

Dendronutrição como ferramenta para avaliação da produtividade e da qualidade da madeira de *Pinus taeda*.

Antonio Francisco Jurado Bellote⁽¹⁾, Mario Tomazello Filho⁽²⁾, Renato Antonio Dedecek⁽¹⁾

⁽¹⁾Embrapa Florestas. Estrada da Ribeira, Km, 111, Caixa Postal 319, CEP 83411-000, Colombo-PR. E-mail: bellote@cnpf.embrapa.br, dedecek@cnpf.embrapa.br ⁽²⁾Departamento de Ciências Florestais-ESALQ/USP, Av. Pádua Dias nº. 11, Caixa Postal 09, CEP 13418-900, Piracicaba-SP. E-mail: mtomazel@esalq.usp.br

Resumo - Com o objetivo de avaliar o efeito dos nutrientes minerais na produtividade e qualidade da madeira de *Pinus taeda*, em plantações florestais com 20 anos, em diferentes tipos de solo. Foram demarcadas parcelas experimentais e selecionadas árvores representativas da população para coleta de discos do lenho, a diferentes alturas do tronco. Parâmetros de crescimento das árvores e de qualidade da madeira e dos anéis de crescimento – dimensões dos traqueídeos e densidade radial por densitometria de raios X – foram analisados e relacionados com o teor de nutrientes minerais. Os resultados mostraram correlações negativas entre o teor de Mn e Mg no lenho com o crescimento das árvores e entre os teores de Ca, Mg e o Mn e as dimensões dos traqueídeos e densidade do lenho; não foi verificada correlação entre os teores de N, P, K e B no lenho com as variáveis analisadas. O conceito de dendronutrição – estudo da relação entre os parâmetros de crescimento das árvores e dos anéis de crescimento com os nutrientes minerais no lenho – é discutido no presente trabalho.

Termos para indexação: Nutrientes minerais, densidade da madeira, traqueídeos, anéis de crescimento, solos florestais.

Dendronutrition as a tool to evaluate *Pinus taeda* wood productivity and quality

Abstract - The objective of this work was to evaluate the effect of mineral nutrients on tree growth and wood quality of *Pinus taeda*, on commercial plantation at 20 years after planting, on different soil types. Experimental plots were set, and from trees representing each population, stem disks were collected at different heights. Tree growth, wood quality and growth ring parameters – tracheids diameter and radial density by X-ray densitometry – were analyzed and related to mineral nutrient contents. Results showed negative correlation among Mn and Mg stem disk contents and *Pinus taeda* tree growth; negative correlation was also obtained among Ca, Mg and Mn contents and tracheids dimensions and wood density. There was no correlation among N, P, K and B contents in stem disks and tree growth or wood quality studied variables. Dendronutrition concept – study of relationship among tree growth parameters and growth rings to mineral nutrient contents in stem – is discussed in this work.

Index terms: Mineral nutrition, wood density, tracheids, tree rings, forest soils.

Introdução

A crescente demanda de madeira e seus produtos vêm atuando como importante fator de estímulo à busca de matérias-primas mais adequadas, com destaque para o mercado externo. Por outro lado, a madeira formada no lenho das árvores em plantações florestais tem sua qualidade influenciada pelos fatores ambientais, dentre estes, o substrato-solo e os nutrientes minerais. O estudo da acumulação e da influência que os nutrientes minerais exercem na qualidade e quantidade de madeira e dos

produtos florestais é fundamental para a definição dos solos mais adequados e recomendados nos programas de reflorestamento. Dentre os estudos sobre as propriedades físicas e químicas do solo sobre a produtividade e a qualidade da madeira, citam-se os relacionados com a taxa de crescimento e densidade do solo na produtividade (RAB, 1994; FENNER, 1999; DEDECEK et al., 2000), umidade (REIS et al., 1987; RODRIGUES, 2004) e textura do solo (CARVALHO et al., 1999; DEDECEK et al., 2000). O efeito dos nutrientes minerais na qualidade da madeira conduzido

por Dünisch (1993) indica que esses, interagindo com o teor de umidade do solo, afetam as dimensões dos anéis de crescimento de *Picea* sp. No Brasil, análises têm demonstrado que os atributos físicos e químicos do solo afetam a produtividade e a qualidade da madeira de *Pinus* para celulose (RIGATTO et al., 2004). Além destes, citam-se os resultados obtidos por Silva et al., (2003), Vogel et al., (2005) sobre a influência da adubação - conseqüentemente dos nutrientes minerais - na produção de madeira de *Pinus*. Neste enfoque, é importante determinar o efeito dos atributos do solo e da nutrição na produtividade e na qualidade da madeira produzida pelas árvores, aplicando o conceito de dendronutrição. Este pode ser considerado um ramo da dendroquímica, que aplica as metodologias de análise e caracterização dos anéis de crescimento, incluindo a análise do teor de minerais, possibilitando associar com fatores nutricionais das árvores e do solo que afetam a produção e a qualidade da madeira. A associação da estrutura anatômica aos teores de nutrientes minerais nos anéis de crescimento pode auxiliar na seleção de sítios adequados para o estabelecimento de plantações florestais, em função da qualidade da madeira produzida pelas árvores e as propriedades do solo, possibilitando aplicação de práticas silviculturais corretivas. Pelo exposto, o presente trabalho tem como objetivo analisar os parâmetros anatômicos, a densidade dos anéis de crescimento por densitometria de raios X e o crescimento das árvores e relacioná-los com os teores de nutrientes minerais - macro e micronutrientes - absorvidos pelas árvores e presentes nos anéis de crescimento do *Pinus taeda*.

Material e Métodos

Seleção e amostragem das árvores: em plantações comerciais de *Pinus taeda*, com 20 anos de idade, em diferentes tipos de solo, foram demarcadas quatro parcelas experimentais em cada um deles e selecionadas, por parcela, quatro árvores representativas do extrato dominante. Para cada árvore foram mensurados: o DAP, alturas total e comercial para serraria (24 cm de diâmetro) e para celulose (8 cm de diâmetro) e separados o tronco, ramos e acículas, sendo para esses dois últimos componentes, determinados o peso verde total e retiradas amostras para quantificação da biomassa e análise dos nutrientes minerais. Do tronco foram cortados dois discos de lenho+casca, em cinco

porcentagens da altura total (base, DAP, 25, 50, 75 e da ponteira) para a análise de nutrientes minerais e da avaliação da qualidade da madeira sem casca.

Análise de tronco: na análise de tronco, para determinar o incremento anual em altura das árvores, foram utilizados os discos do lenho da base, DAP, 25, 50 e 75 % do tronco conforme metodologia descrita por Finger (1992). A espessura dos anéis anuais de crescimento - para a determinação do incremento anual em diâmetro do tronco das árvores - foi obtida através de (i) mensurações diretas na superfície transversal dos discos de lenho e da (ii) aplicação do programa Dmadeira no perfil radial da densidade por densitometria de raios X (CHAGAS et al., 2005).

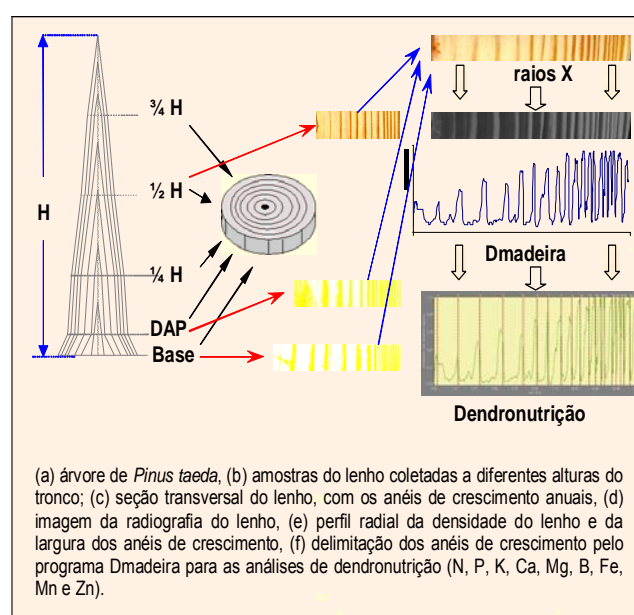


Figura 1. Dendronutrição: seqüência metodológica aplicada.

Cálculo do volume e do peso total do lenho das árvores: incremento anual e corrente anual em volume de lenho das árvores foram calculados pela equação de Smalian, expressa pelo somatório do volume dos toretes da base-DAP, DAP-25 %, 25-50 %; 50-75 % e 75-100 % da altura total. Com a densidade específica do lenho por densitometria de raios X determinou-se o peso seco do tronco, nas diferentes idades das árvores.

$$V = \frac{1}{2} \times \left(\left(\pi \times \frac{D^2}{4} \right) + \left(\pi \times \frac{d^2}{4} \right) \right) \times h$$

onde:

V = volume do segmento [m³];

D = diâmetro maior do segmento [m];

d = diâmetro menor do segmento [m];

h = comprimento do segmento [m].

Análises nutricionais das acículas, galhos e lenho: para as análises químicas dos nutrientes minerais (N, P, K, Ca, Mg, B, Fe, Mn e Zn) amostras dos anéis de crescimento do lenho das árvores foram secas em estufa ($60 \pm 2,5$ °C), moídas em moinho tipo Wiley (peneira: malha 20) e digeridas pelo método via úmida, (CLAESSEN, 1997). Para a determinação do teor de N, foi utilizada a digestão sulfúrica e para os demais nutrientes a nitroperclórica, exceto para o B. Para o N, o extrato foi submetido à destilação pelo método micro Kjeldahl, seguido de titulação; P foi determinado por calorimetria pelo método Vanado-molibdato de amônia; K por fotometria de chama; Ca, Mg, Fe, Mn e Zn por espectrometria de absorção atômica; B por via seca pelo método da curcumina seguido da aplicação via colorimétrica (CLAESSEN, 1997).

Variação radial da densidade por densitometria de raios X: na avaliação do perfil densitométrico do lenho dos discos da base, DAP e 50 % da altura total do tronco (Figura 1), foram cortadas sub-amostras diametrais com 20 mm x 10 mm (altura, espessura) de região representativa do lenho e isentas de defeitos. As amostras diametrais de lenho foram divididas na região da medula, sendo as duas amostras radiais por árvore fixadas em suporte de madeira e cortadas secções transversais (1 mm x 10 mm, espessura x altura) em aparelho de dupla serra circular. As amostras de lenho foram acondicionadas em sala climatizada (12 h, 20 °C, 50 % UR) atingindo 12 % de umidade. Em seguida foram dispostas sobre filmes de raios X (Kodak, Diagnostic Film X-Omat XK1, 240 mm x 180 mm) e radiografadas em equipamento de raios X (Hewlett Packard, Faxitron 43805 N) de acordo com Amaral (1994), Amaral e Tomazello Filho (1998). Os filmes radiográficos das amostras de madeira foram digitalizados em *scanner* e geradas imagens (resolução 1.000 dpi, sistema bmp) que foram analisadas nos programas Crad e Cerd e gerados os perfis densitométricos radiais e a espessura dos anéis de crescimento anuais. Os perfis densitométricos foram submetidos ao programa Dmadeira para a definição dos limites dos anéis de crescimento e determinação da sua espessura e a dos lenhos inicial e tardio, além das densidades específicas mínima, média e máxima dos anéis de crescimento e dos lenhos inicial e tardio.

Variação radial das dimensões dos traqueídeos:

amostras do lenho do DAP de três árvores de pínus foram selecionadas por área de estudo e, destas, duas sub-amostras radiais com um total de 24 corpos de prova. Nestes foram demarcados os anéis de crescimento do 4º, 8º, 12º, 16º e 20º anos e separados os seus lenhos inicial e tardio resultando 20 amostras por árvore. Estas amostras foram seccionadas, transferidas para tubos de ensaio, adicionada solução de ácido acético glacial e água oxigenada 120 vol, 1:1 e mantidas em estufa (60 °C, 24 h) e maceradas pelo método de Franklin (JOHANSEN, 1940; SASS, 1951). Nas lâminas histológicas obtidas, foram mensurados, sob microscopia, os traqueídeos (comprimento, espessura da parede, largura e diâmetro do lúmen).

Resultados e discussão

As correlações simples entre as variáveis dendrométricas e os teores de nutrientes minerais no lenho do *Pinus taeda*, em função da idade indicam significância estatística para o Ca, Mg e Mn (Tabela 1).

Tabela 1. Coeficiente de correlação (r) entre os teores de nutrientes no lenho e o incremento em altura, diâmetro (DAP) e o volume das árvores [n=80].

| Variáveis | Incremento anual | | | Incremento corrente anual | | |
|-----------|------------------|-------|--------|---------------------------|-------|--------|
| | altura | DAP | volume | altura | DAP | volume |
| N | 0,09 | 0,04 | 0,28 | -0,14 | -0,09 | 0,12 |
| P | -0,21 | -0,39 | -0,36 | -0,23 | -0,22 | -0,56 |
| K | 0,21 | 0,12 | 0,36 | -0,23 | -0,16 | 0,18 |
| Ca | -0,69 | -0,68 | -0,62 | 0,28 | 0,23 | -0,60 |
| Mg | -0,79 | -0,81 | -0,70 | 0,38 | 0,30 | -0,68 |
| B | -0,08 | 0,07 | 0,15 | 0,24 | 0,24 | 0,33 |
| Fe | -0,22 | -0,04 | 0,04 | 0,41 | 0,38 | 0,28 |
| Mn | -0,55 | -0,44 | -0,43 | 0,48 | 0,40 | -0,23 |
| Zn | -0,32 | -0,21 | -0,03 | 0,32 | 0,40 | 0,04 |

P<0,01 para valores de |r|>0,29

O N constitui-se em um nutriente mineral de elevada importância pelas funções fisiológicas vitais exercidas nos vegetais, participando, essencialmente, da formação dos compostos orgânicos essenciais, como as proteínas e os nucleotídeos, além da notável influência sobre o crescimento vegetativo. Pelas suas funções, é altamente móvel no interior das plantas, translocando-se sempre

para as regiões de maior atividade fisiológica. Essa característica do N indica que a sua baixa concentração nos anéis de crescimento relaciona-se às moléculas ou compostos orgânicos existentes no lenho das árvores de *Pinus taeda*. Devido a isso, não foram observadas correlações dos teores de N com o incremento em altura e diâmetro das árvores, assim como, com a densidade específica do lenho e as dimensões dos traqueídeos (Tabelas 2 e 3).

O K, de uma maneira geral, não apresentou correlação significativa entre as variáveis estudadas. As poucas correlações significativas observadas (Tabelas 1 e 3) foram fracas e não apresentaram uma tendência definida. Embora não tenham sido observadas correlações, deve-se mencionar sua importância no crescimento das plantas de *Pinus* (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2000, FERREIRA et al., 2001) principalmente devido a sua mobilidade e sua função como co-fator nas reações enzimáticas. Além disso, pela sua baixa afinidade na formação de ligações orgânicas e pelas altas concentrações no simplasto das células, o K é importante no processo osmótico de manutenção da abertura do câmbio (BAUCH, 1993, citado por DÜNISCH, 1993). Outra importante atividade do K⁺ é seu envolvimento direto no transporte de sintetizados da fotossíntese através do floema.

Tabela 2. Coeficiente de correlação (r) entre os teores de nutrientes no lenho e a densidade específica da madeira [n=80]

O P não apresentou, a exemplo do N, correlação

plantas, desempenhando as funções relacionadas com os componentes estruturais (ácido nucléico, açúcares fosfatados e coenzimas) e na formação das moléculas energéticas (ADP e ATP) das células (KIND; WOEBER, 1975), sendo detectado nos tecidos das plantas com intensa atividade fisiológica. Desta forma, os tecidos lenhosos com função de sustentação e de transporte ascendente de seiva mineral não se constituem em regiões de atividade fisiológica de síntese e de formação de novos tecidos (ex.: tecidos meristemáticos), apresentando teores muito baixos de P – não sendo detectados pelos métodos aplicados em algumas análises – e não correlacionados com parâmetros dendrométricos e físico-anatômicos do lenho. A única correlação significativa (teor de P x volume corrente anual) apresenta apenas uma tendência negativa, com uma dispersão acentuada dos dados, o que permite interpretar como uma relação sem importância fisiológica entre estas variáveis (Tabela 1).

Dentre os micronutrientes, o B e o Zn não mostraram, de forma geral, correlação significativa com as variáveis estudadas: o B é importante no metabolismo de açúcares (MENGEL; KIRKBY, 1987; MARSCHNER, 1995) e com este formam complexos fracos. Mesmo que no metabolismo de açúcares o B seja secundário, a união dos dois elementos demonstra sua associação pela colineariedade (MARSCHNER, 1995). O Zn é constituinte e ativador de uma série de enzimas, sendo essencial na síntese do triptofano, precursor das auxinas (EPSTEIN, 1975). O Zn e o Cu interagem com N na formação das proteínas (JACKSON et al., 1978, citado por MENGEL; KIRKBY, 1987), com as folhas contendo altas concentrações de dismutase superoxidase (proteína com dois átomos de Zn e Cu) encontrada nos cloroplastos (90 % do seu teor), explicando a inexistência de correlação com os tecidos do lenho.

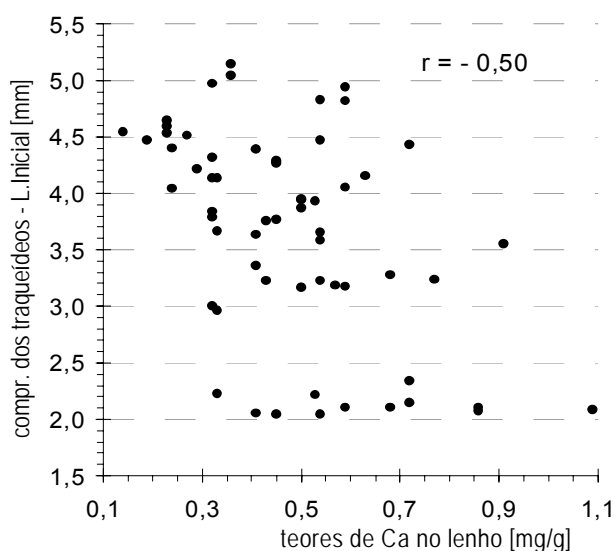
O Ca apresentou correlação significativa com o diâmetro das árvores, (Tabela 1), com a densidade média e máxima nos anéis de crescimento do lenho tardio (Tabela 2) e com o comprimento dos traqueídeos no lenho inicial e tardio (Tabela 3 e Figura 2), mostrando em todas elas uma tendência negativa, embora não estreita. Conforme a Figura 2, para qualquer comprimento de fibra, as variações nos teores de Ca são acentuadas, atingindo, para o comprimento de 2,2 mm, teores de Ca variando entre 0,33 mg/g a 1,09 mg/g de matéria seca.

significativa em relação ao crescimento das árvores, densidade do lenho e dimensões dos traqueídeos. Este nutriente é, também, bastante móvel no interior das

Tabela 3. Coeficiente de correlação (r) entre os teores de nutrientes no lenho e as dimensões dos traquéides [n=60].

| variáveis | traquéides | | | | | | | |
|-----------|---------------|---------------|----------------|----------------|--------------|---------------|----------------|----------------|
| | lenho inicial | | | | lenho tardio | | | |
| | comprimento | largura fibra | diâmetro lúmen | espess. parede | comprimento | largura fibra | diâmetro lúmen | espess. parede |
| N | 0,24 | 0,15 | 0,16 | -0,09 | 0,25 | 0,20 | 0,17 | 0,03 |
| P | 0,23 | -0,03 | -0,07 | 0,16 | 0,17 | 0,37 | 0,08 | 0,22 |
| K | 0,34 | 0,15 | 0,15 | -0,02 | 0,35 | 0,03 | -0,11 | 0,10 |
| Ca | -0,50 | -0,02 | 0,00 | -0,09 | -0,48 | 0,01 | 0,38 | -0,27 |
| Mg | -0,41 | -0,12 | -0,08 | -0,12 | -0,41 | 0,10 | 0,53 | -0,32 |
| B | -0,22 | 0,07 | 0,03 | 0,10 | -0,26 | 0,00 | 0,09 | -0,07 |
| Fe | -0,19 | 0,00 | -0,02 | 0,07 | -0,20 | -0,01 | 0,08 | -0,07 |
| Mn | -0,50 | -0,08 | -0,05 | -0,08 | -0,49 | -0,23 | 0,24 | -0,36 |
| Zn | -0,17 | 0,09 | 0,11 | -0,11 | -0,15 | -0,27 | 0,05 | -0,24 |

P<0,01 para valores de |r|>0,33

**Figura 2.** Correlação entre os teores de Ca nos anéis de crescimento e o comprimento dos traquéides no lenho inicial das árvores.

Entre os teores de Ca no lenho e o incremento anual em altura também foi observada correlação negativa significativa, embora fraca, o que permite considerar como válidas as mesmas observações anteriores. Entretanto, isolando e analisando os dados por sítio, os resultados mostram uma estreita e significativa correlação entre Ca no lenho e incremento em altura (Figura 3).

Os resultados observados na Figura 3, avaliados em

conjunto com a análise do solo nestes sítios (Tabela 4), mostram a influência da granulometria e da matéria orgânica. Quanto maior o teor de matéria orgânica no solo, maior é a quantidade de Ca retido formando complexos com o húmus, assim como, solos com mais teores de argila possuem maior quantidade de cargas negativas e, portanto, maior retenção de Ca na forma trocável (AMBERGER, 1988). Estas situações podem ter contribuído para uma absorção diferenciada de Ca entre as árvores dos sítios T3 e T4.

Outra observação importante relaciona-se ao coeficiente angular das equações obtidas entre os teores de Ca no lenho e o incremento em altura (Figura 3). Para os sítios T1 e T2, com mesmas características físicas e químicas, o coeficiente angular foi muito próximo, variando apenas devido à pequena variação entre os teores de Ca trocável no solo. Para os sítios T3 e T4, além de alta variação entre os teores de Ca no lenho, também ocorreu uma variação bastante acentuada entre os coeficientes angulares. Estas variações mostram que os sítios T1, T2 e T4 apresentam teores de Ca no lenho muito similares durante o crescimento, indicando uma variação de 0,3 mg Ca/g até 0,8 mg Ca/g de matéria seca, enquanto o sítio T3, uma variação mais ampla (de 0,3 mg Ca/g até 1,4 mg Ca/g de matéria seca). Estes resultados, associados às funções principais do Ca de estabilizar a membrana celular, na forma de Ca^{++} estrutural ligado as protopectinas na parede celular (KLEINING; SITTE, 1986), a forte dependência de Ca

no processo de formação da lignina (WESTERMARK, 1982), e a sua imobilidade no interior das plantas (MENGEL; KIRKBY, 1987) sugerem que: i) os teores de Ca no lenho diminuem com a idade das árvores; ii) durante o crescimento das árvores o solo apresenta uma oferta de Ca inferior a suas necessidades. Com isto, pode-se afirmar que quanto maior o crescimento das árvores, menores são os teores de Ca, o que indica um típico efeito de diluição.

O Mg apresentou correlação significativa com o incremento em altura e diâmetro das árvores, densidade

do lenho e com o comprimento dos traqueídeos (Tabelas 1-3): o incremento anual mostrou as maiores correlações negativas ocorrendo uma diminuição nos teores de Mg nos anéis de crescimento com o aumento da idade das árvores (Figura 4). A exemplo do Ca, as maiores concentrações do Mg foram detectadas no início do crescimento das árvores e, desta forma, são aplicadas as mesmas considerações relacionadas com a oferta do elemento químico no solo. Resultados semelhantes foram obtidos por Kenk e Unfried (1984) estudando a influência da oferta de Mg no solo e sua presença nos anéis de crescimento das árvores de *Picea abies*.

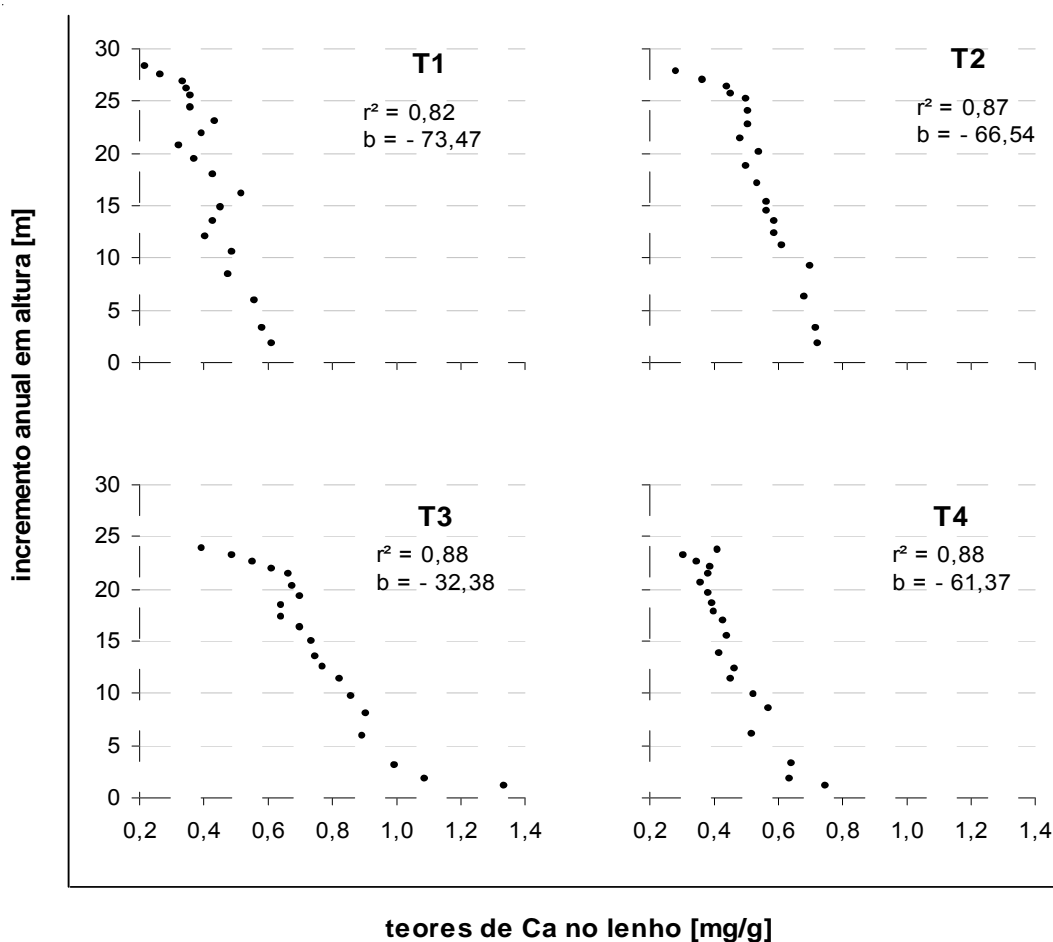


Figura 3. Correlação (r^2) e coeficiente angular (b), entre os teores de Ca nos anéis de crescimento e o incremento anual em altura das árvores, nos diferentes sítios.

Tabela 4. Análise química e física dos solos das áreas estudadas (média de quatro repetições).

| Sitio | M.O. | Ca | granulometria [%] | | |
|-------|--------------------|------------------------|-------------------|-------|--------|
| | g dm ⁻³ | cmolc dm ⁻³ | areia | silte | argila |
| T1 | 36,9 | 0,49 | 49 | 12 | 39 |
| T2 | 37,0 | 0,58 | 44 | 14 | 44 |
| T3 | 28,3 | 0,67 | 66 | 14 | 20 |
| T4 | 47,4 | 0,77 | 9 | 36 | 55 |

Verificou-se leve tendência no aumento dos teores de Mg no lenho com a diminuição da densidade média nos anéis de crescimento (Figura 5); para o diâmetro do lúmen dos traqueídeos, a correlação foi significativa embora com os dados dispersos e sem mostrar tendência. A exemplo dos resultados anteriores, este fato também pode estar ligado com a função desempenhada pelo Mg nas plantas, isto é, participação ativa no processo de fotossíntese (MARSCHNER, 1995).

Para o Fe e o Mn ocorreram algumas correlações significativas, no entanto, com valores dispersos e sem tendência definida (Figuras 6-7). Nos solos estudados, o Fe é o micronutriente catiônico mais abundante e um de seus principais constituintes (EMBRAPA, 1999), atuando em inúmeros processos fisiológicos nas plantas como constituintes fixos e participando da composição de algumas proteínas e de enzimas das mitocôndrias com papel no transporte eletrônico, (MARSCHNER, 1995). O Mn encontra-se em teores altos nos solos ácidos das plantações estudadas, podendo chegar, em algumas situações, a atingir níveis tóxicos para as plantas (QUADROS, 1996). Nas plantas, sua função é ativar enzimas envolvidas no ciclo de Krebs.

Como as árvores absorvem passivamente quantidades de Fe e Mn, maiores do que suas necessidades, é possível que parte destes nutrientes permaneça acumulada nos tecidos de baixa atividade, o que contribuiu para que ocorressem as correlações significativas observadas para esses nutrientes. Possivelmente as correlações observadas são devidas à existência de compostos orgânicos contendo Fe e Mn nos tecidos do lenho havendo, no entanto, necessidade de estudos específicos para comprovar esses resultados face a carência de informações na literatura especializada.

Do ponto de vista nutricional, os teores de Mn

encontram-se dentro da faixa nutricional considerada adequada (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2000), não sendo limitantes ao crescimento das árvores. As árvores com menores taxas de crescimento apresentam menor quantidade de compostos orgânicos, necessitando menores quantidades de Mn para o seu metabolismo. Estes fatos associados com a média mobilidade do Mn no interior das plantas (EPSTEIN, 1975) fazem com que a sua translocação para as regiões de grande atividade fisiológica seja proporcional à atividade: menores quantidades são translocadas nas árvores de menor crescimento, tendo-se maiores teores nas regiões das plantas de menor atividade, ou seja, nos tecidos do lenho do tronco. Assim, caso o Mn não seja componente de compostos orgânicos fixados no lenho, pode-se explicar as correlações negativas deste nutriente com o crescimento, a densidade do lenho e as dimensões dos traqueídeos.

A análise de regressão múltipla entre as variáveis estudadas, realizadas com o objetivo de identificar as maiores correlações entre nutrientes minerais e o crescimento das árvores, a densidade do lenho e as dimensões dos traqueídeos mostrou relação entre os teores de Mg e de Mn e o incremento anual em altura do tronco (Figura 8, Tabela 5). O Mn apresenta uma maior relação com o crescimento, sendo que no seu menor teor (21 mg/kg) e com os teores de Mg diminuindo de 0,35-0,11 mg/g, as árvores de *Pinus* crescem de 8,4-34 m de altura, demonstrando que o Mn guarda a maior relação com o crescimento das árvores, seguido do Mg. Os resultados mostram, também, que o Ca, Mg e Mn são de forma geral os que apresentaram correlações significativas com as variáveis estudadas.

Para o Mg, considera-se que, embora as árvores estejam bem nutridas com este elemento (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2000), é possível que os seus teores estejam próximos ao nível de deficiência latente. Com isso, e pela sua alta mobilidade, as árvores com maiores taxas de crescimento necessitam de maiores quantidades de Mg nas regiões de maior atividade fisiológica (meristemas). Estas observações são da mesma forma válidas para as correlações com a densidade do lenho e dimensões dos traqueídeos. O Ca, como componente da lamela média e parede celular dos traqueídeos (na forma de pectatos), afeta as propriedades mecânicas do lenho (EPSTEIN, 1975), presumindo-se que estas funções são relacionadas com as correlações observadas com a densidade do lenho e as dimensões dos traqueídeos.

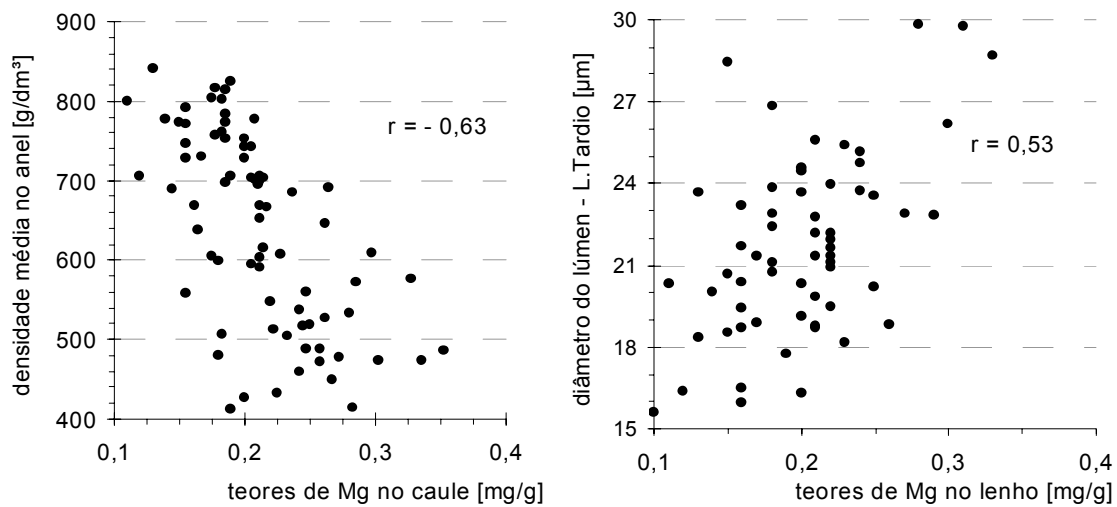


Figura 4. Correlação entre os teores de Mg nos anéis de crescimento e o incremento anual em altura e diâmetro das árvores.

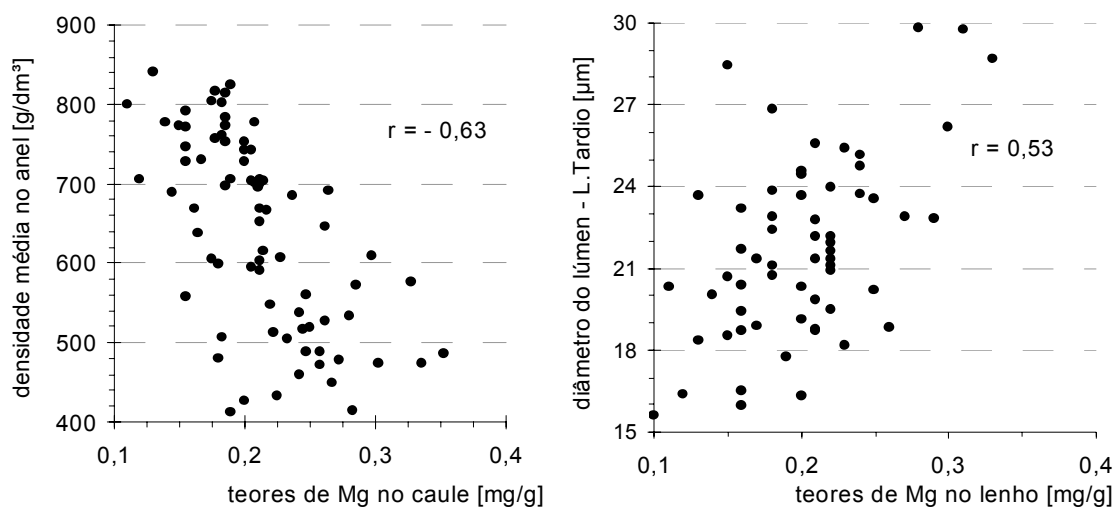


Figura 5. Correlação entre os teores de Mg nos anéis de crescimento com a densidade média nos anéis e com o diâmetro do lúmen no lenho tardio das árvores.

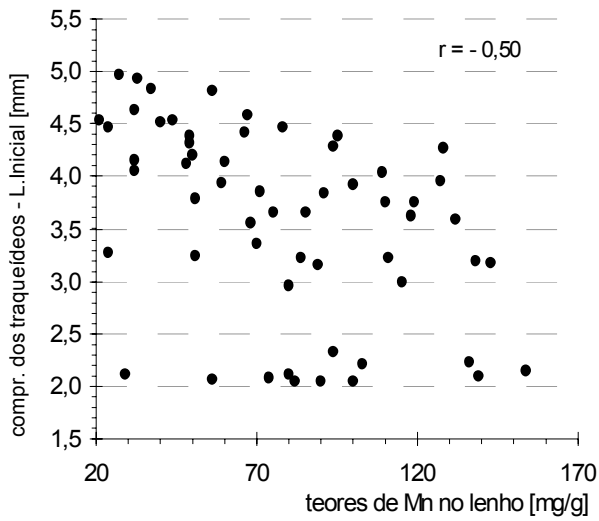


Figura 6. Correlação entre os teores de Mn nos anéis de crescimento com o comprimento dos traqueídeos no lenho inicial.

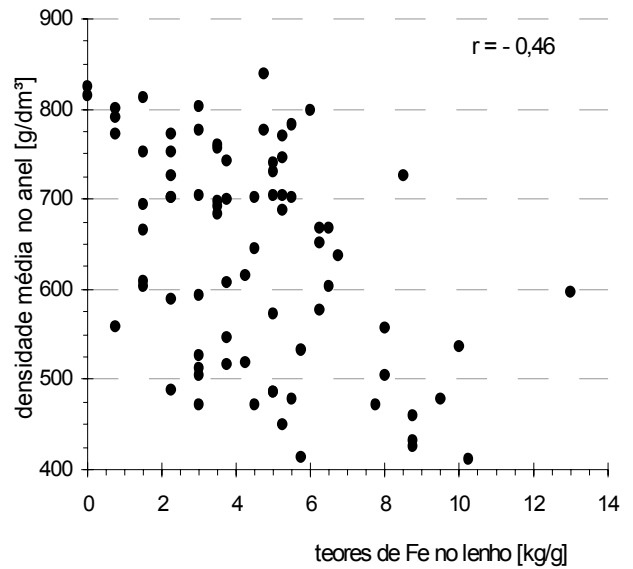


Figura 7. Correlação entre os teores de Fe nos anéis de crescimento com a densidade média nos anéis de crescimento das árvores.

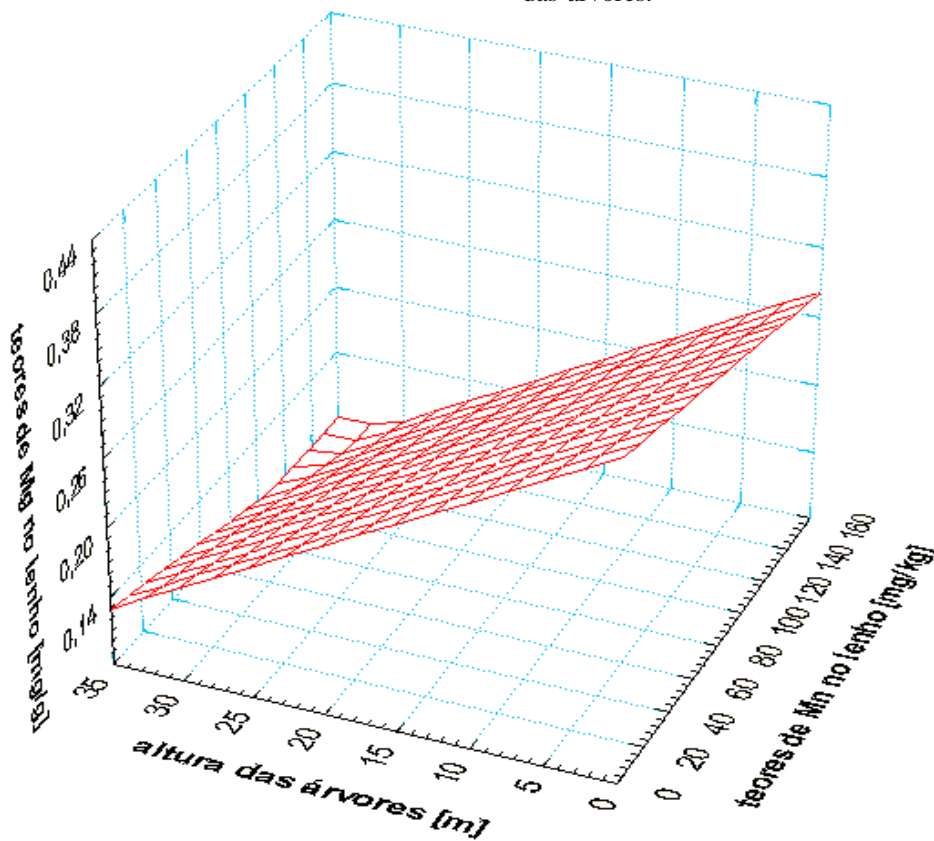


Figura 8. Relação entre a altura das árvores e os teores de Mg e Mn, dos anéis de crescimento das árvores de *Pinus taeda*.

Tabela 5. Resultados da análise de regressão múltipla.

| dependente | independente | valor | erro | valor t | prob> t |
|--|--------------|-----------|-------|----------|---------|
| incremento anual em altura das árvores | Mg | - 100,046 | 8,466 | - 11,817 | <0,0001 |
| | Mn | - 0,098 | 0,016 | - 6,175 | <0,0001 |
| | constante | 45,481 | 1,992 | 22,824 | |

Equação de Regressão:

$$\text{Altura [m]} = [- 100,046 * \text{Mg}] + [- 0,098 * \text{Mn}] + 45,481$$

R = 0,866

F = 116,089

F [77;2 p<0,001]=4,92

Conclusões

Os resultados do presente trabalho permitem concluir que os teores de Mg e de Mn no lenho, dos nutrientes minerais estudados, são os que mais interferem no crescimento das árvores de *Pinus*.

A concentração de N, P, K e B no lenho das árvores de *Pinus* não mostra correlação com o crescimento das árvores, densidade da madeira e dimensões dos traqueídeos.

O Ca, Mg e o Mn apresentam correlação negativa com a densidade do lenho e as dimensões dos traqueídeos.

Para uma melhor compreensão dos processos fisiológicos e alterações na qualidade da madeira, sugere-se a aplicação da técnica da dendronutrição em sítios com diferentes níveis de fertilidade ou a condução de experimentos de adubação mineral.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo apoio financeiro e a Inpacel Indústrias de Papel Arapotí Ltda (Inpacel), na pessoa do Eng. Ftal Fernando Gomes pela concessão das área para a experimentação e apoio na coleta das amostras.

Referências

AMARAL, A. C. B. **Implantação da metodologia de densitometria de raios x em madeira**. 1994. 143 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba.

AMARAL, A. C. B.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* L. segundo a microdensitometria de raios X. **Revista de Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v.6, n. 11/12, p. 17-23, 1998.

AMBERGER, A. **Pflanzenernährung**. Stuttgart: Eugen Ulmer GmbH, 1988. 264 p.

CARVALHO, A. P. de; MENEGOL, O.; OLIVEIRA, E. B. de; MACHADO, S. A.; POTTER, R. O.; FASOLO, P. J.; FERREIRA, C. A.; BARTOZESCK, A. Efeitos de características do solo sobre a capacidade produtiva de *Pinus taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 39, p. 51-66, jul./dez. 1999.

CHAGAS, M. P.; TOMAZELLO FILHO, M.; LISI, C. S.; BRITO, J. O.; SCOLFORO, J. R. Tree-ring characterization and wood density of candeia, *Eremanthus erithropapus* trees by X-ray densitometry. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, 2005, Santos. **Resumos**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Energia Nuclear, 2005. 1 CD-ROM. INAC 2005.

CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p.

DEDECEK, R. A.; MENEGOL, O.; BELLOTE, A. F. J. Avaliação da compactação do solo em plantios jovens de *Pinus taeda*, com diferentes sistemas de preparo do solo. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 40, p. 5-21, jan./jun. 2000.

DÜNISCH, O. **Über die Bedeutung der elementversorgung von Fichten (*Picea abies*) fuer die Holzbildung**. 1993. 204 p. Tese (Doutorado em Biologia) - Universidade de Hamburgo, Hamburgo.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

EPSTEIN, E. **Nutrição mineral de plantas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos; São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo. 1975. 344 p.

- FENNER, P. T. **Relações entre tráfego, solo e desenvolvimento florestal na colheita de madeira**. 1999. 135 f. Tese (Livre Docência) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D. da; REISSMANN, C. B.; BELLOTE, A. F. J.; MARQUES, R. **Nutrição de *Pinus* no sul do Brasil**. diagnóstico e prioridades de pesquisa. Colombo: Embrapa Florestas, 2001. 23 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 60).
- FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1992. 269 p.
- JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique**. New York: MacGraw-Hill Book, 1940. 533 p.
- KENK, G.; UNFRIED, P. Duengung zur Minderung der neuartigen Waldschaeden – Auswertungen eines alten Duengungsversuchs zu Fichte im Buntsandstein-Odenwald. **Forstwissenschaftliches Centralblatt**, v. 103, p. 307-320, 1984.
- KIND, H.; WOEBER, G. **Biochemie der Pflanzen**. Berlin: Springer-Verlag, 1975. 364 p.
- KLEINING, H.; SITTE, P. **Zellbiologie**. Stuttgart: Gustav Fisher Verlag, 1986. 528 p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd. ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 4th. ed. Bern: IPI, 1987. 686 p.
- QUADROS, R. M. B. **Avaliação nutricional em plantios de *Eucalyptus grandis*, em diferentes solos, no Estado de São Paulo**. 1996. 158 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- RAB, M. A. Changes in physical properties of a soil associated with logging of *Eucalyptus regnans* forest in southern Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 70, n. 13, p. 215-229, 1994.
- REIS, M. G. F.; BARROS, N. F.; KIMMINS, J. P. Acúmulo de nutrientes em uma seqüência de idade de *Eucalyptus grandis*, plantado no Cerrado, em duas áreas com diferentes produtividades, em Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 11, p. 1-15, 1987.
- REISSMANN, C. B.; WISNIEWSKI, C. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 135-166.
- RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R. A.; MATOS, J. L. M. Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft. **Revista Árvore**, v. 28, n. 2, p. 267-273, 2004.
- RODRIGUES, C. M. **Efeito da aplicação de resíduo da indústria de papel e celulose nos atributos do solo, na nutrição e biomassa do *Pinus taeda* L.** 2004. 112 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- SASS, J. E. **Botanical microtechnique**. 2nd. ed. Iowa: State College Press, 1951. 228 p.
- SILVA, H. D. da; BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A.; GOMES, F. dos S. Adubação mineral e seus efeitos na produção de biomassa em árvores de *Pinus taeda* L. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 8., 2003, São Paulo. **Benefícios, produtos e serviços da floresta: oportunidades e desafios do século XXI**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura: Sociedade Brasileira de Engenheiros Florestais, 2003. 1 CD-ROM.
- VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V.; STORCK, L.; WITSCHORECK, R. Crescimento inicial de *Pinus taeda* L. relacionado a doses de N, P, K. **Revista Ciência Florestal**, v. 15, n. 1, p. 1-7, 2005.
- WESTERMARK, U. Calcium promoted phenolic coupling by superoxide radical: a possible lignification reaction in wood. **Wood Science and Technology**, v. 16, p. 71-78, 1982.