+ na ausência e presença de Na^+ em raízes de cajueiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 439-445, jul./set. 2012.

ALVES, V. M. C. et al. Cinética de absorção de fósforo e crescimento do sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para eficiência a fósforo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 1, n. 1, p. 85-92, abr. 2002.

ANDRADE, G. J. M. de; ROSELEM, C. A. Absorção de manganês em soja RR sob efeito do glifosate. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 3, p. 961-968, maio/jun. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico ABRAF**: ano base 2012. Brasília, 2013. 147 p.

BAKKER, M. R.; AUGUSTO, L.; ACHAT, D. L. Fine root distribution of trees and understory in mature stands of maritime pine (*Pinus pinaster*) on dry and humid sites. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 286, n. 1/2, p. 37-51, June. 2006.

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K. Nutrient use efficiency in acid soils: nutrient management and plant use efficiency. In: MONIZ, A. C. et al. (Ed.). **Plant-soil interactions at low pH: sustainable agriculture and forestry production**. Campinas: Brazilian Soil Science Society, 1997. p. 75-95.

BAPTISTA, J. A.; FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R. Cinética de absorção de amônio e crescimento radicular das cultivares de arroz Agulha e Bico Ganga. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1325-1330, jul. 2000.

BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. In: ATTIWILL, P. M.; ADAMS, M. A. (Ed.). **Nutrition of the eucalypts**. Collingwood: CSIRO, 1996. p. 335-356.

BATISTA, R. O. et al. Parâmetros morfológicos de absorção de nutrientes em diferentes clones de eucalipto. In: CONGRESSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA, 22., 2013, Lavras. **Anais...** Lavras: UFLA, 2013. 1 CD-ROM.

BENATTI, B. P. et al. Development of clonal matrices of australian red cedar in different substrates under fertilizer doses. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 36, n. 3, p. 285-293, maio/jun. 2012.

BLOCK, R. M. A.; REES, K. C. J. van; KNIGHT, J. D. A review of fine root dynamics in *Populus* plantations. **Agroforestry Systems**, Columbia, v. 67, n. 1, p. 73- 84, Apr. 2006.

BRAGA, M. M. **Crescimento e qualidade de mudas de cedro-australiano (*Toona ciliata* M. Roem var. *australis*) em função da aplicação de calcário e enxofre**. 2011. 81 p. Dissertação (Mestrado em Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

BRIX, H. et al. Can differences in phosphorus uptake kinetics explain the distribution of cattail and sawgrass in the Florida Everglades? **BMC Plant Biology**, London, v. 10, n. 23, p. 1-14, 2010.

BYGRAVE, F. L.; BYGRAVE, P. L. **Growing Australian red cedar.** Canberra: RIRDC/Land; Water Australia/FWPRDC/MDBC Joint Venture Agroforestry, 2005. 84 p.

CAMBRAIA, J. et al. Ammonium uptake by *Pinus caribaea* colonized with *Pisolithus tinctorius*. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Campinas, v. 4, n. 2, p. 87-90, 1992.

CECONI, D. E. et al. Biomassa e comprimento de raízes finas em povoamento de *Acacia mearnsii* de wild. estabelecido em área degradada por mineração de carvão. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 1-10, jan./mar. 2008.

CLARKSON, D. T.; HANSON, J. B. The mineral nutrition of higher plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 31, p. 239-298, 1980.

COSTA, C. N. et al. Efeitos do alumínio na morfologia de raízes e na cinética de absorção de potássio em milho. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 6, n. 3, p. 251-253, 2000.

EDMONDS, J. M. The potential value of *Toona* species (Meliaceae) as multipurpose and plantation trees in Southeast Asia. **Commonwealth Forestry Review**, Oxford, v. 72, n. 3, p. 181-186, 1993.

ESPTEIN, E.; HAGEN, E. A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. **Plant Physiology**, Illinois, v. 27, n. 3, p. 457-474, 1952.

FARIA, G. E. et al. Avaliação da produtividade, conteúdo e eficiência de utilização de nutrientes em genótipos de *Eucalyptus* spp. no vale do Jequitinhonha, MG. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 363-373, 2008.

FERNANDES, A. R. et al. Produção de matéria seca e eficiência nutricional para P, Ca e Mg em leguminosas herbáceas. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 37, n. 2, p. 169-176, 2007.

FITTER, A. H. Characteristics and function of root systems. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAKI, U. (Ed.). **Plant roots: the hidden half**. New York: M. Dekker, 1991. p. 15-32.

FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants: I., external and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species. **Plant and Soil**, New York, v. 110, n. 1, p. 101-109, 1988.

FONTES, A. G.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F. Eficiência nutricional de espécies arbóreas em função da fertilização fosfatada. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 73, p. 9-18, 2013.

FREITAS, T. A. S. de; BARROSO, D. G.; CARNEIRO, J. G. de A. Dinâmica de raízes de espécies arbóreas: visão da literatura. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 1, p. 133-142, 2008.

FURTINI NETO, A. E. **Eficiência nutricional, cinética de absorção e frações fosfatadas em *Eucalyptus* ssp.** 1994. 99 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.

FURTINI NETO, A. E. et al. Eficiência nutricional de mudas de *Eucalyptus* em relação a fósforo. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 20, n. 1, p. 17-28, jan./fev. 1996.

FURTINI NETO, A. E. et al. Relação entre nutrição e doenças em espécies florestais. In: PRADO, R. de M.; WADT, P. G. S. (Ed.). **Nutrição e adubação de espécies florestais e palmeiras**. Jaboticabal: FCAV/CAPES, 2014. p. 193-220.

GARNETT, T. P. et al. Kinetics of ammonium and nitrate uptake by eucalypt roots and associated proton fluxes measured using ion selective microelectrodes. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 30, n. 11, p. 1165-1176, Nov. 2003.

GRAHAM, R. D. Breeding for nutritional characteristics in cereals. In: TINKER, P. B.; LANCHLI, A. (Ed.). **Advances in plant nutrition**. New York: Praeger, 1984. p. 57-102.

GREGORY, P. J. **Plant roots: growth, activity and interactions with soils**. Oxford: Blackwell, 2006. 318 p.

GRESPLAN, S. L.; DIAS, L. E.; NOVAIS, R. F. Crescimento e parâmetros cinéticos de absorção de amônio e nitrato por mudas de *Eucalyptus* spp. submetida a diferentes relações amônio/nitrato na presença e ausência de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 4, p. 667-674, out./dez. 1998.

GRIFFITHS, M. W. The biology and host relations of the red cedar tip moth, *Hypsipyla robusta* in Australia. In: AUSTRALIAN FOREST GROWERS 2000 CONFERENCE, 9., 2000, Melbourne. **Proceedings...** Melbourne: ACIAR, 2000. p. 135-140.

HORN, D. et al. Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidade genética contrastante. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 30, n. 1, p. 77-85, jan./fev. 2006.

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION. **Annual review and assessment of the world timber situation**. Disponível em: <http://www.itto.int/annual_review/>. Acesso em: 15 maio 2014.

JANSSENS, I. A. et al. The carbon cost of root turnover in a Scots pine forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 168, n. 1/3, p. 231-240, Sept. 2002.

KONÔPKA, B. et al. Fine root dynamics in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation throughout the growing season. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 225, n. 1/3, p. 278-286, Apr. 2006.

LACLAU, J. P. et al. The function of the superficial root mat in the biogeochemical cycles of nutrients in Congolese *Eucalyptus* plantations. **Annals of Botany**, Oxford, v. 93, n. 3, p. 249-261, Mar. 2004.

LI, B.; MCKEAND, S. E.; ALLEN, H. L. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings. **Forest Science**, Bethesda, v. 37, n. 2, p. 613-626, June 1991.

LIMA, A. M. N. et al. Cinética de absorção e eficiência nutricional de K, Ca e Mg em plantas jovens de quatro clones de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 6, p. 903-909, 2005.

LORENZI, H. et al. **Árvores exóticas no Brasil: madeiras, ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2003. 368 p.

MACHADO, C. T. de T.; FURLANI, A. M. C. Kinetics of phosphorus uptake and root morphology of local and improved varieties of maize. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 1, p. 69-76, 2004.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. San Diego: Academic, 2012. 651 p.

MARTINS, P. O. **Cinética de absorção de silício por cultivares de cana-de-açúcar e de arroz**. 2010. 77 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2010.

MCPHEE, J. et al. **Red cedar in Australia**. Sydney: Historic House Trust, 2004. 128 p.

MELLO, S. L. M.; GONÇALVES, J. L. M.; OLIVEIRA, L. E. G. Características do sistema radicular em povoamentos de eucaliptos propagados por sementes e estacas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 54, p. 16-26, dez. 1998.

MICHAELIS, L.; MENTEN, M. Die kinetik der invertinwirkung. **Biochemische Zeitschrift**, Berlin, v. 49, p. 333-369, 1913.

MORAIS, E. J. et al. Biomassa e eficiência nutricional de espécies de eucalipto em duas regiões bioclimáticas de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 14, n. 3, p. 353-362, 1990.

MOREIRA, A. et al. Influência do magnésio, boro e manganês na absorção de zinco por raízes destacadas de duas cultivares de arroz. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 24, n. 2, p. 213-218, 2003.

NAVROSKI, M. C. et al. Quantificação de biomassa e comprimento de raízes finas em povoamento de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 5, n. 4, p. 535-540, 2010.

NEVES, J. C. L. **Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo**. 2000. 191 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2000.

NIELSEN, N. E.; BARBER, S. A. Differences among genotypes of corn in the kinetics of P uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, p. 695-698, 1978.

NOVAIS, R. F.; BARROS, N. E.; NEVES, J. C. L. Nutrição mineral do eucalipto. In: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. E. (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa, MG: Folha de Viçosa, 1990. p. 25-98.

PEREYRA, O. et al. Estudio de las propiedades físico-mecánicas y comportamiento en procesos industriales de la madera de Kiri, *Grevillea*, Paraíso y Toona. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 2, p. 213-223, maio/ago. 2006.

PINHEIRO, A. L.; LANI, J. L.; COUTO, L. **Cedro-Australiano: cultivo e utilização** (*Toona ciliata* M. Roem. var. *australis* (F. Muell) Bahadur). Viçosa, MG: UFV, 2006. 42 p.

PINTO, S. I. do C. **Cinética de absorção conjunta de fósforo, potássio, cálcio e magnésio e eficiência nutricional de macronutrientes de clones de eucalipto**. 2009. 109 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

PINTO, S. I. do C. et al. Eficiência nutricional de clones de eucalipto na fase de mudas cultivados em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 523-533, mar./abr. 2011.

REIS, B. E. dos. **Expressão de genes relacionados à tolerância do eucalipto à seca influenciada pelo boro**. 2011. 53 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

ROSA, C. M. da et al. Efeitos de substâncias húmicas na cinética de absorção de potássio, crescimento de plantas e concentração de nutrientes em *Phaseolus vulgaris* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 4, p. 959-967, jul./ago. 2009.

RUBIO, G. et al. Mechanisms for the increase in phosphorus uptake of waterlogged plantas: soil phosphorus availability, root morphology and uptake kinetics. **Oecologia**, Berlin, v. 112, n. 2, p. 150-155, Oct. 1997.

SAMAL, D. et al. Potassium uptake efficiency and dynamics in the rizosphere of maize (*Zea mays* L.), wheat (*Triticum aestivum* L.) and sugar beet (*Beta vulgaris* L.) evaluated with mechanistic model. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 332, n. 1/2, p. 105-121, July 2010.

SANES, F. S. M. et al. Morfologia de raízes e cinética de absorção de potássio em genótipos de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, n. 3, p. 688-697, 2013.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do Estado de São Paulo. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 4, p. 447-457, jul./ago. 2002.

SANTOS, D. B. dos; COELHO, E. F.; AZEVEDO, C. A. V. de. Absorção de água pelas raízes do limoeiro sob distintas frequências de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 3, p. 327-333, 2005.

SCHABEL, H. G. et al. Economic entomology in tropical forest plantations: an update. **Journal of Tropical Forest Science**, Kepong, v. 11, n. 1, p. 303-315, Aug. 1999.

SHONINGER, E. L.; GATIBONI, L. C.; ERNANI, P. R. Fertilização com fosfato natural e cinética de absorção de fósforo de soja e plantas de cobertura do cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 1, p. 95-106, 2013.

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 4, p. 289-302, 1981.

SILVEIRA, A. P. D. da; CARDOSO, E. J. B. N. Arbuscular mycorrhiza and kinetic parameters of phosphorus absorption by bean plants. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 61, n. 2, p. 203-209, 2004.

SILVEIRA, R. L. V. A. et al. Evaluation of the nutritional status of eucalypts: visual and foliar diagnoses and their interpretation. In: GONÇALVES, J. L. M. (Ed.). **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004. p. 85-111.

SOUZA, J. C. A. V.; BARROSO, D. G.; CARNEIRO, J. G. A. **Cedro-australiano (*Toona ciliata*)**. Niterói: Rio Rural, 2010. 12 p.

STEHLLING, E. de C. **Comercialização de madeira de cedro-australiano surpreende produtores**. Disponível em: <<http://www.painelflorestal.com.br/noticias/artigos/comercializacao-de-cedro-australiano-surpreende-produtores>>. Acesso em: 15 maio 2014.

SWIADER, J. M.; CHYAN, Y.; FREIJI, F. G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 17, n. 10, p. 1687-1699, 1994.

TOMAZ, M. A. et al. Diferenças genéticas na eficiência de absorção, na translocação e na utilização de K, Ca e Mg em mudas enxertadas de caféiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 6, p. 1540-1546, set. 2008.

VALE, F. R. **Efeito do alumínio sobre a cinética de absorção de nitrato, amônio e fosfato em milho (*Zea mays*, L.) e em clone de eucalipto (*Eucalyptus alba*)**. 1982. 71 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1982.

VIEIRA, M.; SCHUMACHER, M. V.; LIBERALESSO, E. Mixed and monospecific stands of eucalyptus and black-wattle: I., fine root length density. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 10, p. 1818-1825, 2012.

VILELA, E. S.; STEHLING, E. de C. **Recomendações de plantio para cedro-australiano**. Campo Belo: Bela Vista Florestal, 2012. Disponível em: <http://www.belavistaflorestal.com.br/imagens/arquivos/Cartilha_Cedro_ver1.2.pdf>. Acesso em: 29 maio 2014.

VILELA, L.; ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética de absorção de fósforo em cultivares de soja afetadas pela interação alumínio-fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 8, p. 91-96, 1984.

VOGT, K. A. et al. Methodological considerations in measuring biomass, production, respiration and nutrient resorption for tree roots in natural ecosystems. In: TORREY, J. G.; WINSHIP, L. J. (Ed.). **Applications of continuous and steady-state methods in root biology**. Dordrecht: Kluwer, 1989. p. 217-232.

WITSCHORECK, R.; SCHUMACHER, M. V.; CALDEIRA, M. V. W. Estimativa da biomassa e do comprimento de raízes finas em *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake no município de Santa Maria, RS. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 27, n. 2, p. 177-183, 2003.

WORLD AGROFORESTRY CENTRE. **Agroforestry database: *Toona ciliata***. Disponível em: <http://www.worldagroforestry.org/treedb2/AFTPDFS/Toona_ciliata.pdf>. Acesso em: 20 maio 2014.

ZOBEL, R. W. Primary and secondary root systems. In: ZOBEL, R. W.; WRIGHT, S. F. (Ed.). **Roots and soil management: interactions between roots and the soil**. Madison: American Society of Agronomy, 2005. p. 3-14.

ZONTA, E. et al. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 7-52.

SEGUNDA PARTE

ARTIGO 1

MORFOLOGIA RADICULAR E CINÉTICA DE ABSORÇÃO DE NUTRIENTES POR CLONES DE CEDRO-AUSTRALIANO

Normas da Revista Caatinga (versão submetida)

RESUMO - Avaliações da morfologia radicular e de parâmetros cinéticos auxiliam na caracterização de genótipos quanto à eficiência de absorção de íons. O objetivo deste trabalho foi caracterizar clones de cedro-australiano quanto à capacidade de absorção de nutrientes na fase de muda, por meio da determinação de características morfológicas radiculares e dos parâmetros cinéticos de absorção de P, K, Ca e Mg. Os experimentos foram conduzidos em solução nutritiva em casa de vegetação e câmara de crescimento. Foram testados quatro clones de cedro-australiano (HE, XF, XD e XE), provenientes da empresa Bela Vista Florestal, sendo utilizado o delineamento inteiramente casualizado com cinco repetições. Determinou-se o comprimento, volume, área superficial, diâmetro médio e extensão de raízes por classes de diâmetro, bem como os parâmetros de absorção V_{max} , K_m , C_{min} e o influxo estimado para P, K, Ca e Mg. As características morfológicas radiculares variam entre os clones de cedro-australiano, tendo destaque para o clone XD que apresentou um maior desenvolvimento do sistema radicular. A eficiência de absorção de P, K, Ca e Mg varia entre os clones de cedro-australiano. Em condições de variações na disponibilidade, os clones XF e XE apresentam maior plasticidade na absorção de P e K, respectivamente, e o clone HE na absorção de Ca e Mg.

Palavras-chave: Atributos morfológicos radiculares. Parâmetros cinéticos. Influxos de P, K, Ca e Mg. Absorção de nutrientes. *Toona ciliata*.

**ROOT MORPHOLOGY AND NUTRIENT UPTAKE KINETICS
BY AUSTRALIAN CEDAR CLONES**

ABSTRACT - Evaluations of the root morphology and of kinetic parameters aid in the characterization of genotypes as for efficiency of ion uptake. O objective of this work was to characterize Australian cedar clones as to their nutrient-absorbing capacity in the seedling stage by means of the determination of morphological root characteristics and of the kinetic parameters of uptake of P, K, Ca and Mg. The experiments were conducted in a nutrient solution in a greenhouse and growth room. Four Australian cedar clones were tested (HE, XF, XD and XE) coming from Bela Vista Forest Enterprise (Empresa Florestal Bela Vista), the completely randomized design with five replications being utilized. Length, volume, surface area, average diameter and extent of roots per diameter classes as well the uptake parameters V_{max} , K_m , C_{min} and the inflow estimated for P, K, Ca and Mg were determined. The morphological root characteristics ranged among the Australian cedar clones, having highlight for XD clone which a greater development of the root system. The efficiency of P, K, Ca and Mg ranges among the Australian cedar clones. Under conditions of variations in the availability, both clones XF and XE present greater plasticity in the uptake of P and K, respectively and clone HE in the uptake of Ca and Mg.

Keywords: Root morphological Atributes. Kinetic parameters. Inflows of P, K, Ca and Mg. Nutrients uptake. *Toona ciliata*.

INTRODUÇÃO

O cultivo em solos com baixa fertilidade natural constitui uma situação comumente encontrada nas florestas plantadas no Brasil. Este cenário exige a reposição dos nutrientes via aplicação de altas doses de fertilizantes, para garantir produtividades satisfatórias pelas culturas. A otimização da relação custo-benefício representa um grande desafio para os empreendedores do setor florestal, que pode ser alcançada pela combinação do potencial produtivo do material genético e do uso mais eficiente dos nutrientes disponíveis no solo.

Para a caracterização de espécies e genótipos, quanto à eficiência de absorção de íons, tem-se utilizado como ferramenta a avaliação de aspectos morfológicos e fisiológicos envolvidos no processo (ANGHINONI et al., 1989). Os aspectos morfológicos estão relacionados com o sistema radicular que pode ser diferenciado entre plantas, proporcionando distintas capacidades no aproveitamento dos nutrientes (ABICHEQUER; BOHNEN, 2008; MACHADO; FURLANI, 2004; PINTO, 2009; SAMAL, et al., 2010; SANES et al., 2013). Além desses aspectos, a eficiência de absorção de nutrientes também é influenciada por variações fisiológicas que governam este mecanismo, bem como os parâmetros cinéticos que compreendem a velocidade máxima de absorção (V_{max}), a constante de Michaelis-Menten (K_m), a concentração mínima do nutriente na solução (C_{min}) e pela interação destes parâmetros, estimada pelo influxo (ALVES et al., 2012; BORGES, et al., 2009; FURTINI NETO, 1994; LIMA et al., 2005; NIELSEN; BARBER, 1978; PINTO, 2009; VILELA; ANGHINONI, 1984).

Em termos práticos, materiais genéticos ideais seriam aqueles que apresentassem um sistema radicular bem desenvolvido para explorar um maior volume de solo, associados a parâmetros cinéticos que os qualificassem como eficientes na absorção de nutrientes. O fato de que a maioria dos solos

brasileiros destinados aos plantios florestais é limitante em nutrientes ressalta a importância de se selecionar genótipos que apresentem menores valores de Km (NOVAIS; MELO, 2007) e C_{min} (HORN et al., 2006), pois significa, a princípio, que os mesmos serão capazes de absorver nutrientes sob condições de baixos níveis no solo.

A busca por genótipos mais adaptados às distintas condições ambientais é de extremo interesse pelo setor florestal, pois permite a alocação de genótipos em sítios nutricionalmente distintos. No âmbito de espécies de madeiras nobres, tal finalidade é relevante, uma vez que há poucos estudos sobre o tema. No Brasil, o cultivo de cedro-australiano tornou-se atrativo devido à sua boa adaptação às condições edafoclimáticas e ao seu potencial madeireiro (FERREIRA et al., 2012). Apesar da boa adaptação desta espécie no país, pesquisas sobre o seu cultivo ainda são necessárias, uma vez que há poucas informações a respeito das práticas silviculturais adequadas ao seu manejo.

Este trabalho foi realizado com o objetivo de caracterizar e diferenciar, na fase de muda, quatro clones de cedro-australiano quanto à capacidade de absorção de nutrientes por meio da determinação de características morfológicas radiculares e dos parâmetros cinéticos de absorção de P, K, Ca e Mg.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido, inicialmente, em casa de vegetação e, posteriormente, em câmara de crescimento, no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras. Foram utilizadas mudas de cedro-australiano de quatro clones distintos, provenientes da Bela Vista Florestal, situada no município de Campo Belo, MG. Os materiais genéticos foram designados como clones HE, XF, XD e XE, originados via propagação vegetativa e com idade média de 60 dias. Os tratamentos foram compostos pelos quatro clones, sendo dispostos em um delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições.

O cultivo inicial das mudas foi realizado por um período de 35 dias em casa de vegetação coberta com sombrite 50%. Nesta fase, as mudas de cada clone foram transferidas para bandejas contendo 42 L de solução nutritiva de Clark (CLARK, 1975), com o pH ajustado para $6,0 \pm 0,2$ com HCl e ou NaOH, e continuamente arejadas. No intuito de promover uma adaptação das mudas ao novo ambiente, foi realizada uma aclimatação das mesmas, com o aumento gradual (semanal) da força iônica da solução, iniciando-se com 25%, até atingir 100%. Durante este período, o pH da solução foi corrigido diariamente para $6,0 \pm 0,2$.

Após esta fase de aclimatação, as mudas foram selecionadas quanto à uniformidade da raiz e parte aérea e acondicionadas em vasos individuais, com sistema de aeração, contendo 2 L da solução de Clark, e mantidas em câmara de crescimento sob condições controladas de intensidade luminosa (aproximadamente $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), fotoperíodo (14 horas de luz) e temperatura (25 ± 1 °C). As mudas permaneceram nestas condições por um período de cinco dias e o pH da solução foi corrigido diariamente para $6,0 \pm 0,2$. Após este período, procedeu-se à troca da solução nutritiva por outra com

apenas 10% da força iônica e as mudas permaneceram nesta solução por mais cinco dias.

Para a realização da cinética de absorção de P, K, Ca e Mg, procedeu-se à troca da solução de cultivo das mudas pela solução contendo N ($150 \mu\text{mol L}^{-1}$), K ($70 \mu\text{mol L}^{-1}$), P ($20 \mu\text{mol L}^{-1}$), Ca ($40 \mu\text{mol L}^{-1}$), Mg ($20 \mu\text{mol L}^{-1}$) e S ($25 \mu\text{mol L}^{-1}$). A concentração inicial de cada nutriente nesta solução foi determinada em testes preliminares e de modo a atingir a concentração mínima (C_{min}) no tempo de 24 horas. As fontes utilizadas para o seu preparo foram: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ e NH_4NO_3 , sais para análise.

Para a aplicação do modelo cinético proposto por Epstein e Hagen (1952), as mudas permaneceram nesta solução de pré-exaustão por duas horas, com a finalidade de atingir o estado estacionário de absorção. Posteriormente, realizou-se a troca desta solução por outra de igual composição, representando a solução de depleção. Em ambas as soluções, o pH foi corrigido para $6,0 \pm 0,2$.

A determinação dos parâmetros cinéticos V_{max} , K_m e C_{min} foi baseada no princípio proposto por Claassen e Barber (1974), o qual consiste em quantificar a redução na concentração de nutrientes da solução em função da absorção pelas plantas. Para isso, retiraram-se alíquotas de 10 ml da solução de depleção, sendo a primeira coletada no “tempo zero”, antes de colocar as mudas, e as demais em intervalos de uma hora, por um período de 12 horas. A última coleta foi efetuada com 24 horas após o início do período de exaustão. Em seguida, as plantas foram separadas em parte aérea e raiz, determinando-se a massa fresca de raiz com o auxílio de uma balança digital (precisão de 0,01 g). Determinou-se também o volume remanescente em todos os vasos com o uso de uma proveta graduada.

Os teores de Ca e Mg presentes nas alíquotas coletadas foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, o de K por fotometria

de emissão de chama e o de P, por colorimetria. Com as concentrações dos nutrientes determinados em cada amostragem em função do tempo, os volumes de solução inicial e final nos vasos e a massa fresca da raiz, calcularam-se o V_{max} e o K_m , pelo *software* Cinética 2.0 (RUIZ; FERNANDES FILHO, 1992). Para o valor de C_{min} foram consideradas as concentrações de nutrientes presentes na solução de depleção no tempo de 24 horas. O influxo líquido (IL) foi estimado de acordo com a Equação 1, proposta por Michaelis-Menten e modificada por Nielsen e Barber (1978).

$$IL = \frac{[V_{max} \times (C - C_{min})]}{[K_m + (C - C_{min})]} \quad (1)$$

Após a separação da parte aérea e raízes, estas foram lavadas em água destilada e acondicionadas em potes plásticos contendo álcool 70%, para a determinação de comprimento, volume, área superficial, diâmetro médio e extensão de raízes por classes de diâmetro. Essas características foram analisadas na Embrapa Milho e Sorgo (CNPMS), por meio do *WinRHIZO Pro* 2007a (Regente Instr. Inc.) acoplado a um escâner profissional Epson XL 10000, equipado com uma unidade de luz adicional (TPU).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e ao teste de médias de Scott & Knott, a 5%, no intuito de comparar os materiais genéticos. Utilizou-se o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011) para a realização das análises estatísticas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Morfologia radicular

O resumo da análise de variância das características morfológicas radiculares encontra-se na Tabela 1. Estas variáveis diferiram significativamente entre os materiais genéticos analisados, exceto o diâmetro médio (Tabela 2).

Tabela 1 Resumo da análise de variância das variáveis da morfologia radicular de quatro clones de cedro-australiano.

FV	Quadrado Médio				
	GL	Comprimento	Volume	Área Superficial	Diâmetro médio
Clone	3	2.261.524,8*	23,27*	46.238,5*	0,0025
Resíduo	16	71.441,5	3,03	6.812,3	0,0014

*Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F.

Tabela 2 Valores médios das variáveis da morfologia radicular de quatro clones de cedro-australiano.

Clone	Comprimento	Volume	Área superficial	Diâmetro médio
	cm	cm ³	cm ²	mm
HE	5.332,29b ⁽¹⁾	12,61b	889,32b	0,60a
XF	4.579,29c	15,98a	885,85b	0,64a
XD	5.798,77a	16,19a	1.084,59a	0,59a
XE	4.117,92d	11,39b	844,93b	0,60a
Média	4.957,07	14,04	926,17	0,61

⁽¹⁾Valores seguidos da mesma letra, em cada coluna, não diferem entre si (Scott-Knott, 5%).

Observa-se que o clone XD se destacou em função de suas maiores médias em relação aos demais quanto ao comprimento e área superficial das raízes. Juntamente com clone XF, o clone XD também apresentou um maior volume de raízes. Por fim, os clones HE e XE apresentaram os menores crescimentos do sistema radicular (Tabela 2).

Na literatura, há relatos de que a área superficial e o comprimento seriam as mais importantes características morfológicas radiculares para inferir sobre a eficiência de absorção de água e nutrientes por diferentes espécies. Zonta et al. (2006) relatam que um sistema radicular com um maior comprimento indica uma maior capacidade das raízes na exploração do solo, e Vilela e Anghinoni (1984) e Barber (1995) destacaram que a avaliação da área radicular torna-se um parâmetro de interesse na absorção de nutrientes pouco móveis no solo, como é o caso do potássio e do fósforo. Para estes elementos, a difusão constitui o principal mecanismo de movimento no solo, sendo a taxa de difusão diretamente proporcional à área superficial das raízes.

É importante destacar que as características morfológicas e fisiológicas do sistema radicular e os fatores do solo afetam a absorção de nutrientes pelas raízes. De acordo com Alves et al. (2002), as características morfológicas podem ser consideradas críticas quando o acesso da raiz ao nutriente é um fator limitante, indicando a importância de diferenças genéticas na morfologia do sistema radicular, visto que estas interferem diretamente na capacidade adaptativa das espécies às variações na disponibilidade de nutrientes. Vale ressaltar também que a concentração dos carregadores existentes nas membranas das células das raízes, bem como sua velocidade de giro, podem refletir em diferenças na eficiência de absorção dos nutrientes pelas plantas (VALE et al., 1984).

Em relação à porcentagem de raízes em função de diferentes classes de diâmetro, foi observado que cerca de 99% do sistema radicular de todos os

clones são formados por raízes finas absorventes (RFA) com diâmetros inferiores a 3,0 mm (Figura 1). As RFA são as principais raízes responsáveis pela absorção de água e nutrientes pelas plantas (FITTER, 1991). Nota-se também que aproximadamente 60% das RFA dos materiais genéticos analisados apresentaram diâmetro inferior a 0,5 mm, sendo, portanto, a maior parte do sistema radicular do cedro-australiano, na fase de muda, formada por raízes com diâmetros extremamente reduzidos.

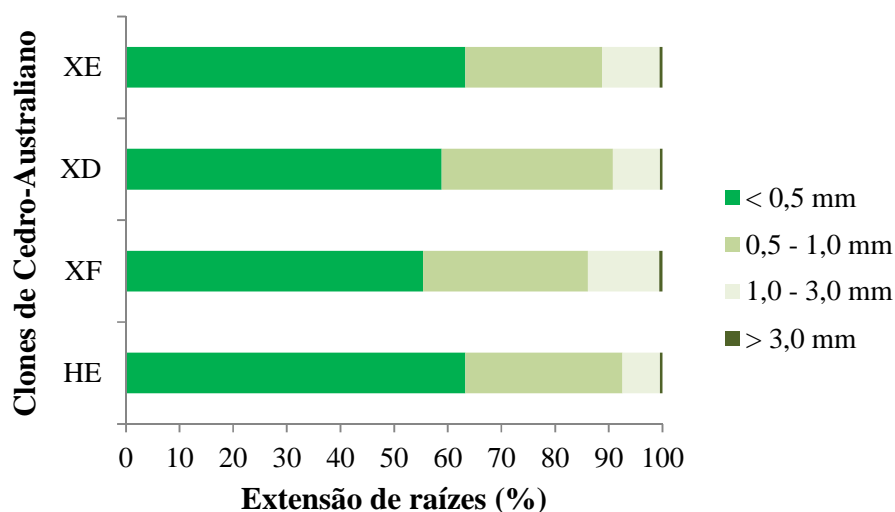


Figura 1 Extensão de raízes em diferentes classes de diâmetros para os quatro clones de cedro-australiano.

O predomínio de raízes finas com diâmetro inferior a 1,0 mm é comumente observado em florestas plantadas, sendo variável entre espécies florestais e as condições edafoclimáticas distintas. Harmand et al. (2004) identificaram diferenças na produção de raízes finas em três espécies, em que a *Senna siamea* (Lamarck) H.S. Irwin & Barneby apresentou maior produção, seguida pela *Acacia polyacantha* Willd e pelo *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.

Em um estudo com o cedro-japonês (*Cryptomeria japonica*), realizado por Konôpka et al. (2006), os autores observaram maior produção de raízes finas pela espécie no verão. Navroski et al. (2010) quantificaram a biomassa e o comprimento de raízes finas em plantios de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell e concluíram que estes parâmetros foram superiores nos primeiros centímetros de profundidade. Este fato, de acordo com os autores, está, provavelmente, associado à presença de serapilheira, muito comum em plantios florestais, uma vez que há um maior suprimento de nutrientes na camada superficial do solo.

O sistema radicular de uma espécie florestal com uma maior porcentagem de RFA é uma característica desejável, pois pode aumentar a capacidade de absorção de água e nutrientes, principalmente em solos com baixa fertilidade e contribui para a seleção de genótipos mais eficientes no aproveitamento dos nutrientes. Em síntese, todos os clones de cedro-australiano, na fase de muda, apresentaram maiores proporções de raízes pertencentes à classe de diâmetro inferior a 1,0 mm, sendo, aparentemente, aptos na absorção de nutrientes disponíveis. No entanto, a avaliação de mecanismos envolvidos na eficiência de absorção de nutrientes, como os parâmetros cinéticos associados à morfologia radicular, permite inferir em relação a um maior ou menor potencial para o aproveitamento de nutrientes pelos materiais genéticos testados.

Parâmetros cinéticos de absorção de P, K, Ca e Mg

Os clones de cedro-australiano apresentaram curvas de exaustão de P, K, Ca e Mg típicas, sendo a velocidade máxima de absorção (V_{max}) determinada a partir de uma equação linear e a constante de Michaelis-Menten (K_m), por meio de equações do tipo exponencial para o P e potencial para o K, Ca e Mg, uma vez que estas apresentaram um melhor ajuste aos dados. Nas Tabelas 3 e 4 estão apresentados os resumos das análises de variância e os resultados do teste de

médias para os parâmetros cinéticos de absorção de P e K dos clones de cedro-australiano, respectivamente.

Tabela 3 Resumo da análise de variância para os parâmetros cinéticos de absorção de P e K apresentados pelos clones de cedro-australiano.

Quadrado Médio				
Fósforo				
FV	GL	Vmax	Cmin	Km
Clone	3	0,0014*	7,1134*	8,6433*
Resíduo	16	0,0001	0,3800	0,9820
Potássio				
Clone	2 ⁽¹⁾	0,0449*	28,7144	153,8384*
Resíduo	12	0,0005	21,8941	29,1414

*Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. Vmax: velocidade máxima de absorção; Cmin: concentração mínima determinada na solução no tempo de 24 horas, Km: constante de Michaelis-Menten. ⁽¹⁾Não foram calculados os parâmetros cinéticos com a absorção de potássio pelo clone XF, devido à ausência de ajuste dos dados ao modelo cinético.

Tabela 4 Vmax, Cmin e Km para P e K de quatro clones de cedro-australiano.

Clone	Fósforo			Potássio		
	Vmax $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$	Cmin $\mu\text{mol L}^{-1}$	Km	Vmax $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$	Cmin $\mu\text{mol L}^{-1}$	Km
HE	0,05b ⁽¹⁾	3,63b	4,93b	0,22b	25,20a	27,70b
XF	0,09a	2,40b	7,26a	nd ⁽²⁾	nd ⁽²⁾	nd ⁽²⁾
XD	0,06b	3,17b	4,97b	0,09c	21,30a	22,90b
XE	0,06b	5,53a	7,69a	0,30a	20,07a	35,20a
Média	0,07	3,70	6,21	0,20	22,19	28,58

*Vmax: velocidade máxima de absorção; Cmin: concentração mínima para absorção no tempo de 24 horas; Km: concentração para a metade da velocidade máxima. ⁽¹⁾Valores seguidos da mesma letra, em cada coluna, não diferem entre si (Scott-Knott, 5%). nd⁽²⁾= não determinado (ausência de ajuste dos dados ao modelo cinético).

De acordo com Marschner (2012), os principais fatores que afetam a absorção de um nutriente pelas raízes das plantas são: influxo pelo apoplasto, pH da solução nutritiva, atividade metabólica, interações entre íons na rizosfera,

concentração externa dos nutrientes, estado nutricional da planta e a concentração do nutriente nos tecidos vegetais. Em virtude da complexidade envolvida nos mecanismos de absorção de nutrientes pelas plantas, a cinética de absorção deste trabalho foi realizada sob baixa concentração de P, K, Ca e Mg em solução, visando atingir apenas a primeira isoterma de absorção dos nutrientes, que corresponde ao mecanismo de alta afinidade, e considerando as possíveis interações (antagonismo/sinergismo) entre os íons na solução que podem ocorrer durante a absorção pelas plantas.

Para o P, o clone XF apresentou maior V_{max} , comparado aos demais clones. Os menores valores de C_{min} para o P foram apresentados pelos clones XF, XD e HE, os quais não diferiram entre si. Os clones HE e XD apresentaram menores valores de K_m para a absorção de P (Tabela 4).

Os parâmetros cinéticos variam, principalmente, em função do genótipo e da espécie (ALI et al., 2010; BHADORIA, et al., 2004; BRIX et al., 2010; LIMA et al., 2005; McFARLANE; YANAI, 2006; PINTO, 2009; SCHONINGER; GATIBONI; ERNANI, 2013; SILVEIRA; CARDOSO, 2004), uma vez que constituem características da própria planta e que conferem à mesma maior ou menor capacidade de absorção do nutriente a uma dada concentração no meio externo. Um genótipo ou uma espécie são considerados eficientes na absorção de um determinado nutriente, quando os mesmos apresentarem parâmetros cinéticos que os qualificam como tal. Em princípio, o esperado seria que a planta apresentasse alta taxa inicial de absorção do nutriente, em consequência de uma alta afinidade existente entre o carregador e o elemento, decorrente de um baixo valor de K_m , e quando extraísse o máximo possível do nutriente, atingindo baixas concentrações do mesmo na solução do solo (C_{min}) (NIELSEN; BARBER, 1978).

O valor da V_{max} é um indicativo da absorção máxima de um íon quando houver saturação de todos os sítios dos carregadores nas raízes, ou

quando o giro do carregador atingisse um máximo. Desse modo, pode-se sugerir que o clone XF teria uma maior concentração de sítios de absorção de P que os demais materiais genéticos, ou que o giro destes carregadores na membrana plasmática fosse elevado, indicando que, provavelmente, este clone apresenta maior potencial para responder a maiores investimentos em fertilizantes fosfatados.

A concentração mínima é um parâmetro cinético que indica o potencial da planta para extrair o nutriente da solução do solo (MARSCHNER, 2012), sendo que menores valores indicam que a planta é capaz de se aproveitar de níveis mais baixos de elementos na solução do solo e do ponto de vista prático, um maior potencial para cultivo em condições de baixa disponibilidade de nutrientes no solo. Neste contexto, observa-se, na Tabela 4, que os clones XF, XD e HE conseguiram extrair o máximo de P da solução nutritiva no período de 24 horas, em função dos seus baixos valores de C_{min} .

A constante de Michaelis-Menten (K_m) indica a afinidade que o carregador tem com o íon (EPSTEIN; HAGEN, 1952) e quanto menor o seu valor, maior será a afinidade. Os resultados obtidos (Tabela 4) sugerem maior afinidade dos carregadores de P presentes nas raízes dos clones HE e XD.

Os genótipos analisados apresentaram diferentes valores de V_{max} para o K (Tabela 4), sendo o clone XE um material genético que pode apresentar um maior potencial na absorção do nutriente em solos com alta e baixa disponibilidade, devido ao seu maior V_{max} ; o clone XD com a menor V_{max} sugere uma menor capacidade no aproveitamento do K em condições distintas de disponibilidade do nutriente no solo; e, o clone HE apresentou um valor de V_{max} intermediário que pode ser considerado mais interessante do ponto de vista nutricional. De acordo com Furtini (1994), plantas que apresentam valores intermediários de V_{max} parecem refletir um mecanismo mais apurado na absorção do nutriente, uma vez que pode ocorrer a regulação no seu

aproveitamento evitando excesso de absorção que poderia ocasionar uma eventual toxidez.

Para o K, os valores da Cmin obtidos para os clones testados não permitiram diferenciá-los, pois não houve diferença significativa entre os mesmos ($P < 0,05$) (Tabela 4). Por outro lado, os clones XD e HE apresentaram menores valores de Km, quando comparados com o valor apresentado para o clone XE.

Em um estudo de cinética de absorção de macronutrientes realizado por Lima et al. (2005) em quatro clones de eucalipto não foram observadas diferenças significativas nos valores de Km e de Cmin para o K. Neste caso, apenas os valores de Vmax permitiram distinguir os clones quanto à capacidade de absorção deste nutriente.

É importante destacar que, em solos com restrições na disponibilidade de P e de K na solução, mesmo com o suprimento via adubação, a Vmax deixa de ser o parâmetro cinético que mais influencia a absorção destes nutrientes, a qual passa a ser controlada pela constante de Michaelis-Menten (Km) (ERNANI et al., 1994). Este fato acontece porque o P e o K se movimentam até as raízes por difusão, o que, segundo Barber (1995), ocorre pela formação de uma zona de depleção no solo junto às raízes, onde a Vmax, normalmente, não é atingida. Nestas condições, a Km seria o parâmetro cinético mais importante na absorção de nutrientes, especialmente em solos que apresentam de média a baixa disponibilidade desses nutrientes. Neste caso, menores valores de Km são mais convenientes do que grandes valores de Vmax (NOVAIS; MELO, 2007). Com isso, os clones HE e XD seriam mais eficientes na absorção desses nutrientes em solução.

Vale ressaltar também que o sistema radicular mais desenvolvido apresentado pelo clone XD (Tabela 2), com maior área superficial, pode auxiliar

no melhor aproveitamento de P e K sob condições de limitação na disponibilidade destes nutrientes no solo.

Foram também estimadas as taxas de influxo radicular dos nutrientes, que representam a taxa de absorção do nutriente por unidade de matéria fresca de raiz por unidade de tempo. A obtenção das taxas de influxo radicular pode auxiliar em uma melhor distinção dos clones quanto à aptidão para absorção de P e K (Tabela 5).

Tabela 5 Resumo da análise de variância dos influxos líquidos de P e K obtidos pelos clones de cedro-australiano⁽¹⁾.

Fósforo			Potássio ⁽²⁾		
FV	GL	Quadrado médio	FV	GL	Quadrado médio
Clone	3	0,0005*	Clone	2	0,0143*
Resíduo	16	0,00006	Resíduo	12	0,0003

⁽¹⁾Influxos obtidos com as maiores concentrações destes nutrientes em solução nutritiva para a separação dos clones de cedro-australiano em grupos com semelhantes influxos.

⁽²⁾Não foi calculado o influxo dos nutrientes pelo clone XF, devido à ausência de ajuste dos dados ao modelo cinético. *Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F.

Observa-se, na Figura 2, que o efeito conjunto de Vmax, Cmin e Km, representado pelo influxo estimado de P, mostra que o clone XF apresentou maiores valores de influxo, quando comparados com os obtidos pelos clones XD, HE e XE.

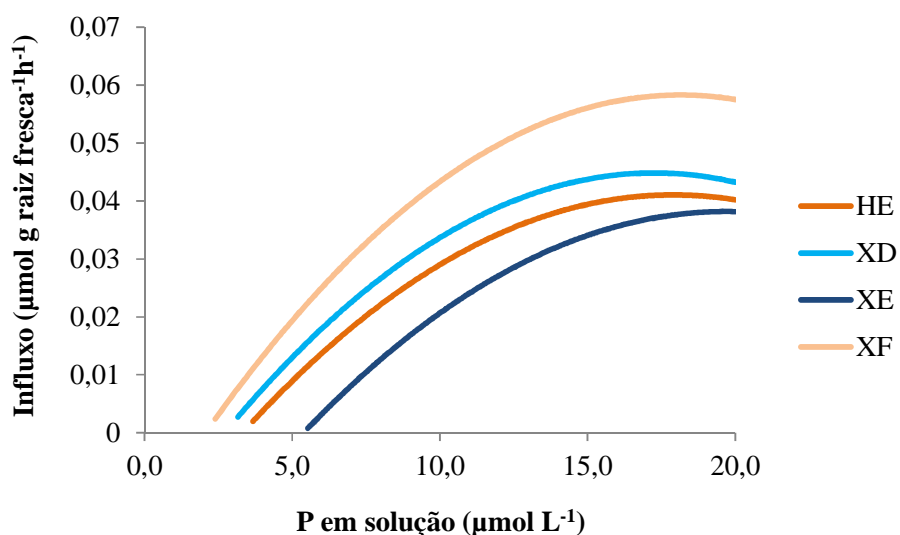


Figura 2 Influxos estimados em função da concentração de P para quatro clones de cedro-australiano.

O clone XF apresentou maior influxo de P em virtude do seu alto valor de V_{max} e do baixo valor de C_{min} (Tabela 4). Apesar deste material genético ter apresentado um maior valor de K_m , foi observado maior influxo radicular do nutriente, sugerindo que outros mecanismos possam estar envolvidos na eficiência de absorção de P por este clone. Uma possível explicação pode estar, provavelmente, relacionada à maior concentração e, ou, velocidade de giro dos carregadores presentes em seu sistema radicular, ocasionando em uma maior absorção deste nutriente (VALE et al., 1984). Devido, principalmente, aos menores valores de V_{max} , os clones XD, HE e XE constituíram o grupo que apresentou menor influxo de P (Figura 2), sugerindo que esses genótipos podem apresentar uma menor capacidade de absorver o P sob condições tanto de alta quanto de baixa disponibilidade do nutriente quando comparados com o clone XF.

Na Figura 3 podem ser observados os diferentes influxos de K para os clones avaliados, o que possibilitou separá-los quanto às aptidões no aproveitamento deste nutriente em solução: o maior influxo foi obtido pelo clone XE, o influxo intermediário foi apresentado pelo clone HE e o menor influxo pelo clone XD. Essas diferenças, a princípio, foram decorrentes das variações da V_{max} apresentadas para os clones testados (Tabela 4). Em adição, observa-se que a curva do clone XD estava acima da curva do clone HE, quando em menores concentrações de K em solução. No entanto, este clone apresentou influxos superiores quando a concentração deste nutriente era maior que $28 \mu\text{mol L}^{-1}$. Esta constatação pode ser explicada pelo maior valor de V_{max} obtido pelo clone HE, em comparação ao valor apresentado pelo clone XD, visto que os valores de K_m para o K não apresentaram diferença significativa entre esses clones.

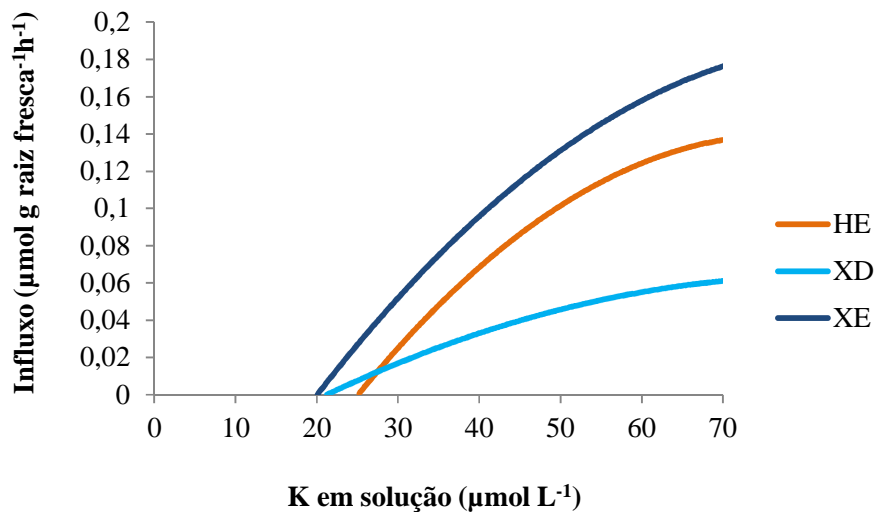


Figura 3 Influxos estimados em função da concentração de K para três clones de cedro-australiano.

O resumo da análise de variância e os valores médios dos parâmetros cinéticos obtidos com a absorção de Ca e Mg pelos clones de cedro-australiano encontram-se nas Tabelas 6 e 7, respectivamente. Os maiores valores de Vmax para o Ca foram apresentados pelos clones HE e XF, que não apresentaram diferença entre si ($P < 0,05$), e o clone XD, seguido pelo clone XE (Tabela 7), obteve menores valores deste parâmetro. Em relação à concentração mínima (Cmin) de Ca na solução, os clones HE e XE, seguidos pelo clone XD, apresentaram as menores concentrações em solução. Os valores da constante de Michaelis-Menten (Km) apresentados com a absorção de Ca pelos clones seguem a ordem crescente: $XE < XD < HE = XF$.

Tabela 6 Resumo da análise de variância para os parâmetros cinéticos de absorção de Ca e Mg apresentados pelos clones de cedro-australiano.

Quadrado Médio				
Cálcio				
FV	GL	Vmax	Cmin	Km
Clone	3	0,1533*	19,3322*	87,7535*
Resíduo	16	0,0036	1,5994	3,2780
Magnésio				
Clone	3	0,0025*	10,1632*	65,9570*
Resíduo	16	0,0006	0,6897	1,6838

*Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. Vmax: velocidade máxima de absorção, Cmin: concentração mínima determinada na solução no tempo de 24 horas, Km: constante de Michaelis-Menten.

Tabela 7 Vmax, Cmin, Km para Ca e Mg apresentados por quatro clones de cedro-australiano.

Clone	Cálcio			Magnésio		
	Vmax $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$	Cmin $\mu\text{mol L}^{-1}$	Km	Vmax $\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$	Cmin $\mu\text{mol L}^{-1}$	Km
HE	0,53a ⁽¹⁾	14,13c	30,46a	0,11a	6,67b	14,40b
XF	0,46a	19,10a	32,43a	0,08b	10,33a	19,38a
XD	0,26b	16,90b	27,55b	0,06b	7,90b	9,71c
XE	0,10c	15,03c	21,70c	0,06b	9,27a	12,69b
Média	0,34	16,29	28,03	0,08	8,54	14,12

*Vmax: velocidade máxima de absorção; Cmin: concentração mínima para absorção no tempo de 24 horas; Km: concentração para a metade da velocidade máxima.⁽¹⁾Valores seguidos da mesma letra, em cada coluna, não diferem entre si (Scott-Knott, 5%).

No caso do Mg, o maior valor de V_{max} com a absorção deste nutriente foi apresentado para o clone HE. Os clones HE e XD apresentaram os menores valores de C_{min} de Mg e o clone XD, seguido pelos clones XE e HE, apresentou os menores valores de K_m (Tabela 7).

Uma vez que a acidez do solo é corrigida com a prática da calagem, normalmente, não há limitação no suprimento de Ca e Mg pelo solo às raízes, o que sugere que o V_{max} seja o parâmetro que mais influencia na quantidade absorvida dos nutrientes pelas plantas nesta condição. Dessa maneira, os clones HE e XF (Tabela 7) seriam capazes de absorver maiores quantidades de Ca em relação aos demais, sob condições de altos teores desse nutriente no solo. Para a absorção de Mg, o clone HE sugere apresentar uma maior aptidão de aproveitamento deste nutriente nesta condição de disponibilidade (Tabela 7). Por outro lado, sob condições de baixa disponibilidade associada a uma maior afinidade dos carregadores presentes no sistema radicular, indica que os clones XE e XD seriam mais aptos em absorver Ca e Mg, respectivamente. Em adição, o clone HE também pode sugerir em uma maior capacidade de aproveitar esses nutrientes sob baixas concentrações em solução, devido aos seus maiores valores de V_{max} e aos menores valores de C_{min} (Tabela 7).

As taxas estimadas de influxo radicular de Ca para os quatro clones de cedro-australiano possibilitaram uma separação dos mesmos quanto à aptidão para absorção do nutriente (Tabela 8), sendo o clone HE com maior aptidão, os clones XF e XD com aptidões intermediárias e o clone XE, com menor aptidão (Figura 4).

Tabela 8 Resumo da análise de variância dos influxos líquidos de Ca e Mg obtidos pelos clones de cedro-australiano⁽¹⁾.

FV	Quadrado Médio		
	GL	Cálcio	Magnésio
Clone	3	0,0282*	0,0008*
Resíduo	16	0,0008	0,0002

⁽¹⁾Influxos obtidos com as maiores concentrações destes nutrientes em solução nutritiva para a separação dos clones de cedro-australiano em grupos com semelhantes influxos.

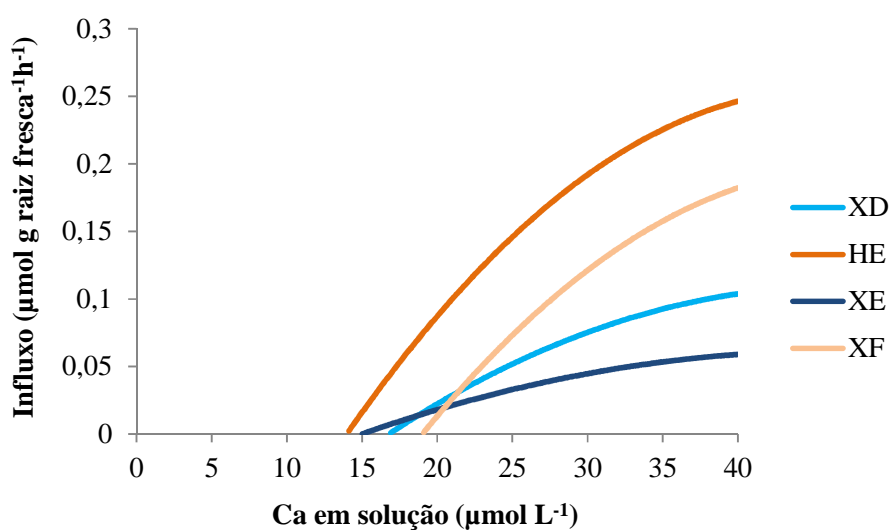


Figura 4 Influxos estimados em função da concentração de Ca para quatro clones de cedro-australiano.

O efeito observado dos parâmetros cinéticos sobre o influxo radicular de Ca sugere que este mecanismo fisiológico pode estar envolvido na eficiência nutricional do cedro-australiano, conferindo maior ou menor capacidade de absorção de nutrientes (Figura 4). Neste contexto, para o clone HE, o alto valor de Vmax e o baixo valor de Cmin para Ca (Tabela 7) podem conferir elevada eficiência de absorção deste nutriente sob condições de maior e menor disponibilidade deste elemento em solução. Em contrapartida, o clone XE quando comparado aos demais, apresentou menores influxos de Ca (Figura 4),

em virtude, principalmente, dos menores valores de V_{max} apresentados por este material genético (Tabela 7).

O influxo estimado de Mg para os clones de cedro-australiano possibilitou separá-los quanto à maior e à menor aptidão em absorver este nutriente em solução (Tabela 8). Observa-se, na Figura 5, que o clone HE apresentou maiores taxas estimadas de influxo de Mg em virtude do alto valor de V_{max} e baixos valores de C_{min} e K_m (Tabela 7), podendo conferir elevada eficiência de absorção deste nutriente e maior plasticidade para se adaptar às condições distintas de fertilidade do solo em relação à maior ou à menor disponibilidade deste elemento em solução. Por outro lado, os clones XD, XE e XF representam um grupo com menores influxos estimados de Mg, devido, principalmente, aos menores valores de V_{max} obtidos por estes materiais genéticos.

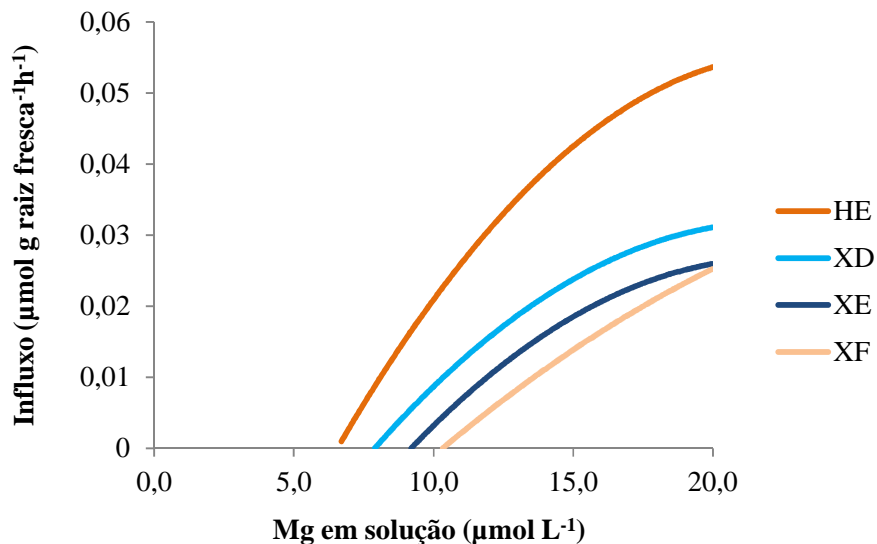


Figura 5 Influxos estimados em função da concentração de Mg para quatro clones de cedro-australiano.

Os parâmetros cinéticos de absorção de P, K, Ca e Mg permitiram distinguir os clones de cedro-australiano quanto à capacidade de aproveitamento destes nutrientes sob condições distintas de disponibilidade. No entanto, para a alocação desses materiais sob condições distintas de fertilidade dos solos, sugere-se a condução de novos experimentos, especialmente em campo, para a validação dos resultados obtidos, de modo que se possa otimizar a interação genótipo-ambiente dos clones testados. Tais informações podem auxiliar na verificação da correlação existente entre a eficiência nutricional de materiais juvenis e adultos.

CONCLUSÕES

As características morfológicas radiculares e os parâmetros cinéticos de absorção podem ser utilizados como ferramentas para caracterizar clones de cedro-australiano quanto à eficiência na absorção de nutrientes.

As características morfológicas radiculares variam entre os clones de cedro-australiano.

Os clones de cedro-australiano apresentam comportamento distinto quanto à eficiência de absorção de P, K, Ca e Mg.

Em condições de variações na disponibilidade, os clones XF e XE apresentam maior plasticidade na absorção de P e K, respectivamente, e o clone HE, na absorção de Ca e Mg.

Para a validação dos resultados obtidos, é necessário que sejam conduzidos estudos com materiais adultos em condições de campo, para avaliar o comportamento nutricional destes clones sob influência do sítio florestal.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig) e à Bela Vista Florestal, pelo suporte para a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

ABICHEQUER, A. D.; BOHNEN, H. Morfologia e distribuição de raízes de arroz irrigado por inundação e sua relação com a absorção de nutrientes e o rendimento de grãos. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 13-20, 2008.

ALI, L. *et al.* Differential potassium influx in fluences growth of two cotton varieties in hydroponics. **Pakistan Journal of Botany**, Karachi, v. 42, n. 2, p. 943-953, apr. 2010.

ALVES, F. A. L. *et al.* Cinética de absorção de K^+ na ausência e presença de Na^+ em raízes de cajueiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 439-445, jul./set. 2012.

ALVES, V. M. C. *et al.* Cinética de absorção de fósforo e crescimento do sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para eficiência a fósforo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.1, n. 1, p. 85-92, abr. 2002.

ANGHINONI, I. *et al.* Morfologia de raízes e cinética da absorção de nutrientes em diversas espécies e genótipos de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 13, p. 355-361, 1989.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2. ed. New York: John Wiley& Sons, 1995. 414 p.

BHADORIA, P. S. *et al.* Phosphorus uptake kinetics, size of root system and growth of maize and groundnut in solution culture. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 262, n. 1-2, p. 327-336, may. 2004.

BORGES, E. de A. *et al.* Cinética de absorção de amônio e efluxo de prótons em variedades de milho. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 30, n. 3, p. 513-526, jul./set. 2009.

BRIX, H. *et al.* Can differences in phosphorus uptake kinetics explain the distribution of cattail and sawgrass in the Florida Everglades? **BMC Plant Biology**, London, v.10, n.23, p. 1-14, feb. 2010.

CLAASSEN, N.; BARBER, S. A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants. **Plant Physiology**, Illinois, v. 54, n. 4, p. 564-568, oct. 1974.

CLARK, R. B. Characterization of phosphates of intact maize roots. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Davis, v. 23, n. 3, p. 458-460, may. 1975.

ERNANI, P. R. *et al.* Prediction of phosphorus uptake by a mechanistic model in a low phosphorus highly weathered soil as affected by micorrhizae inoculation. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 17, p. 1067-1078, 1994.

ESPTEIN, E.; HAGEN, E. A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. **Plant Physiology**, Illinois, v. 27, n. 3, p. 457-474, jul. 1952.

FERREIRA, D. de A. *et al.* Influência da posição das miniestacas na qualidade de mudas de cedro-australiano e no seu desempenho inicial no pós-plantio. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.22, n.4, p.715-723, out./dez. 2012.

FERREIRA, D. F. SISVAR: A Computer Statistical Analysis System. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.35, n. 6, p.1039-1042, nov./dez. 2011.

FITTER, A. H. **Characteristics and function of root systems**. In: Waisel, Y., Eshel, A., Kafkaki, U. (eds.) **Plant roots: the hidden half**. New York: Marcel Dekker, Inc., 1991. p. 15-32.

FURTINI NETO, A. E. **Eficiência nutricional, cinética de absorção e frações fosfatadas em *Eucalyptus* ssp.** 1994. 105f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.

HARMAND, J. M. *et al.* Above ground and below ground biomass, productivity and nutrient accumulation in tree improved fallows in the dry tropics of Cameroon. **Forest Ecology and Management**, v.188, n.1-3, p.249-265, feb. 2004.

HORN, D. *et al.* Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidade genética contrastante. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n.1, p. 77-85, jan./fev. 2006.

KONÔPKA, B. *et al.* Fine root dynamics in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) plantation throughout the growing season. **Forest Ecology and Management**, v. 225, n. 1-3, p. 278-286, apr. 2006.

LIMA, A. M. N. *et al.* Cinética de absorção e eficiência nutricional de K, Ca e Mg em plantas jovens de quatro clones de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 903-909, nov./dez. 2005.

MACHADO, C. T. de T.; FURLANI, A. M. C. Kinetics of phosphorus uptake and root morphology of local and improved varieties of maize. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n.1, p.69-76, jan./fev. 2004.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2012. 651p.

McFARLANE, K. J.; YANAI, R. D. Measuring nitrogen and phosphorus uptake by intact roots of mature *Acer saccharum* (Marsh), *Pinus resinosa* (Ait) and *Picea abies* (L.) (Karst). **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 279, n.1-2, p. 163-172, jan. 2006.

NAVROSKI, M.C. *et al.* Quantificação de biomassa e comprimento de raízes finas em povoamento de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Pernambuco, v. 5, n. 4, p. 535-540, out./dez. 2010.

NIELSEN, N. E.; BARBER, S. A. Differences among genotypes of corn in the kinetics of P uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, n. 5, p. 695-698, sept. 1978.

NOVAIS, R. F.; MELLO, J. W. V. Relação solo-planta. In: NOVAIS, R. F. *et al.* **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. cap. 4, p. 133-204.

PINTO, S.I. do C. **Cinética de absorção conjunta de fósforo, potássio, cálcio e magnésio e eficiência nutricional de macronutrientes de clones de eucalipto**. 2009. 109 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

RUIZ, H. A.; FERNANDES FILHO, E. I. Cinética: Software para estimar as constantes V_{max} e K_m da equação de Michaelis-Menten. *In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS*, 10, 1992. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p. 124-125.

SAMAL, D. *et al.* Potassium uptake efficiency and dynamics in the rizosphere of maize (*Zea mays* L.), wheat (*Triticum aestivum* L.) and sugar beet (*Beta vulgaris* L.) evaluated with mechanistic model. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 332, n.1-2, p.105-121, jul. 2010.

SANES, F. S. M. *et al.* Morfologia de raízes e cinética de absorção de potássio em genótipos de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 688-697, mai./jun. 2013.

SCHONINGER, E. L.; GATIBONI, L. C.; ERNANI, P. R. Fertilização com fosfato natural e cinética de absorção de fósforo de soja e plantas de cobertura do cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 1, p. 95-106, jan./fev. 2013.

SILVEIRA, A. P. D; CARDOSO, E. J. B. N. Arbuscular mycorrhiza and kinetic parameters of phosphorus absorption by bean plants. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 2, p. 203-209, mar./abr. 2004.

VALE, F. R. *et al.* Absorção de nitrato e amônio por raízes intactas de milho pré-tratadas com alumínio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 215-218, 1984.

VILELA, L.; ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética de absorção de fósforo em cultivares de soja afetadas pela interação alumínio-fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p. 91-96, 1984.

ZONTA, E. *et al.* O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M.S., ed. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 7-52.

ARTIGO 2**EFICIÊNCIA NUTRICIONAL PARA MACRONUTRIENTES EM
CLONES DE CEDRO-AUSTRALIANO****NUTRITIONAL EFFICIENCY FOR MACRONUTRIENTS IN AUSTRALIAN
CEDAR CLONES****Normas da Revista Scientia Forestalis (versão submetida)*****Resumo***

Florestas plantadas com genótipos superiores, em relação à eficiência nutricional, podem garantir a manutenção da sustentabilidade da produção florestal. Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar, em solução nutritiva, o crescimento, a produção de biomassa e as eficiências de absorção, translocação e utilização de macronutrientes por clones de cedro-australiano. O experimento foi conduzido em casa de vegetação e câmara de crescimento, utilizando-se quatro clones de cedro-australiano provenientes da empresa Bela Vista Florestal: HE, XF, XD e XE. O delineamento foi inteiramente casualizado com quatro tratamentos e cinco repetições. Os genótipos analisados apresentaram diferenças quanto ao crescimento, à produção de biomassa e às eficiências de absorção, à translocação e à utilização de macronutrientes. Quanto à eficiência nutricional, os clones podem ser categorizados considerando a seguinte ordem: HE > XE > XD > XF. O clone HE se destacou como o mais eficiente na absorção e na utilização de N, P, K, Ca e S, refletindo em maior crescimento vegetativo e produção de biomassa.

Palavras-chave: *Toona ciliata*, absorção e utilização de macronutrientes, nutrição de plantas e solução nutritiva.

Abstract

Forests planted with higher genotypes in relation to the nutrient use efficiency can warrant the maintenance of the forest production sustainability. This work intended to evaluate, in nutrient solution, the growth, biomass production and the efficiencies of absorption, translocation and utilization of macronutrients by Australian cedar clones. The experiment was conducted in greenhouse and plant growth room by utilizing four Australian cedar clones coming from Bela Vista Florestal Company: HE, XF, XD and XE. The design was completely randomized with four treatments and five replications. The genotypes surveyed presented differences as to growth, biomass production and the efficiencies of absorption, translocation and utilization of macronutrients. As to the nutrient use efficiency, the clones can be categorized considering the following order: HE > XE > XD > XF. HE clone stood out as the most efficient in the absorption and utilization of N, P, K, Ca and S, reflecting into increased vegetative growth and biomass production.

Keywords: *Toona ciliata*, absorption and utilization of macronutrients, plant nutrition and nutrient solution.

INTRODUÇÃO

Materiais genéticos mais eficientes nutricionalmente são alvos estratégicos para a manutenção da sustentabilidade florestal. A seleção de genótipos com alta eficiência nutricional pode ser um dos caminhos para a alocação dos mesmos sob condições distintas de fertilidade do solo, levando à adoção diferenciada de regime de adubação e, conseqüentemente, obtendo redução nos investimentos em fertilizantes e corretivos, além de aumentos na produtividade.

Para Barros e Novais (1990), a eficiência nutricional expressa a capacidade das plantas de absorver e utilizar os nutrientes, a eficiência de absorção torna-se mais importante na fase jovem e a eficiência de utilização, durante todo o ciclo da planta. A eficiência nutricional, segundo Fageria (1998), pode ser afetada por fatores relacionados com o clima (temperatura, radiação solar e precipitação), o solo (pH, teor de matéria orgânica, toxidez de alumínio, deficiências de nutrientes, salinidade, etc.) e a planta (crescimento do sistema radicular, fixação de nitrogênio, micorrizas, alelopatia, doenças, pragas e plantas daninhas). Vários mecanismos fisiológicos e morfológicos estão envolvidos na resposta ao uso eficiente de nutrientes pela planta, tais como alta taxa de fotossíntese, manutenção normal do metabolismo com baixo teor de nutrientes nos tecidos, sistema radicular eficiente e alta relação entre raízes e parte aérea (FAGERIA; BALIGAR, 1993).

Alguns índices têm sido empregados para diferenciar e caracterizar genótipos e espécies quanto ao comportamento nutricional, como as eficiências de absorção, de translocação e de utilização de nutrientes (FURTINI NETO et al., 1996; LIMA et al., 2005; POZZA et al., 2009; PINTO et al., 2011; FONTES et al., 2013).

Informações a respeito dos mecanismos envolvidos na capacidade adaptativa de genótipos de interesse, principalmente em condições de baixa fertilidade do solo, podem fornecer subsídios para o setor florestal selecionar aqueles que aproveitam os nutrientes já existentes ou aplicados via fertilização e ou correção de forma mais eficiente. Além disso, o cultivo de espécies para o suprimento de madeira de alto valor agregado, como é o caso do cedro-australiano, torna-se uma opção atrativa aos empreendedores de florestas plantadas.

Neste contexto, este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o crescimento, a produção de biomassa e as eficiências de absorção, de translocação e de utilização para macronutrientes por clones de cedro-australiano cultivados em solução nutritiva.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado, inicialmente, em casa de vegetação e, posteriormente na câmara de crescimento, no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Foram utilizadas mudas de cedro-australiano de quatro clones distintos da Bela Vista Florestal, situada no município de Campo Belo, MG. Os materiais genéticos foram designados como clones HE, XF, XD e XE, originados via propagação vegetativa com idade média de 60 dias. Os tratamentos foram compostos pelos quatro clones, sendo dispostos em um delineamento inteiramente casualizado, com cinco repetições.

O cultivo inicial das mudas foi realizado por um período de 35 dias, em casa de vegetação coberta com sombrite 50%. Nesta fase, as mudas de cada clone foram transferidas dos tubetes para bandejas contendo 42 L de solução nutritiva de Clark (CLARK, 1975), com o pH ajustado para $6,0 \pm 0,2$ com HCl e ou NaOH e continuamente arejadas. No intuito de promover uma adaptação das mudas ao novo ambiente, processo denominado aclimatação, utilizou-se, na primeira semana de cultivo, solução nutritiva com um quarto da força iônica (25% da concentração de sais), sendo a força iônica da solução aumentada semanalmente até atingir 100%. Durante este período, o pH da solução foi corrigido diariamente para $6,0 \pm 0,2$.

Após esta fase de aclimatação, as mudas foram selecionadas quanto à uniformidade da raiz e parte aérea e acondicionadas em vasos individuais, com sistema de aeração, contendo 2 L da solução de Clark com 100% da força iônica, e mantidas em câmara de crescimento sob condições controladas de intensidade luminosa (aproximadamente $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), fotoperíodo (14 horas de luz) e temperatura (25 ± 1 °C). As mudas permaneceram por um período de dez dias e o pH da solução nutritiva foi corrigido para $6,0 \pm 0,2$ diariamente.

Após o período de 45 dias de cultivo em solução nutritiva, as plantas foram coletadas para as avaliações de altura e diâmetro do caule com a utilização de uma régua milimetrada e de um paquímetro digital, respectivamente. Em seguida, separou-se a parte aérea da raiz dos clones analisados. As folhas foram destacadas do caule para a determinação da área foliar por meio do método dos discos foliares, utilizando-se um vazador com área conhecida, conforme Benincasa (2003). Posteriormente, ambas as partes foram acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa a 65°C, até atingir massa constante. Após a secagem, o material vegetal foi pesado. Com a massa seca das folhas (MS folhas), a massa seca dos discos (MSD) e a área total dos discos (ATD), a área foliar foi estimada de acordo com a Equação 1.

$$\text{Área foliar} = \frac{(MS \text{ folhas} + MSD) \times (ATD)}{MSD} \quad (1)$$

As folhas, os discos foliares e os caules, secos em estufa, foram pesados para obtenção da massa seca de parte aérea (MSPA). Procedimento similar foi adotado para as raízes, para obtenção da massa seca de raízes (MSR). Com ambos os valores, foi determinada a relação massa seca da parte aérea/massa seca de raízes (MSPA/MSR).

O material vegetal seco foi moído e direcionado para digestão sulfúrica, determinando-se o teor de N e para digestão nítrico-perclórica, em que foram obtidos os teores de P, K, Ca, Mg e S (MALAVOLTA et al., 1997). Os resultados relativos aos teores totais e à massa seca produzida foram utilizados para a determinação do acúmulo de cada nutriente na parte aérea, na raiz e na planta.

Para o cálculo da eficiência nutricional dos clones de cedro-australiano para os macronutrientes utilizaram-se os seguintes índices representados pelas Equações 2, 3 e 4:

Eficiência de absorção (EA)

$$EA = \frac{\text{mg do nutriente na planta}}{\text{g de massa seca de raiz}}, \text{ (SWIADER et al., 1994)} \quad (2)$$

Eficiência de translocação (ET)

$$ET = \frac{\text{mg do nutriente na parte aérea}}{\text{mg do nutriente na planta}}, \text{ (LI et al., 1991)} \quad (3)$$

Eficiência de utilização (EU)

$$EU = \frac{(\text{g massa seca total})^2}{\text{mg do nutriente na planta}}, \text{ (SIDDIQI; GLASS, 1981)} \quad (4)$$

Diagramas foram utilizados para agrupar os clones quanto à eficiência nutricional, em que as médias de absorção e de utilização de cada nutriente foram utilizadas para separação dos quadrantes.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, utilizando-se o teste F e, quando significativa, foi feito o teste de Scott & Knott, a 5%, no intuito de agrupar os materiais genéticos. Utilizou-se o programa estatístico SISVAR para a realização dessas análises estatísticas (FERREIRA, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Crescimento e produção de biomassa

Os clones de cedro-australiano diferiram quanto à altura e à área foliar ($p < 0,05$) (Tabela 1). Os clones HE e XF apresentaram maior crescimento em altura quando comparados aos demais. No entanto, o clone XF foi o que apresentou a menor área foliar. O diâmetro do caule das mudas não variou entre os clones avaliados (Tabela 1).

Tabela 1. Altura, diâmetro do caule e área foliar de clones de cedro-australiano.

Table 1. Height, stem diameter, leaf area of Australian cedar clones.

Clone	Altura	Diâmetro do caule	Área foliar
	cm	mm	cm ²
HE	48,4a ⁽¹⁾	6,82a	2174a
XF	46,1a	6,67a	1319b
XD	40,8b	6,50a	1893a
XE	43,2b	6,25a	1793a
Média	44,6	6,59	1794

⁽¹⁾Valores seguidos da mesma letra, em cada coluna, não diferem entre si (Scott-Knott, 5%).

Em relação à produção de biomassa, o clone HE também apresentou maior produção de massa seca da parte aérea (MSPA) comparado aos demais, o que refletiu em sua maior produção de massa seca total (MST) (Tabela 2). Tal fato corrobora os resultados obtidos para as características morfológicas que demonstram o maior crescimento vegetativo da parte aérea para este clone (Tabela 1). As produções de massa seca de raiz dos clones HE, XF e XD foram semelhantes, mas superiores em relação ao clone XE (Tabela 2).

Tabela 2. Produção de massa seca da parte aérea (MSPA), do sistema radicular (MSR), total (MST) e a relação entre a massa seca da parte aérea e da raiz apresentadas pelos clones de cedro.

Table 2. Dry matter yield of the shoot, root system, total and the ratio between the shoot and root dry presented by the cedar clones matter.

Clone	MSPA	MSR	MST	MSPA/MSR
	g planta ⁻¹			
HE	7,61a ⁽¹⁾	1,32a	8,93a	5,80a
XF	5,83b	1,48a	7,31b	3,98b
XD	6,32b	1,41a	7,73b	4,52b
XE	6,15b	1,10b	7,25b	5,57a
Média	6,48	1,33	7,81	4,96

⁽¹⁾Valores seguidos da mesma letra, em cada coluna, não diferem entre si (Scott-Knott, 5%).

A relação entre a produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e da raiz (MSR) é uma informação relevante, uma vez que evidencia o investimento relativo de fotoassimilados para o crescimento destes compartimentos da planta. Em outras palavras, uma menor relação entre essas produções reflete um maior investimento na produção de raízes. Neste contexto, os clones XF e XD obtiveram maiores produções relativas de raízes, quando comparadas com as produções de biomassa aérea. Por outro lado, maiores relações entre a produção de massa seca da parte aérea e de raízes foram observadas para os clones HE e XE, devido ao maior investimento relativo na produção de biomassa aérea e à menor produção de raízes, respectivamente (Tabela 2).

Em termos práticos, baixa relação parte aérea/raiz pode sugerir uma maior capacidade da planta de se adaptar às condições de baixa fertilidade do solo, uma vez que, segundo Horn et al. (2006), haverá maior translocação de fotoassimilados para a produção de raízes, o que implicará em uma maior exploração do solo para garantir o suprimento necessário de nutrientes. Em contrapartida, os autores enfatizam que este investimento pode limitar o desenvolvimento vegetativo da parte aérea das plantas, o que pode afetar

diretamente o potencial produtivo do material genético. A baixa relação parte aérea/raiz também pode ser uma estratégia da planta para tolerar o estresse hídrico em função da restrita disponibilidade de água (REIS et al. 2006).

Quantidade acumulada de macronutrientes e eficiência nutricional

As quantidades acumuladas de macronutrientes nos diferentes compartimentos das plantas se encontram na Tabela 3. Nas condições em que foi realizado este trabalho, a sequência do acúmulo de macronutrientes na parte aérea foi de: $N > K > Ca > P > S > Mg$ e, nas raízes, foi de: $N > K > Ca > S > P > Mg$. Em um estudo com o cultivo do cedro-australiano em dois sistemas de minijardim multiclonal, conduzidos em tubete e canaletão, realizado por Souza et al. (2014), foi obtida a ordem decrescente dos conteúdos acumulados dos macronutrientes pelas minicepas para ambos os sistemas: $N > K > Ca > P > Mg > S$. De forma semelhante ao observado neste trabalho, os nutrientes mais extraídos pelo cedro-australiano, na fase jovem, foram N, K e Ca.

Tabela 3. Quantidade acumulada de macronutrientes na parte aérea (PA), na raiz (R) e total em clones de cedro-australiano.

Table 3. Amount accumulated of macronutrients in the shoot (S), root (R) and total in Australian cedar clones.

Clone	Acúmulo PA	Acúmulo R	Acúmulo Total	Acúmulo PA	Acúmulo R	Acúmulo Total
			mg planta ⁻¹			
			Nitrogênio			Enxofre
HE	435,17a	36,90a	472,07a	36,21a	2,08a	38,28a
XF	379,64b	34,08a	413,71b	36,19a	2,16a	38,35a
XD	336,78c	37,83a	374,60c	40,17a	2,29a	42,46a
XE	333,25c	30,22b	363,46c	28,14b	1,78b	29,92b
Média	371,21	34,76	405,96	35,18	2,08	37,26
			Fósforo			Potássio
HE	37,92b	1,76b	39,69b	321,61a	20,18b	341,78a
XF	47,48a	2,07a	49,54a	257,28b	26,47a	283,74b
XD	44,28a	1,86b	46,15a	273,54b	26,10a	299,64b
XE	27,87c	1,41c	29,28c	272,76b	18,41b	291,16b
Média	39,39	1,77	41,16	281,29	22,79	304,08
			Cálcio			Magnésio
HE	156,59a	5,53b	162,11a	34,65a	1,07a	35,72a
XF	165,38a	7,11a	172,49a	27,18b	1,19a	28,37b
XD	156,73a	6,98a	163,71a	27,66b	1,14a	28,79b
XE	109,00b	4,96b	113,96b	22,12c	0,83b	22,94c
Média	146,92	6,15	153,07	27,9	1,06	28,96

⁽¹⁾Valores seguidos da mesma letra, em cada coluna, não diferem entre si (Scott-Knott, 5%).

O clone HE foi um dos mais eficientes para acumular nutrientes, pois foi o que acumulou as maiores quantidades totais de N, K e Mg e ainda foi um dos mais eficientes em acumular Ca e S. No entanto, juntamente com o clone XE, acumulou as menores quantidades totais de P. Os clones XF e XD apresentaram comportamento semelhante quanto ao acúmulo de P, pois foram os que acumularam as maiores quantidades totais e destacaram também como eficientes em acumular Ca e S. Por sua vez, o clone XE foi o mais ineficiente em acumular nutrientes, pois, com pequenas exceções, acumulou as menores quantidades de N, P, K, Ca, Mg e S na parte aérea e nas raízes dos clones testados (Tabela 3).

Os clones de cedro-australiano distinguiram-se quanto à eficiência de absorção, translocação e utilização de N, Ca e Mg, à eficiência de absorção e utilização de P, à eficiência de absorção e translocação de K e à eficiência de utilização de S (Tabela 4).

Tabela 4. Eficiências de absorção (EA), translocação (ET) e utilização (EU) dos macronutrientes por clones de cedro-australiano.

Table 4. Efficiencies of uptake (EU), translocation (ET) and utilization (EU) of the Australian cedar clones.

Clone	EA	ET	EU	EA	ET	EU
	mg g ⁻¹		g ² mg ⁻¹	mg g ⁻¹		g ² mg ⁻¹
Nitrogênio			Enxofre			
HE	344,14a ⁽¹⁾	0,92a	0,18a	27,96a	0,95a	2,09a
XF	274,54b	0,92a	0,13b	25,95a	0,94a	1,46b
XD	274,71b	0,90b	0,16a	29,14a	0,95a	1,38b
XE	321,85a	0,92a	0,14b	28,49a	0,94a	1,67b
Média	302,67	0,91	0,15	27,88	0,94	1,64
Fósforo			Potássio			
HE	31,11a	0,96a	1,90a	251,48a	0,94a	0,22a
XF	32,61a	0,96a	1,13c	183,86c	0,91b	0,19a
XD	31,68a	0,96a	1,25c	222,80b	0,92b	0,20a
XE	25,71b	0,95a	1,71b	257,50a	0,94a	0,19a
Média	30,27	0,96	1,50	228,90	0,92	0,20
Cálcio			Magnésio			
HE	119,08a	0,97a	0,47a	26,11a	0,97a	2,14b
XF	122,23a	0,96b	0,30c	19,77b	0,95c	1,96b
XD	120,84a	0,96b	0,37b	21,38b	0,95c	2,08b
XE	103,36b	0,95b	0,50a	20,89b	0,96b	2,49a
Média	116,38	0,96	0,41	22,04	0,96	2,17

⁽¹⁾Valores seguidos da mesma letra, em cada coluna, não diferem entre si (Scott-Knott, 5%).

Distinta magnitude dos índices de eficiência de absorção (EA) foi observada entre os clones de cedro-australiano para o nitrogênio (N) (Tabela 4). Os clones HE e XE mostraram maiores índices de eficiência de absorção de N, devido ao maior acúmulo do nutriente na planta (Tabela 3) pelo primeiro e, principalmente, à baixa produção de raízes obtida pelo segundo (Tabela 2). Em relação à eficiência de translocação de N para a parte aérea, os clones HE, XF e XE apresentaram maiores índices em relação ao clone XD. Os clones HE e XD foram mais eficientes na utilização do N, ou seja, demonstram maior capacidade de convertê-lo em biomassa. Neste caso, é importante ressaltar que o clone XD, mesmo com uma menor eficiência de absorção deste nutriente, mostrou-se

eficiente na sua utilização. Para o S, apenas a eficiência de utilização permitiu distinguir os clones de cedro-australiano, tendo o clone HE como destaque por apresentar um maior índice em relação aos demais (Tabela 4), em função da sua maior produção de biomassa (Tabela 2).

Considerando as eficiências de absorção e de utilização de N e S, os diagramas apresentados na Figura 1 permitiram agrupar os clones de cedro-australiano quanto à eficiência nutricional para estes nutrientes.

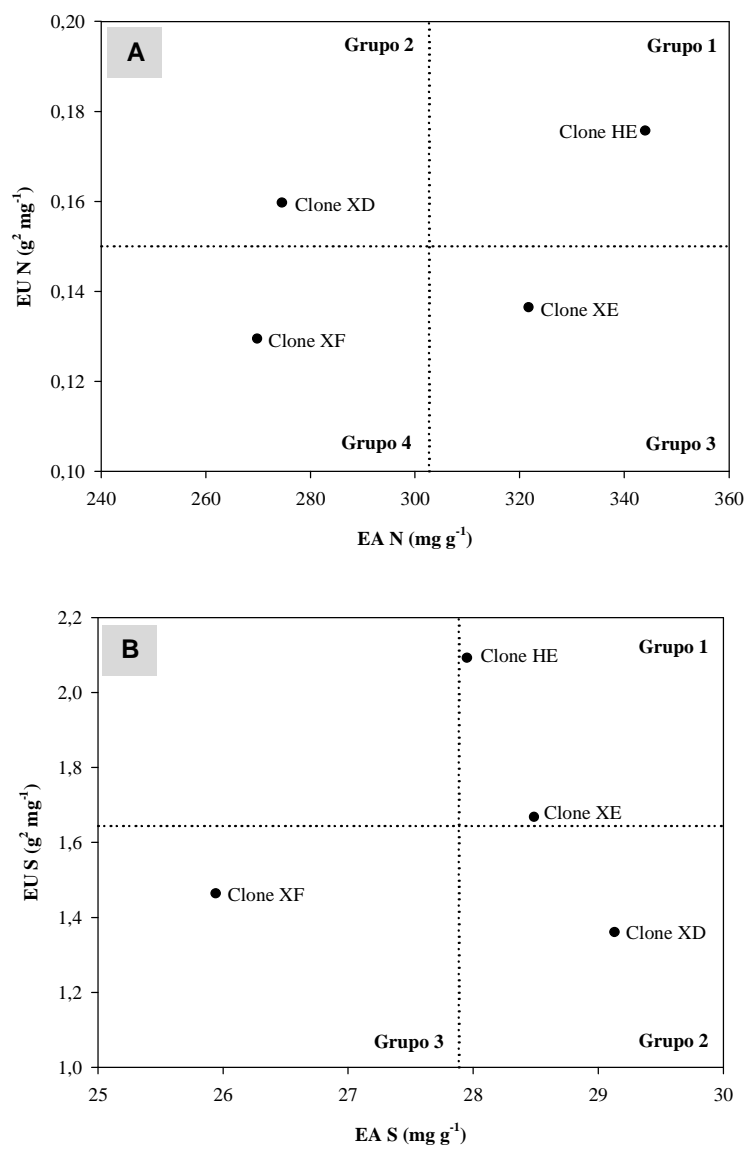


Figura 1. Diagramas de distribuição dos clones de cedro-australiano, em função da eficiência nutricional de nitrogênio (A) e enxofre (B).

Figure 1. Distribution diagrams of Australian cedar clones as a function of nitrogen (A) and sulfur (B) nutritional efficiency.

Para o N, foi possível agrupar os clones em quatro grupos distintos: grupo 1 – clone HE com alta eficiência de absorção e utilização; grupo 2 – clone XD com baixa eficiência de absorção, porém, elevada eficiência de utilização; grupo 3 – clone XE, com alta eficiência de absorção e baixa eficiência de utilização e o grupo 4 – clone XF, com baixas eficiências de absorção e utilização (Figura 1A).

Os clones HE e XD, pertencentes aos grupos 1 e 2, respectivamente, parecem permitir reduções nas adubações nitrogenadas, devido à alta capacidade de converter o N em biomassa, sem comprometer a produtividade, além de favorecer a sustentabilidade do povoamento florestal. Por outro lado, os clones do grupo 3 e 4, representados pelo XE e XF, respectivamente, poderiam ser alocados em solos com maior disponibilidade de N e ou com maiores investimentos em fertilizantes nitrogenados para garantir a manutenção da produtividade (Figura 1A). Vale ressaltar que o maior investimento na fertilização do clone XE pode ser justificado, devido à sua alta taxa de recuperação do N em solução, o que pode refletir em uma resposta produtiva.

Os clones de eucalipto avaliados por Pinto et al. (2011) também foram distribuídos em quatro grupos, quanto à eficiência nutricional em N. Os autores sugerem uma devida atenção para os clones pertencentes aos grupos 2 e 3, quanto à adubação nitrogenada, em especial na fase de implantação, pelo fato de ser o nutriente que mais limita o crescimento das plantas, no intuito de não comprometer a produção do sítio florestal.

O diagrama de distribuição dos clones em função da eficiência nutricional para o S permitiu agrupá-los em: grupo 1 – composto pelos clones HE e XE com alta eficiência de absorção e utilização; grupo 2 – composto pelo clone XD com alta eficiência de absorção e baixa eficiência de utilização e grupo 3 – composto pelo clone XF com baixas eficiências de absorção e utilização (Figura 1B).

O cedro-australiano é considerado uma espécie exigente em S (BRAGA et al., 2014) e, com isso, deve-se direcionar esforços para garantir o suprimento adequado deste nutriente para as plantas. A avaliação da eficiência nutricional é uma ferramenta que pode auxiliar na escolha do material genético para a alocação à distinta disponibilidade de S no solo. Neste contexto, faz-se conveniente, a princípio, a escolha pelos clones HE e XE, componentes do grupo 1, por apresentarem maior eficiência na absorção e na utilização do S. Os clones XD (grupo 2) e XF (grupo 3) requerem a devida atenção quanto à adubação sulfatada, visto que os mesmos apresentam baixa capacidade de converter este nutriente em biomassa (Figura 1B).

Diferenças entre os clones também foram identificadas quanto à eficiência de absorção de P e K (Tabela 4). Para o P, a maioria dos clones avaliados mostraram eficientes na sua absorção, com exceção do clone XE, em função do menor acúmulo do nutriente na planta (Tabela 3) e menor produção de raízes (Tabela 2). Para o K, os clones HE e XE obtiveram maiores índices de eficiência de absorção deste nutriente. Esses resultados corroboram os obtidos com a avaliação dos parâmetros cinéticos de absorção de P e K por clones de cedro-australiano (Artigo 1). Neste trabalho, observam-se destaques para os clones XF e XE por serem mais eficientes em absorver P (Artigo 1 – Figura 2) e K (Artigo 1 – Figura 3), respectivamente, tanto em alta quanto em baixa disponibilidade em solução.

Em relação à eficiência de translocação de K para a parte aérea, os clones HE e XE também se destacaram em relação aos demais. O clone HE foi mais eficiente na utilização de P, seguido pelo clone XE (Tabela 4). Esta maior eficiência do clone HE está relacionada à sua maior produção de biomassa (Tabela 2) e ao menor acúmulo de P determinado nas plantas (Tabela 3).

No estudo realizado por Lima et al. (2005), com clones de eucalipto, os autores verificaram que as diferenças na eficiência nutricional quanto à K

ocorreram em função de distinta eficiência de absorção e não por diferenças na eficiência de utilização. Por outro lado, Pinto et al. (2011) relatam variações entre clones de eucalipto quanto à eficiência nutricional deste nutriente, decorrentes da variação dos mesmos índices utilizados no presente trabalho.

De acordo com Pozza et al. (2009), quando se avalia a produção de biomassa em relação ao suprimento de nutrientes, a eficiência de utilização do nutriente absorvido pela planta é tão importante quanto à eficiência de absorção dos nutrientes. Vários estudos demonstram o comportamento diferencial entre variedades ou espécies na absorção e no uso de nutrientes (LIMA et al., 2005; POZZA et al., 2009; PINTO et al., 2011; FONTES et al., 2013).

Levando em consideração a eficiência nutricional para P, os clones de cedro-australiano podem ser agrupados em: grupo 1 – clones com alta eficiência de absorção e utilização (clone HE); grupo 2 – clones com baixa eficiência de absorção e alta de utilização (clone XE) e grupo 3 – clones com alta eficiência de absorção e baixa eficiência de utilização (clones XD e XF) (Figura 2A). Para o K, os clones foram distribuídos em quatro grupos: grupo 1 - clones com alta eficiência de absorção e utilização (clone HE); grupo 2 – clones com baixa eficiência de absorção e alta de utilização (clone XD); grupo 3 – clones com alta eficiência de absorção e baixa eficiência de utilização (clone XE) e grupo 4 – clones com baixa eficiência de absorção e utilização (clone XF) (Figura 2B).

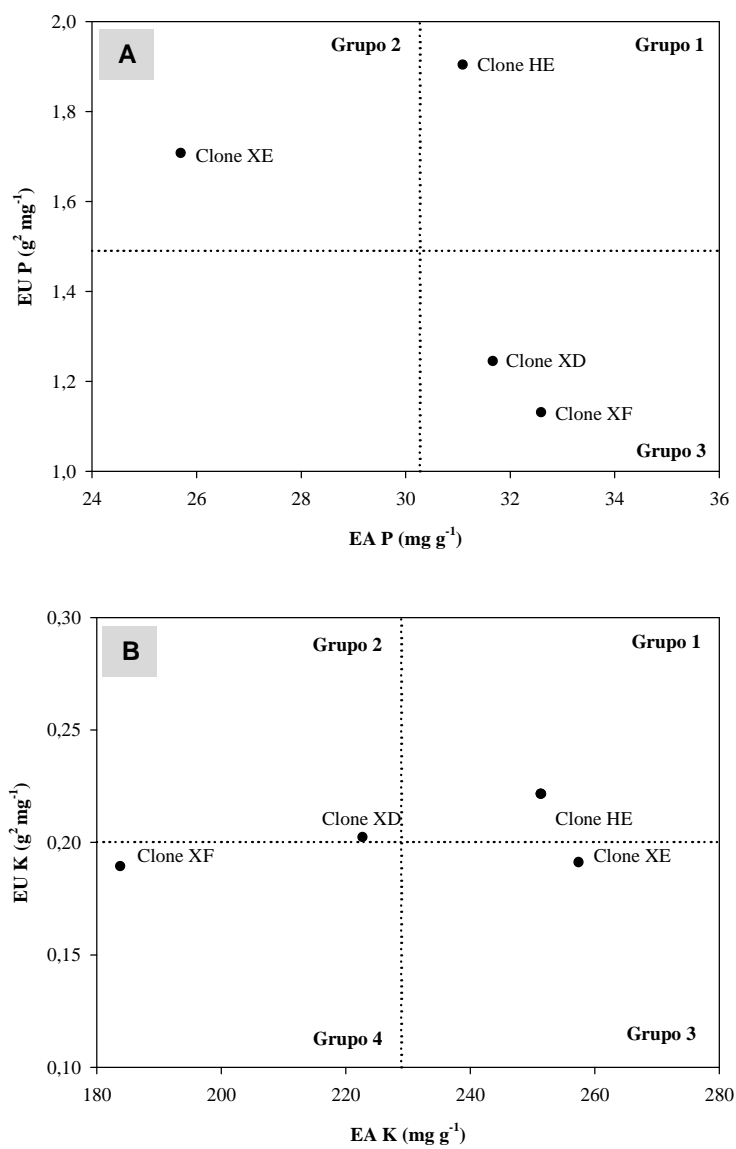


Figura 2. Diagramas de distribuição dos clones de cedro-australiano, em função da eficiência nutricional de fósforo (A) e potássio (B).

Figure 2. Distribution diagrams of Australian cedar clones as a function of phosphorus (A) and potassium (B) nutritional efficiency.

A maioria das florestas plantadas no Brasil apresenta o cultivo das espécies florestais em solos com baixa fertilidade natural, principalmente quanto à baixa disponibilidade de P e K (SILVEIRA et al., 2004). A sustentabilidade dos plantios florestais pode ser alcançada, especialmente, pela adoção de regimes diferenciados de adubação para suprir adequadamente às necessidades nutricionais de cada material genético, evitando a ocorrência do esgotamento da fertilidade do solo ou, ainda, contaminações do ecossistema decorrentes da aplicação excessiva de fertilizantes. Nesse sentido, os clones pertencentes aos grupos 1 e 2 para a eficiência nutricional em P e K (Figura 2A e 2B, respectivamente) sugerem uma menor exigência em adubações em relação aos clones do grupo 3, para P (Figura 2 A) e dos grupos 3 e 4, para K (Figura 2B), devido à alta eficiência dos mesmos em utilizar estes nutrientes para produção de biomassa. Com isso, em condições limitantes de P e K no solo, a planta com maior eficiência de uso pode apresentar maior potencial produtivo e menor exigência desses elementos. Quanto à eficiência nutricional, tanto de P como de K, o clone HE se destacou em relação aos demais, o que sugere uma alocação para solos com distintas condições de disponibilidade destes nutrientes.

É importante ressaltar que, para a manutenção da sustentabilidade de uma floresta plantada, é necessário, também, o conhecimento da ciclagem biogeoquímica dos nutrientes. Santana et al. (2002) enfatizam que o emprego de técnicas de manejo que optem por plantas mais eficientes em utilizar nutrientes, conservando ao máximo os resíduos da espécie no sítio florestal, além do ciclo de crescimento ser longo o suficiente para permitir, através da serapilheira, a máxima eficiência da ciclagem de nutrientes, terá como consequência uma maior conservação do ecossistema dos plantios florestais. Nesse sentido, Moura et al. (2006) sugerem a prática de exportar do sítio florestal apenas a parte comercial de interesse, deixando restos vegetais, como galhos, folhas, raízes e cascas. Este aspecto é particularmente importante para nutrientes pouco móveis

na planta, uma vez que estes nutrientes ficariam alocados nos órgãos mais velhos e nas cascas das árvores.

As eficiências de absorção, translocação e utilização de Ca e de Mg para os quatro clones de cedro-australiano podem ser observadas na Tabela 4. Os clones HE, XF e XD foram mais eficientes na absorção de cálcio, e apenas o clone HE, mais eficiente na absorção de magnésio. Em todos os casos, a maior eficiência de absorção está relacionada aos maiores acúmulos destes nutrientes (Tabela 3). Essas eficiências de absorção corroboram os resultados obtidos pelos clones testados em relação aos parâmetros cinéticos de absorção apresentados no Artigo 1, com destaque para o clone HE, que demonstrou maior plasticidade quanto ao aproveitamento de Ca (Artigo 1 – Figura 4) e Mg (Artigo 1 – Figura 5) em solução. O clone HE apresentou maior eficiência de translocação de Ca e de Mg, transportando mais eficientemente os nutrientes absorvidos para a parte aérea. Diferenças significativas entre os clones em relação à eficiência de utilização foram observadas tanto para o Ca como para o Mg, tendo os clones HE e XE sido mais eficientes na utilização do Ca e apenas este último clone, mais eficiente na utilização do Mg. A maior eficiência em converter Ca e Mg por estes clones está associada, principalmente, à maior produção de MST pelo clone HE (Tabela 2) e ao menor acúmulo obtido pelo clone XE (Tabela 3).

A menor eficiência de utilização do Ca pelos clones XF e XD pode ser atribuída, em parte, à baixa mobilidade deste nutriente no floema (MARSCHNER, 2012) e a uma possível imobilização na forma de oxalato ou fosfato de cálcio (CALDEIRA et al., 2002). Comportamento semelhante foi identificado por Faria et al. (2008) em árvores de híbridos *Eucalyptus* spp. sob fornecimento de Ca. No entanto, o cultivo de genótipos menos eficientes no uso de Ca evidencia a necessidade de maior investimento em relação à calagem ou a um fertilizante que contenha o nutriente, principalmente na fase de implantação da floresta. No caso do cedro, estudos anteriores indicam que a espécie é

sensível à acidez (BRAGA, 2011), exigindo, dessa forma, o fornecimento de calcário.

Vale ressaltar que os clones de cedro-australiano testados neste trabalho foram mais eficientes em transportar Ca e Mg para a parte aérea do que clones de eucalipto avaliados no mesmo período de cultivo (45 dias). No estudo de Pinto et al. (2011) com clones de eucalipto cultivados em solução nutritiva, na fase de muda, as maiores porcentagens de translocação do Ca e do Mg para a parte aérea foram de 90% e 93%, respectivamente. Por outro lado, os clones de cedro-australiano atingiram patamares de até 97% de translocação desses nutrientes para esse compartimento.

Os clones podem ser separados em três grupos quanto à eficiência nutricional para Ca (Figura 3A) e Mg (Figura 3B). Para o Ca, os clones agruparam-se em: grupo 1 – HE com alta eficiência de absorção e utilização; grupo 2 – XE com baixa eficiência de absorção e alta de utilização e grupo 3 – XD e XF com alta eficiência de absorção e baixa de utilização. Para o Mg, os clones foram distribuídos em: grupo 1 – XE com baixa eficiência de absorção e alta de utilização; grupo 2 – HE com alta eficiência de absorção e baixa de utilização e grupo 3 – XD e XF com baixas eficiências de absorção e utilização.

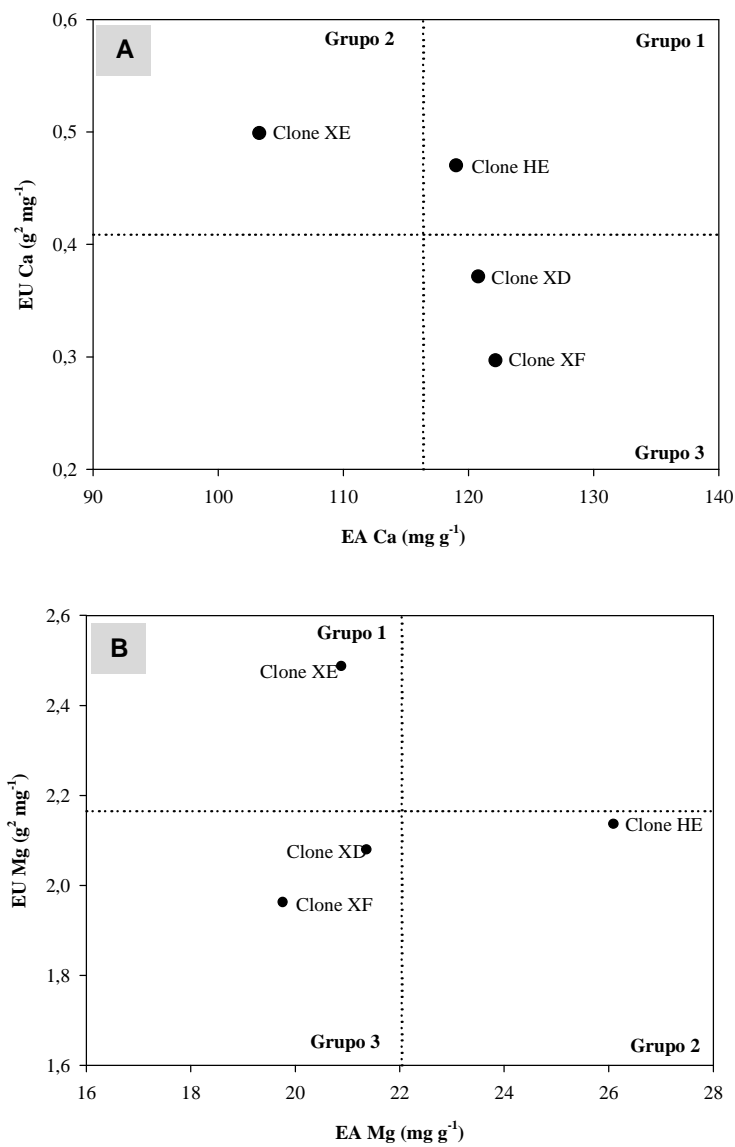


Figura 3. Diagramas de distribuição dos clones de cedro-australiano, em função da eficiência nutricional de cálcio (A) e magnésio (B).

Figure 3. Distribution diagrams of Australian cedar clones as a function of calcium (A) and magnesium (B) nutritional efficiency.

A elevada eficiência de utilização de nutrientes demonstrada pelos clones distribuídos nos grupos 1 (HE) e 2 (XE) para Ca e pelo clone do grupo 1 (XE) para Mg (Figuras 3A e 3B, respectivamente) sugere que estes clones podem apresentar menor diferença de resposta produtiva sob alta ou baixa disponibilidade desses nutrientes. Tal fato auxilia na redução da exportação de nutrientes por unidade de biomassa de lenho, sendo um aspecto importante para uma exploração florestal de forma sustentável. Por outro lado, alta eficiência de absorção associada à baixa produção de biomassa, como observado para os clones XD e XF para Ca, pode sugerir em um possível consumo de luxo (FURTINI NETO et al., 1996) do nutriente pelas plantas.

Considerando à eficiência nutricional para os macronutrientes, de modo geral, os clones de cedro-australiano podem ser categorizados na seguinte ordem decrescente: HE > XE > XD > XF. Neste caso, o clone HE mostrou-se mais eficiente na absorção e na utilização de N, P, K, Ca e S, refletindo em uma maior produção de biomassa pelas plantas. O clone XE apresentou alta eficiência de absorção e de utilização apenas para o S, porém, se destacou pela maior eficiência de uso do P, Ca e Mg. O clone XD foi eficiente no uso de N e K e ineficiente no uso dos outros macronutrientes. Por fim, o clone XF obteve maior eficiência de uso para P e Ca, no entanto, mostrou-se ineficiente tanto na absorção quanto na utilização de N, S, K e Mg. Vale ressaltar que o clone XD foi o que apresentou maior volume de raízes e área superficial (Artigo 1 – Tabela 2), porém, não foi o mais eficiente em absorver e utilizar os macronutrientes. Por outro lado, o clone HE, mesmo com um menor desenvolvimento do sistema radicular (Artigo 1 – Tabela 2), foi o mais eficiente, nutricionalmente, em relação aos demais. Neste caso, sugere que outros mecanismos possam estar envolvidos na absorção de macronutrientes por este clone.

Neste trabalho foi observado que o clone mais eficiente em absorver e utilizar nutrientes (HE) apresentou maior relação parte aérea/raiz (Tabela 2) e maior eficiência em translocar nutrientes para produzir biomassa aérea (Tabela 4). Estas características fisiológicas podem contribuir para que este clone apresente uma maior produção da parte aérea com um menor requerimento nutricional em relação aos demais.

A eficiência nutricional de espécies ou genótipos distintos pode estar associada a vários mecanismos e suas interações (MARSCHNER, 2012) que, certamente, não foram abordados no presente trabalho. No entanto, tomando como base os resultados apresentados, os clones mais eficientes nutricionalmente, caso sejam alocados para solos de baixa fertilidade natural, deve-se levar em consideração um menor investimento em fertilizantes e corretivos, podendo apresentar uma maior recuperação dos nutrientes aplicados, contribuindo, de certa forma, para a manutenção da sustentabilidade da produção florestal.

É importante ressaltar que o estudo realizado com clones de cedro-australiano em condições ambientais controladas, na fase de muda, possibilitou a identificação de diferenças na eficiência nutricional para macronutrientes, porém, para validar essas informações obtidas, faz-se necessária a condução de estudos com materiais adultos em distintas condições edafoclimáticas. Tais trabalhos podem auxiliar na avaliação do comportamento nutricional e da produtividade destes clones levando em consideração influências do sítio florestal, da idade, do uso de fertilizantes e corretivos e das práticas de manejo.

CONCLUSÕES

Os materiais genéticos avaliados diferem na capacidade de crescimento e de produção de biomassa, bem como no comportamento nutricional.

Diferenças na eficiência nutricional dos clones de cedro-australiano para os macronutrientes podem ser atribuídas às diferenças na capacidade de absorção, de translocação e de utilização destes nutrientes.

O clone HE se destaca por ser o mais produtivo e eficiente na absorção e utilização de macronutrientes.

As diferenças identificadas quanto ao comportamento nutricional para macronutrientes em mudas de clones de cedro-australiano supõe uma melhor adaptação a ambientes com distintas disponibilidades desses elementos em solução. Porém, para validar essa informação, há a necessidade da condução de novos estudos com os materiais genéticos no campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. 330p.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas**: noções básicas. Jaboticabal: FUNEP, 2003. 42 p.

BRAGA, M. M. **Crescimento e qualidade de mudas de cedro-australiano (*Toona ciliata* M. Roem var. *australis*) em função da aplicação de calcário e enxofre**. 2011. 81 p. Dissertação (Mestrado em Fertilidade do Solo e Nutrição Mineral de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

BRAGA, M. M.; FURTINI NETO, A. E.; OLIVEIRA, A. H.; BATISTA, R. O. Enxofre no crescimento e qualidade de mudas de cedro-australiano. **Científica**, Jaboticabal, v. 42, n. 1, p. 91-100, 2014.

CALDEIRA, M. V. W.; RONDON NETO, R. M.; SCHUMACHER, M. V. Avaliação da eficiência nutricional de três procedências australianas de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 5, p. 615-620, 2002.

CLARK, R. B. Characterization of phosphates of intact maize roots. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Davis, v. 23, n. 3, p. 458-460, 1975.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n.1, p. 6-16, 1998.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Screening crop genotypes for mineral stresses. In: WORKSHOP ON ADAPTATION OF PLANTS TO SOIL STRESSES, 1993, Lincoln. **Proceedings...** Lincoln: University of Nebraska, 1993. p.142- 159.

FARIA, G. E.; BARROS, N. F.; CUNHA, V. L. P.; MARTINS, I. S.; MARTINS, R. C. C. Avaliação da produtividade, conteúdo e eficiência de utilização de nutrientes em genótipos de *Eucalyptus* spp. no vale do Jequitinhonha, MG. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 363-373, 2008.

FERREIRA, D. F. SISVAR: A Computer Statistical Analysis System. **Revista Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FONTES, A. G.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F. Eficiência nutricional de espécies arbóreas em função da fertilização fosfatada. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 73, p. 9-18, 2013.

FURTINI NETO, A. E.; BARROS, N. F.; GODOY, M. F.; NOVAIS, R. F. Eficiência nutricional de mudas de *Eucalyptus* em relação a fósforo. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 20, n.1, p. 17-28, 1996.

HORN, D.; ERNANI, P. R.; SANGOI, L.; SCHWEITZER, C.; CASSOL, P. C. Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidade genética contrastante. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n.1, p. 77-85, 2006.

LI, B.; McKEAND, S. E.; ALLEN, H. L. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings. **Forest Science**, Bethesda, v. 37, n.2, p. 613-626, 1991.

LIMA, A. M. N.; NEVES, J. C. L.; SILVA, I. R. LEITE, F. P. Cinética de absorção e eficiência nutricional de K, Ca e Mg em plantas jovens de quatro clones de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 903-909, 2005.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2012. 651p.

MOURA, O. N.; PASSOS, M. A. A.; FERREIRA, R. L. C. GONZAGA, S.; LIRA, M. A.; CUNHA, M. V. Conteúdo de nutrientes na parte aérea e eficiência nutricional em *Mimosa caesalpinifolia* Benth. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Pernambuco, v. 1, n. 1, p. 23-29, 2006.

PINTO, S. I. do C.; FURTINI NETO, A. E.; NEVES, J. C. L.; FAQUIN, V.; MORETTI, B. da S. Eficiência nutricional de clones de eucalipto na fase de mudas cultivados em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 523-533, 2011.

POZZA, A. A. A.; CARVALHO, J. G.; GUIMARES, P. T. G.; FIGUEIREDO, F. C.; ARAÚJO, A. R. Suprimento do silicato de cálcio e a eficiência nutricional

de variedades de cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1705-1714, 2009.

REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; FONTAN, I. C. I.; MONTE, M. A.; GOMES, A. N.; OLIVEIRA, C. H. R. Crescimento de raízes e da parte aérea de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus* spp submetidos a dois regimes de irrigação no campo. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 921-931, 2006.

SANTANA, R. C.; BARROS, N. F.; NEVES, J. C. L. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do Estado de São Paulo. **Revista Árvore**, Viçosa, v.26, n.4, p. 447-457, 2002.

SIDDIQI, M. Y.; GLASS, A. D. M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 4, n. 3, p. 289-302, 1981.

SILVEIRA, R. L. V. A.; HIGASHI, E. N.; GONÇALVES, A. N.; MOREIRA, A. Evaluation of the nutritional status of eucalypts: visual and foliar diagnoses and their interpretation. In: GONÇALVES, J. L. M. **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004. p. 85-111.

SOUZA, J. S.; BARROSO, D. G.; SILVA, M. P. S.; FERREIRA, D. A.; GRAVINA, G. A.; CARNEIRO, J. G. A. Produtividade de minicepas de cedro-australiano e remoção de nutrientes pela coleta sucessiva de miniestacas. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 1, p. 71-77, 2014.

SWIADER, J. M.; CHYAN, Y.; FREIJI, F. G. Genotypic differences in nitrate uptake and utilization efficiency in pumpkin hybrids. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 17, n. 10, p. 1687-1699, 1994.

APÊNDICE A

SEGUNDO ARTIGO

TABELA 1A - Análises de variância da altura, diâmetro do caule e área foliar de clones de cedro-australiano.

FV	GL	Altura	Quadrado Médio	
			Diâmetro do caule	Área Foliar
Clone	3	44,67*	0,2399	506535*
Resíduo	16	6,56	0,0887	108331
CV (%)		5,7	4,5	18,3

*Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F.

TABELA 2A - Análises de variância da produção de massa seca por clones de cedro-australiano.

FV	GL	Quadrado Médio			
		MSPA	MSR	MST	MSPA/MSR
Clone	3	2,4506*	0,1086*	2,4291*	2,9819*
Resíduo	16	0,4225	0,0184	0,4665	0,4135
CV (%)		10,0	10,2	8,8	13,0

*Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. MSPA – massa seca da parte aérea, MSR – massa seca da raiz e MST – massa seca total.

TABELA 3A - Análises de variância dos acúmulos de nitrogênio por clones de cedro-australiano.

FV	GL	Quadrado Médio		
		Acúmulo PA	Acúmulo R	Acúmulo total
Clone	3	9052,3776*	46,8041*	9627,9381*
Resíduo	16	459,9909	8,5386	477,7504
CV(%)		5,8	8,4	5,4

*Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. PA – parte aérea, R – raiz.

TABELA 4A - Análises de variância dos acúmulos de fósforo por clones de cedro-australiano.

FV	GL	Quadrado médio		
		Acúmulo PA	Acúmulo R	Acúmulo total
Clone	3	298,7396*	0,3052*	317,9020*
Resíduo	16	8,6611	0,0155	8,9690
CV(%)		7,5	7,0	7,3

*Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. PA – parte aérea, R – raiz.

TABELA 5A - Análises de variância dos acúmulos de potássio por clones de cedro-australiano.

FV	GL	Quadrado médio		
		Acúmulo PA	Acúmulo R	Acúmulo total
Clone	3	3112,9946*	67,4072*	2695,0346*
Resíduo	16	308,1268	3,0304	294,9484
CV(%)		6,2	7,6	5,7

*Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. PA – parte aérea, R – raiz.

TABELA 6A - Análises de variância dos acúmulos de cálcio por clones de cedro-australiano.

FV	GL	Quadrado médio		
		Acúmulo PA	Acúmulo R	Acúmulo total
Clone	3	2624,3083*	4,5534*	2802,0125*
Resíduo	16	51,7194	0,2357	55,0555
CV(%)		4,9	7,9	4,9

*Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. PA – parte aérea, R – raiz.

TABELA 7A - Análises de variância dos acúmulos de magnésio por clones de cedro-australiano.

FV	GL	Quadrado médio		
		Acúmulo PA	Acúmulo R	Acúmulo total
Clone	3	106,1893*	0,1046*	109,7532*
Resíduo	16	2,6526	0,0051	2,6372
CV(%)		5,8	6,7	5,6

*Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. PA – parte aérea, R – raiz.

TABELA 8A - Análises de variância dos acúmulos de enxofre por clones de cedro-australiano.

FV	Quadrado médio			
	GL	Acúmulo PA	Acúmulo R	Acúmulo total
Clone	3	102,0181*	0,1836*	110,7256*
Resíduo	16	10,0749	0,0149	10,2299
CV(%)		9,0	5,8	8,6

*Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F. PA – parte aérea, R – raiz.

TABELA 9A - Análises de variância das eficiências de absorção (EA), translocação (ET) e utilização (EU) de macronutrientes por clones de cedro-australiano.

Nitrogênio				
FV	Quadrado médio			
	GL	EA	ET	EU
Clone	3	5249,8635*	0,0004*	0,0017*
Resíduo	16	309,4699	0,0001	0,0003
CV(%)		5,8	0,9	11,0
Fósforo				
FV	Quadrado médio			
	GL	EA	ET	EU
Clone	3	38,5654*	0,00005	0,5426*
Resíduo	16	8,0269	0,00002	0,0057
CV(%)		9,4	0,5	5,1
Potássio				
FV	Quadrado médio			
	GL	EA	ET	EU
Clone	3	4522,5815*	0,0012*	0,0010
Resíduo	16	308,5553	0,0001	0,0004
CV(%)		7,7	0,8	9,7
Cálcio				
FV	Quadrado médio			
	GL	EA	ET	EU
Clone	3	307,8393*	0,000073*	0,0353*
Resíduo	16	58,8967	0,000007	0,0006
CV(%)		6,6	0,3	6,1
Magnésio				
FV	Quadrado médio			
	GL	EA	ET	EU
Clone	3	31,2026*	0,000108*	0,2020*
Resíduo	16	2,9029	0,000008	0,0441
CV(%)		7,7	0,3	9,7

TABELA 9A, conclusão

FV	Enxofre			
	GL	EA	Quadrado médio	
			ET	EU
Clone	3	7,5871	0,000038	0,4192*
Resíduo	16	3,8672	0,000041	0,0271
CV(%)		7,1	0,7	10,0

*Significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste F.