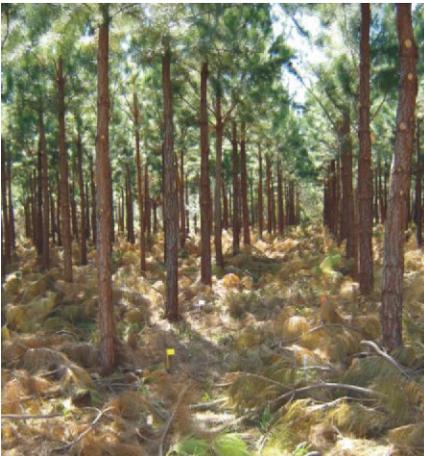


## Influência dos Nutrientes Minerais e do Solo sobre a Produtividade, a Estrutura Anatômica e a Densidade da Madeira de *Pinus taeda*



## **República Federativa do Brasil**

*Luiz Inácio Lula da Silva*

Presidente

## **Ministério da Agricultura e do Abastecimento**

*Roberto Rodrigues*

Ministro

## **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa**

### **Conselho de Administração**

*Luiz Carlos Guedes Pinto*

Presidente

*Silvio Crestana*

Vice-Presidente

*Alexandre Kalil Pires*

*Ernesto Paterniani*

*Hélio Tollini*

*Marcelo Barbosa Saintive*

Membros

### **Diretoria Executiva da Embrapa**

*Silvio Crestana*

Diretor-Presidente

*José Geraldo Eugênio de França*

*Kepler Euclides Filho*

*Tatiana Deane de Abreu Sá*

Diretores-Executivos

### **Embrapa Florestas**

*Moacir José Sales Medrado*

Chefe-Geral

*Miguel Haliski*

Chefe-Adjunto de Administração

*Sergio Gaiad*

Chefe-Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento

*Antonio Maciel Botelho Machado*

Chefe-Adjunto de Comunicação, Negócios e Apoio



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Florestas  
Ministério da Agricultura e do Abastecimento

ISSN 1679-2599

Dezembro, 2005

# **Documentos 58**

## **Influência dos Nutrientes Minerais e do Solo sobre a Produtividade, a Estrutura Anatômica e a Densidade da Madeira de *Pinus taeda***

Antonio Francisco Jurado Bellote  
Mario Tomazello Filho  
Renato Antonio Dedecek

Colombo, PR  
2005

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

### **Embrapa Florestas**

Estrada da Ribeira, km 111

Caixa Postal 319

Fone/Fax: (41) 3675-5600

Home page: <http://www.cnpf.embrapa.br>

E-mail (sac): [sac@cnpf.embrapa.br](mailto:sac@cnpf.embrapa.br)

### **Comitê de Publicações da Unidade**

Presidente: Luiz Roberto Graça

Secretária-Executiva: Elisabete Oaida

Membros: Alvaro Figueredo dos Santos, Edilson Batista de Oliveira, Honorino Roque Rodigheri, Ivar Wendling, Maria Augusta Doetzer Rosot, Patrícia Póvoa de Mattos, Sandra Bos Mikich, Sérgio Ahrens

Supervisor editorial: Luiz Roberto Graça

Revisor de texto: Mauro Marcelo Berté

Normalização bibliográfica: Elizabeth Denise Câmara Trevisan, Lidia Woronkoff

Editoração eletrônica: Luciane Cristine Jaques

### **1ª edição**

1ª impressão (2005): sob demanda

### **Todos os direitos reservados.**

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação - CIP  
*Embrapa Florestas*

---

Bellote, Antonio Francisco Jurado.

Influência dos nutrientes minerais e do solo sobre a produtividade, a estrutura anatômica e a densidade da madeira de *Pinus taeda* / Antonio Francisco Jurado Bellote, Mario Tomazello Filho, Renato Antonio Dedecek. - Colombo : Embrapa Florestas, 2005.

94 p. - (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1517-536X ; 121)

ISSN 1679-2599 (CD-ROM)

1. *Pinus taeda* - Produtividade. 2. *Pinus taeda* - Madeira - Qualidade. 3. Nutrição florestal. I. Bellote, Antonio Francisco Jurado. II. Tomazello Filho, Mario. III. Dedecek, Renato. IV. Título. V. Série.

---

CDD 634.9751 (21. ed.)

© Embrapa 2005

# **Autores**

**Antonio Francisco Jurado Bellote**

Engenheiro-Agrônomo, Ph.D.

Pesquisador III - *Embrapa Florestas*

e-mail: bellote@cnpf.embrapa.br

**Renato Antonio Dedecek**

Engenheiro-Agrônomo, Ph.D.

Pesquisador III - *Embrapa Florestas*

e-mail: dedecek@cnpf.embrapa.br

**Mario Tomazello Filho**

Engenheiro-Agrônomo, Ph.D.

Professor Livre-Docente - Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo

e-mail: mtomazel@esalq.usp.br

# Apresentação

As atividades de reflorestamento com espécies do gênero *Pinus*, no País, foram intensificadas a partir da segunda metade da década de 60 após a promulgação da lei dos incentivos fiscais. Extensas áreas foram ocupadas, constituindo hoje base de importantes atividades industriais como produção de celulose e papel, embalagens, aglomerados, mobiliário, compensados, chapas, dentre outras. Evidentemente que uma área de tal dimensão engloba uma variação muito grande de solos e climas, trazendo como consequência acentuadas diferenças de produtividade.

Um dos problemas enfrentados atualmente pela pesquisa é a falta de informações multidisciplinares de pesquisa, onde se associam diferentes áreas do conhecimento para interpretações de produtividade tanto quantitativas quanto qualitativas. Esse trabalho, desenvolvido em parceria entre a *Embrapa Florestas* e o Laboratório de Anéis de Crescimento do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP, envolve conhecimentos nas áreas de Solos, Nutrição Florestal e Tecnologia da Madeira. Essa interação de áreas, denominada de Dendronutrição, permite entender estas relações e com isso identificar, para cada ano do crescimento das árvores, os fatores de solo e de nutrição que estão diretamente relacionados com a produção qualitativa e quantitativa de madeira.

Os resultados gerados neste trabalho permitem entender essas relações, identificar esses fatores e, com isso, selecionar sítios de acordo com o tipo de madeira que se propõe a produzir, corrigindo algumas propriedades físicas e químicas do solo, que se mostrem inadequados, para as árvores, e que possam ser alteradas através de práticas silviculturais adequadas.

Sergio Gaiad  
Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento  
*Embrapa Florestas*

# Sumário

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introdução</b>   | <b>9</b>  |
| <b>2. Revisão de literatura</b>  | <b>10</b> |
| 2.1. Situação atual  | 12        |
| 2.2. Produção de biomassa florestal  | 15        |
| 2.3. Acúmulo de nutrientes minerais nas árvores  | 16        |
| <b>3. Localização e caracterização das áreas experimentais</b>   | <b>18</b> |
| 3.1. Localização geográfica  | 18        |
| 3.2. Clima   | 20        |
| 3.3. Solos   | 22        |
| 3.3.1. Latossolos  | 22        |
| 3.3.2. Cambissolos   | 22        |
| <b>4. Materiais e métodos</b>  | <b>23</b> |
| 4.1. Seleção e amostragem das árvores  | 23        |
| 4.1.1. Análise de tronco   | 24        |
| 4.1.2. Cálculo do volume e do peso total das árvores   | 24        |
| 4.1.3. Análises nutricionais das amostras  | 24        |
| 4.1.4. Caracterização do lenho   | 26        |
| 4.1.4.1. Variação radial da densidade por densitometria de raios X                                       | 26        |
| 4.1.4.2. Variação radial das dimensões dos traqueídeos   | 27        |
| 4.2. Amostragem do solo  | 27        |
| 4.2.1. Análise química do solo   | 27        |
| 4.2.2. Análise física do solo  | 29        |
| 4.2.2.1. Granulometria   | 29        |
| 4.2.2.2. Densidade, porosidade e água disponível do solo   | 29        |
| 4.2.2.3. Resistência do solo à penetração das raízes   | 29        |
| <b>5. Resultados e discussão</b>   | <b>30</b> |
| 5.1. Crescimento e produtividades dos plantios estudados   | 30        |
| 5.1.1. Atributos físicos e químicos dos solos das áreas estudadas  | 30        |
| 5.1.2. Estado nutricional das árvores  | 35        |
| 5.1.3. Incremento anual em altura e diâmetro das árvores   | 37        |
| 5.1.4. Produtividade das árvores   | 38        |
| 5.1.5. Correlações entre produtividade, nutrientes minerais e atributos dos solos                        | 43        |
| 5.1.6. Regressão múltipla entre a produtividade, os nutrientes minerais e os atributos dos solos         | 47        |
| 5.2. Estrutura anatômica e densidade da madeira produzida  | 51        |
| 5.2.1. Incremento em diâmetro  | 51        |
| 5.2.2. Densidade específica da madeira   | 54        |
| 5.2.3. Características morfológicas dos traqueídeos  | 60        |
| 5.2.4. Correlação entre o crescimento das árvores, a densidade da madeira e as dimensões dos traqueídeos | 64        |
| 5.3. Dendronutrição  | 70        |
| 5.3.1. Correlações entre o crescimento das árvores e os nutrientes minerais no lenho                     | 70        |
| <b>6. Conclusões</b>   | <b>81</b> |
| <b>7. Referências bibliográficas</b>   | <b>83</b> |

# Influência dos Nutrientes Minerais e do Solo sobre a Produtividade, a Estrutura Anatômica e a Densidade da Madeira de *Pinus taeda*

---

*Antonio Francisco Jurado Bellote*

*Mario Tomazello Filho*

*Renato Antonio Dedecek*

## 1. Introdução

Os plantios de florestas de produção no Brasil localizam-se, com raras exceções, em solos ácidos, pobres em nutrientes minerais, distróficos e com baixa capacidade de retenção de água. São considerados solos de baixa fertilidade mesmo para a atividade florestal. Por muitas décadas, a atividade florestal conviveu com produções relativamente baixas nestes sítios. Além disso, a rápida taxa de crescimento dessas espécies, associada ao uso do solo, na maioria das vezes, de baixa fertilidade natural, impõe elevada demanda sobre os recursos do solo em curtos períodos, especialmente da água e nutrientes minerais. Isto tem levantado a questão da sustentabilidade desses sistemas, quando intensivamente manejados.

Dentro deste enfoque, o conhecimento das quantidades de nutrientes presentes no solo e na biomassa aérea é de fundamental importância para o entendimento da relação solo e planta. Soma-se a isto as exigências nutricionais da espécie utilizada, avaliações da extração, acumulação e exportação de nutrientes pela colheita florestal.

Com recursos escassos e alta competitividade existente, as práticas silviculturais devem ser dirigidas no sentido de elevar e manter a produtividade desses solos. Para isso, uma alternativa é o uso de fertilizantes minerais. Entretanto, não basta apenas adubar. A pesquisa mostra claramente que, para a indicação correta da adubação, deve-se, principalmente: conhecer as

exigências nutricionais das árvores; oferecer os nutrientes certos na quantidade adequada e ainda aplicá-los na época em que são exigidos pelas árvores.

Com relação ao efeito dos nutrientes na qualidade da madeira, alguns trabalhos conduzidos mostram a influência dos nutrientes no tamanho dos anéis de crescimento e na densidade da madeira. Neste enfoque, o importante é a produtividade e a qualidade da madeira produzida, e como essas variáveis são influenciadas pelos atributos do solo e pela nutrição das árvores. Aqui, estes conhecimentos são denominados de Dendronutrição.

A Dendronutrição pode ser considerada um sub-ramo da Dendroquímica. Ela é uma ferramenta que permite entender essa relação e, com isso, identificar fatores do solo que interferem diretamente na produção e na qualidade da madeira. Esta técnica é o resultado da identificação dos anéis de crescimento anuais do lenho das árvores e sua associação com os fatores nutricionais do solo e das árvores. Pode, ainda, orientar a seleção de sítios face à qualidade da madeira produzida e correlacionar as propriedades físico-químicas do solo com o crescimento das árvores, proporcionando a aplicação de práticas silviculturais corretivas para a manutenção da sustentabilidade das plantações.

Assim, o trabalho tem como objetivo avaliar o efeito dos atributos do solo e dos nutrientes minerais absorvidos pelas árvores, na produtividade e na qualidade da madeira de *Pinus taeda*, plantadas em diferentes tipos de solo. Para isto, foram considerados os nutrientes minerais, tanto os macros como os micronutrientes, e como a oferta desses nutrientes, nos diferentes solos, contribuem para o aumento da produtividade e da qualidade da madeira.

## 2. Revisão de Literatura

As atividades de reflorestamento no Brasil foram intensificadas a partir da promulgação da lei dos incentivos fiscais em 1968. Extensas áreas foram ocupadas predominantemente com espécies de *Eucalyptus* e *Pinus*. O gênero *Pinus* tornou-se economicamente importante para o Brasil, devido a sua alta produtividade em um período relativamente curto, quando comparado com espécies florestais nativas. Atualmente, a quase totalidade da madeira dos plantios existentes é usada como matéria prima na fabricação de papel, celulose, chapas e placas de madeira e móveis.

De acordo com a Sociedade Brasileira de Silvicultura (2000), existem no país aproximadamente 4,8 milhões de hectares de florestas plantadas com várias

espécies desses gêneros. Deste total, 1,8 milhão de ha são plantados com *Pinus*. Mais da metade destas áreas estão localizadas na Região Sul, seguida pela Região Sudeste com cerca de 20% e demais regiões com 22%. Entre as espécies utilizadas, destaca-se *Pinus taeda* e, em menor escala, *Pinus elliottii* e *Pinus caribea*.

Vultosos investimentos em pesquisa têm sido empregados com a finalidade de desenvolver sistemas de produção sustentáveis de alimentos e fibras, principalmente nos países industrializados. Deve-se ainda salientar que o Brasil precisa enfrentar a crescente concorrência internacional no que concerne à qualidade dos produtos produzidos, nas barreiras não tarifárias que, em muitos casos, exigem a certificação de origem da matéria prima florestal, e, ainda nos processos envolvidos na produção dos diversos bens de base florestal exportados.

Um dos grandes problemas enfrentados atualmente, pelo Setor Florestal Brasileiro, é a falta de informações sobre o potencial dos diferentes tipos de solos utilizados ao reflorestamento, para produzir madeira em quantidade e na qualidade exigida pelos diferentes segmentos que demandam madeira. O ambiente é tão importante quanto a espécie utilizada, mas o que deve ser considerado na instalação de plantios é a interação entre ambos. Devido a esta interação, denominada interação genótipo-ambiente, as espécies podem apresentar comportamentos diferentes, quando plantadas em ambientes distintos.

Do ponto de vista de produção e de qualidade da madeira produzida, é importante saber como e de que forma as plantas se desenvolvem, acumulando biomassa de lenho. O conhecimento dessa acumulação e a influência que os nutrientes minerais exercem são fundamentais para que possam ser definidos quais os melhores tipos de solos que devem ser utilizados para produção, ou quais os nutrientes que são necessários para que a planta produza madeira na quantidade e qualidade esperadas.

Estes conhecimentos possibilitam estimar as reais necessidades nutricionais das plantas, as quantidades extraídas e acumuladas no lenho durante o ciclo e que são exportadas pela colheita e, conseqüentemente, orientar práticas silviculturais e de nutrição que mantenham a produtividade do sítio (BEVEGE, 1981; MAIA et al., 1998).

O solo, por sua vez, é a característica do ambiente que mais influencia o crescimento das plantas, as ofertas de nutrientes minerais e a qualidade dos produtos que são gerados. Entre os atributos do solo, aqueles relacionados aos

aspectos físicos e químicos são os que efetivamente interferem qualitativamente.

A oportunidade de gerar tecnologia que permita entender esta relação e, com isso, identificar os fatores do solo que estão diretamente interferindo na produção e na qualidade, é uma necessidade reclamada pelo setor florestal brasileiro. Isso permite, além da seleção de sítios de acordo com o tipo de madeira que se propõe a produzir, também corrigir possíveis deficiências físicas e ou químicas de determinados sítios que se mostrem inadequadas.

## **2.1. Situação Atual**

A crescente demanda de madeira para os diferentes segmentos de mercado consumidor vem atuando como importante fator de estímulo à busca de matérias primas mais adequadas. Com o aumento da capacidade produtiva do setor industrial e a crescente exigência do mercado consumidor, principalmente o externo, quanto à qualidade da madeira produzida, surge um novo conceito de seleção de sítios para plantios florestais, buscando-se maior homogeneidade da matéria-prima a ser utilizada. No Brasil, a madeira de *Pinus* é um exemplo típico dessa tendência.

A madeira é um material biológico onde a variabilidade constitui uma das características principais, ao contrário da maioria dos materiais de origem não biológica. No sentido lato, é ela que proporciona a grande diversidade da utilização da madeira e torna possível escolher entre as várias espécies aquela que melhor satisfaz as exigências de cada uso final (BIRKLAND, 1990).

O solo, por sua vez, pode influenciar na qualidade da madeira a ser produzida, através de sua interferência na taxa de crescimento dos plantios e no acúmulo de biomassa de lenho, ao longo da rotação.

Uma questão a ser elucidada é se estas interferências, na taxa de crescimento e geradas pelas propriedades físicas e químicas do solo, podem resultar em madeira de baixa qualidade e, conseqüentemente, menor qualidade final da madeira produzida. O resultado ideal seria que estes atributos não interferissem nas propriedades da madeira ou as influenciassem positivamente, resultando em maior rendimento e também em melhor qualidade da madeira produzida. Poucos são os estudos realizados que relacionam diretamente a interferência das propriedades físicas e químicas do solo sobre a produtividade e a qualidade da madeira produzida. O que existe são trabalhos mencionando taxas de

crescimento; efeito da densidade do solo na produtividade (RAB, 1994; FENNER, 1999); umidade do solo (BELLOTE et al., 1980; REIS et al., 1987) e a textura do solo (GONÇALVES et al., 1990; CARVALHO et al., 1999).

A madeira é produzida num ciclo anual por uma camada de tecido regenerativo cambial que se situa interior à casca e envolve completamente o tronco, galhos e raízes da árvore. Desta forma, durante cada estação de crescimento, uma nova camada de tecido lenhoso é sobreposta à madeira existente (COWN, 1974).

As características da madeira, do ponto de vista qualitativo, são resultantes da interação entre o potencial hereditário da árvore e os fatores ambientais. Em relação ao ambiente, a influência de alguns de seus fatores sobre as propriedades da madeira tem sido alvo de muitas avaliações, principalmente em estudos que envolvem massa específica, características das fibras, composição química e teores de madeira juvenil e adulta (COWN, 1974; HARRIS, 1977; BRITO, 1983).

A influência das técnicas silviculturais na qualidade da madeira foi estudada por pesquisadores, tais como Fielding (1965 e 1967); Rudman & Mckinnell (1975). Entre os fatores estudados, estão a poda, desbaste, fertilização, irrigação e espaçamento. Há consenso entre esses autores de que as técnicas silviculturais intensivas afetam a qualidade da madeira.

Com relação ao efeito dos nutrientes minerais na qualidade da madeira, destaca-se o trabalho conduzido por Dünisch (1993), que mostra o efeito dos nutrientes minerais no tamanho dos anéis de crescimento e, principalmente, a interação do conteúdo da água no solo e dos nutrientes minerais na formação da madeira de *Picea*. No Brasil, Rigatto (2002) trabalhou com o efeito dos atributos do solo na qualidade da madeira produzida para celulose, e observou que a produtividade de *Pinus* é afetada tanto pelos atributos físicos quanto pelos químicos. Observou, também, o efeito do solo na densidade básica da madeira; nos teores de extrativos e lignina; menores teores de holocelulose e celulose e menor rendimento em celulose.

Além desses trabalhos, são observados na literatura trabalhos básicos conduzidos por Larson (1967, 1969), sobre a influência da adubação e conseqüentemente dos nutrientes minerais na formação da madeira. Os resultados mostram que a maior oferta de nutrientes aumentou a fotossíntese e a espessura dos anéis de crescimento das árvores.

Individualmente, os nutrientes têm funções relacionadas aos compostos orgânicos envolvidos na formação da madeira. Assim, N é o componente

essencial de aminoácidos, proteínas e ácidos nucléicos e, com isso, toma parte nos processos de síntese das árvores (cloroplastos e mitose). Além disso, o N na forma reduzida aparece em diferentes coenzimas (MARSCHNER, 1995). O N orgânico está ligado com a biossíntese da lignina (por exemplo, a L-Fenilalanina) (FREUDENBERG & NEISH, 1968). Experimentalmente, a oferta de N no solo está intimamente ligada com o crescimento das árvores e com a produção de biomassa (INGESTAD, 1987).

A principal função do P está ligada a sua ocorrência na forma de componente estrutural (ácido nucléico, açúcares fosfatados e coenzimas) e na sua participação direta como conteúdo energético (ATP) da célula (KIND & WOEBER, 1975). No câmbio e também nos tecidos de diferenciação, o P aparece na forma de NDP-Glucose como forma inicial da síntese da hemicelulose.

Nas substâncias orgânicas, o S encontra-se na forma de sulfato, tendo participação direta nas proteínas celulares, (SITTE et al., 1991). A influência do enxofre na formação da madeira é apresentada por Keller (1983), trabalhando em locais onde ocorre chuva ácida e, por isso, altas concentrações deste nutriente no lenho das árvores.

As células meristemáticas, como as células do câmbio, mostram teores relativamente altos de K. Um papel importante desenvolvido pelo íon  $K^+$  é o de cofator nas reações enzimáticas. Devido ao fato da baixa afinidade na formação de ligações orgânicas e pelas altas concentrações no simplasto das células, o K funciona no processo osmótico de manutenção da abertura do câmbio (BAUCH, 1993, citado por DÜNISCH, 1993). Além disso, o  $K^+$  está diretamente envolvido no transporte pelo floema de sintetizados da fotossíntese.

Uma importante função do Ca é a estabilização da membrana celular. Dentro das paredes celulares, o  $Ca^{++}$  estrutural aparece ligado às protopectinas (KLEINIG & SITTE, 1986). Outra função importante do Ca está no processo de lignificação, principalmente durante a formação da lignina, a qual tem uma forte dependência do conteúdo de Ca (WESTERMARK, 1982).

O significado do Mg na formação da madeira está intimamente ligado a sua participação na molécula de clorofila e, com isso, na fotossíntese. Outra função do Mg na formação da madeira pode ser observada nos trabalhos conduzidos por Kenk & Unfried (1984), que mostram a influência da oferta de Mg no solo e sua presença nos anéis de crescimento da árvore.

## 2.2 Produção de Biomassa Florestal

A produtividade das plantas pode ser definida como o aumento do peso seco por unidade de área (kg/ha). Muitos fatores contribuem para a produtividade, por isso ela é uma integração de peculiaridades bioquímicas, fisiológicas, genéticas e morfológicas, mais a influência do ambiente e das práticas silviculturais (SCHRANDER, 1975). Entender e controlar os possíveis padrões de crescimento e desenvolvimento são problemas cruciais na melhoria da produtividade. Isso é verdadeiro em ambientes onde o solo é o principal fator limitante para a produtividade e, intensificado, quando nutrientes e água também são fatores limitantes, (LOOMIS et al., 1976).

O uso de modelos matemáticos para estimar o volume de madeira produzido pelas árvores é prática rotineira na atividade florestal. Os modelos matemáticos também têm sido desenvolvidos para fornecerem estimativas da produção de biomassa de casca, lenho, galhos e folhas de árvores de eucalipto, Reis et al. (1987), Silva et al. (2001), Bellote & Silva (2000). É possível estimar indiretamente, com grande precisão, a produção de biomassa total produzida em cada compartimento da árvore, Silva (1996).

Entre os diferentes compartimentos da árvore, ocorre no tronco o maior acúmulo de biomassa. Este compartimento, para *Eucalyptus* na idade de colheita, representa cerca de 86% da biomassa total produzida (SILVA, 1996; BELLOTE et al, 2001). Ainda, segundo estes autores, 6% da biomassa total produzida representa a biomassa de casca; 5% galhos e 3% folhas. Trabalhos sobre a produção de biomassa de *Pinus* e *Eucalyptus* são descritos por Valeri (1988), Kadeba (1994), Munson et al. (1995), Van Lear & Kapeluck (1995); Maia et al. (1998) e Silva et al. (2001).

De todas as práticas silviculturais utilizadas, a colheita florestal é a operação mais agressiva em termos de prejuízos ao sítio, sendo a principal fonte de exportação de nutrientes, levando ao esgotamento do solo, após sucessivas rotações. Este fato tem levado a recomendar que apenas o tronco das árvores seja extraído do sítio, reconhecendo-se a importância das folhas, galhos e casca para a proteção do solo e manutenção de nutrientes no sistema (SILVA, 1996; BELLOTE & SILVA, 2000).

Como na colheita florestal, geralmente, são retirados do sítio, o tronco e a casca, isto representa uma exportação de 92% de toda a biomassa produzida, contribuindo para uma depleção significativa de nutrientes do solo (BELLOTE et al, 2001). O problema da exportação de nutrientes é agravado pelas rotações

curtas e exploração de árvores jovens. Esta situação pode, genericamente, remover mais nutrientes do que o corte em idades mais avançadas (LIMA, 1993), podendo representar um efeito negativo para a sustentabilidade da produção (POGGIANI, 1985; PEREIRA, 1990). Soma-se a isso, a prática da queima dos restos da colheita anterior (COSTA, 1995), que contribui ainda mais para um empobrecimento do sítio.

De todos os compartimentos da árvore, a casca merece um maior destaque. Ela acumula altas quantidades de Ca e Mg (BELLOTE et al, 2001). A quantidade de Ca presente na casca é maior do que em qualquer outro compartimento da árvore. Este resultado é confirmado por Bellote (1979), Poggiani et al. (1983), Pereira et al. (1984), Poggiani (1985), Silva (1983 e 1996) e Silva et al.(2001).

Normalmente, a casca é utilizada para a produção de energia. Sua manutenção no campo, como resíduo da exploração, tem grande importância na sustentabilidade da produção. A exportação intensiva da casca, através de rotações sucessivas, contribui para a diminuição da produtividade florestal. Mesmo sendo a adubação com N-P-K uma prática comum em plantios de *Eucalyptus*, ela é insuficiente para repor os nutrientes exportados pela casca (BELLOTE et al., 2001).

### **2.3. Acúmulo de Nutrientes Minerais nas Árvores**

As preocupações com o possível esgotamento dos nutrientes do solo, resultante das explorações intensivas das florestas, tornaram-se mais evidentes a partir do século XIX, quando pesquisadores alemães já demonstravam preocupações com a concentração de nutrientes das árvores (EBERMAYER 1882, citado por MILLER, 1981). Nesta época, apesar do conhecimento sobre a nutrição mineral das plantas ser bastante incompleto, já se recomendavam sistemas de exploração conservadores, baseados apenas na extração do tronco. Neste período, já se reconhecia a importância das folhas, galhos e outros resíduos da madeira para a proteção do solo e conservação de nutrientes, principalmente nos solos mais pobres.

Atualmente, sabe-se que o ciclo de nutrientes em uma floresta é de importância fundamental. As espécies florestais apresentam diferentes exigências nutricionais, estratégias de ciclagem próprias e um ritmo de ciclagem que varia em função da região e das espécies em uma mesma região

(COLE, 1986). Estes processos são extremamente importantes para a adaptação de espécies a sítios de baixa fertilidade, contribuindo para a manutenção da produtividade dos mesmos (LIMA, 1987). No caso de florestas plantadas, esses processos são vitais para a produção contínua e equilibrada. Além disso, o seu conhecimento possibilita a previsão de situações que poderiam ser críticas a médio e longo prazo, tanto em relação à produtividade como em relação às características do solo. Com esse conhecimento, pode-se recomendar o uso de práticas de manejo que favoreçam a manutenção da produtividade do sítio.

A distribuição interna de nutrientes na fitomassa florestal varia com o compartimento considerado, com o estágio fisiológico da planta e com a dinâmica do ecossistema. A absorção, acúmulo e liberação de nutrientes depende, em parte, da idade e do estágio de desenvolvimento das árvores (BELLOTE et al., 2001).

A quantidade total presente na parte aérea é representada pelo somatório dos nutrientes contidos nos ramos, folhas, casca e tronco. Cada um destes compartimentos possui uma determinada concentração de nutrientes, de acordo com a função fisiológica desempenhada. Geralmente, há um gradiente decrescente de concentrações que apresenta a seqüência seguinte: folhas > cascas > ramos > lenho (BELLOTE, 1979; SILVA, 1983 e 1996). Variações na concentração de nutrientes, dentro de um mesmo compartimento, são às vezes muito significativas, principalmente devido às diferenças de idade e atividades desses compartimentos (BELLOTE, 1990; FERREIRA et al., 1993; SILVA et al., 2001).

Diversos autores têm recomendado que a oferta de nutrientes pelo solo seja analisada pela quantidade de nutrientes absorvidos pelas plantas; e as folhas têm sido as partes preferidas para este tipo de análise. Alguns trabalhos apresentam teores médios, teores máximos e mínimos, faixas de suprimento adequado, níveis críticos aproximados, relações entre nutrientes para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* (MENEGOL, 1991; GARICOITS, 1990; LA TORRACA, 1984; REISSMANN & WISNIEWSKI, 2000). Teores foliares baixos de Mg e Zn foram associados com baixo crescimento dessa espécie por Menegol (1991). A quantidade de nutrientes nas folhas, nos ramos e na casca de *Eucalyptus* é bastante expressiva. O resíduo da exploração, quando mantido no campo, diminui o impacto da exportação de nutrientes. Poggiani (1980) fez uma estimativa da remoção de nutrientes e da biomassa total produzida por hectare pelo *Eucalyptus* e observou que 9% da biomassa é representada pelas folhas,

7% pelos galhos e 83% pelo tronco. Porém, 37% dos nutrientes estão nas folhas, 10% nos galhos e 53% no tronco.

Diversos fatores podem influir nos resultados da análise foliar, e torna-se necessário que sejam identificados. Os principais fatores são: efeito de pragas e doenças (EVANS, 1979); idade do material amostrado (LAMB, 1976); a posição das folhas na copa (EVANS, 1979); a época de coleta (LAMB, 1976); parâmetros físicos e químicos do solo (BATAGLIA & DECHEN, 1986).

As considerações feitas para as folhas, em relação às variações dos teores de nutrientes minerais, são válidas também para o lenho, ramos e casca das árvores. Além destas, somam-se ainda aquelas inerentes ao estágio de desenvolvimento das árvores (jovem, maduro e senescente), que estão relacionadas às diferenciações fisiológicas que ocorrem com a idade (MADGWICK & MEAD, 1990).

Na casca, distinguem-se dois tipos de tecido: a casca externa morta (ritidoma) e a interna viva, na qual está incluído o floema funcional. O floema é ativo na translocação de solutos orgânicos dos pontos de produção para os de consumo. A exemplo do que acontece no caule, os teores de nutrientes na casca variam de acordo com a posição que esta ocupa no fuste, sendo crescente no sentido base-ápice (ZEN et al., 1981; LEMOINE et al, 1990). Embora existam referências sobre o acúmulo de nutrientes nos ramos, pouco se conhece a respeito da variação dos seus teores ao longo dos mesmos. Attiwill (1979), estudando *E. obliqua*, comparou resultados em ramos ativos com diâmetros superiores e inferiores a 2,5 cm e observou que os ramos de menor diâmetro continham 65% mais P, K, Ca e Mg do que os de maior diâmetro.

### **3. Localização e Caracterização das Áreas Experimentais**

#### **3.1. Localização Geográfica**

Para este trabalho, foram utilizados plantios comerciais de *Pinus taeda*, com 20 anos de idade, pertencentes à Inpacel - Industria de Papel Arapoti Ltda., localizados nos Municípios de Reserva e Arapoti, no Estado do Paraná. A Tabela 1 mostra a localização das áreas estudadas.

**Tabela 1.** Coordenadas geográficas das áreas de plantio.

| áreas | Município | Coordenadas geográfica |             | Altitude [m] |
|-------|-----------|------------------------|-------------|--------------|
|       |           | latitude               | longitude   |              |
| T1    | Reserva   | 24° 32'                | 50° 44'     | 879          |
| T2    | Reserva   | 24° 32'                | 50° 44'     | 879          |
| T3    | Arapoti   | 24° 11' 54"            | 49° 58' 05" | 733          |
| T4    | Arapoti   | 24° 11' 54"            | 49° 58' 05" | 733          |

O plantio, em todas as áreas, foi realizado em junho de 1983. Por se tratar de plantios de primeira rotação, a limpeza foi realizada com correntão, puxado por trator de esteira D6, seguido de queima total da área. Após a limpeza, foi realizado o enleiramento com ancinho puxado por trator de esteira D6, seguido de uma gradagem pesada com trator de esteira D4 e finalmente uma gradagem leve com trator de pneus.

O plantio foi realizado em covas, sem a aplicação de fertilizantes minerais. O espaçamento entre plantas variou em função da localização do plantio e do tipo de solo. Tabela 2.

**Tabela 2.** Espaçamento utilizado nos plantios e manejo silvicultural realizado no desenvolvimento de *Pinus taeda*.

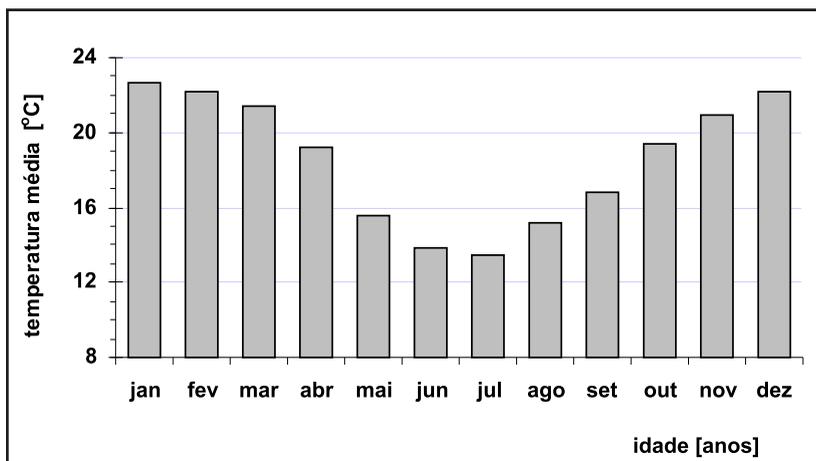
| áreas | espaçamento [m] | data   | 1° desbaste   | data   | 2° desbaste   |
|-------|-----------------|--------|---------------|--------|---------------|
|       |                 |        | remanescentes |        | remanescentes |
| T1    | 3 x 2 m         | set/00 | 900           | -      | -             |
| T2    | 3 x 2 m         | jul/99 | 900           | mai/03 | 600           |
| T3    | 2,5 x 1,8 m     | jan/02 | 650           | -      | -             |
| T4    | 2,5 x 1,8 m     | jan/02 | 650           | -      | -             |

O manejo silvicultural foi realizado a partir do ano de 1999. Na Tabela 2, são apresentadas as datas dos desbastes realizados, assim como a quantidade de árvores remanescentes, após os desbastes.

### 3.2. Clima

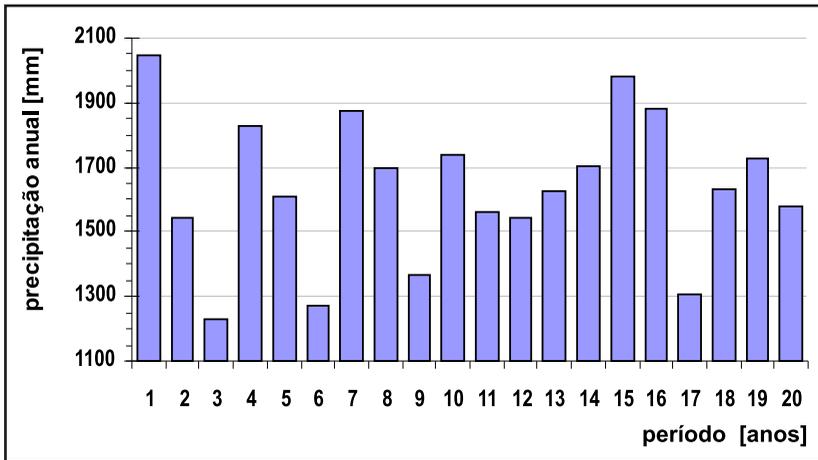
Pelo fato de não haver registros climáticos nos Municípios de Arapoti e Reserva, utilizaram-se os dados disponíveis do Município de Telêmaco Borba, cedidos pelo Instituto Tecnológico SIMEPAR.

O clima da região, segundo Köppen, é do tipo Cfa/Cfb, subtropical úmido transicional para temperado. A temperatura média do mês mais frio é inferior a 16 °C, com ocorrência de geada, e a do mês mais quente é superior a 22 °C, (Gráfico 1). A precipitação média anual é de 1.490 mm, com excedente hídrico de 557 mm/ano, distribuído em todos os meses do ano.



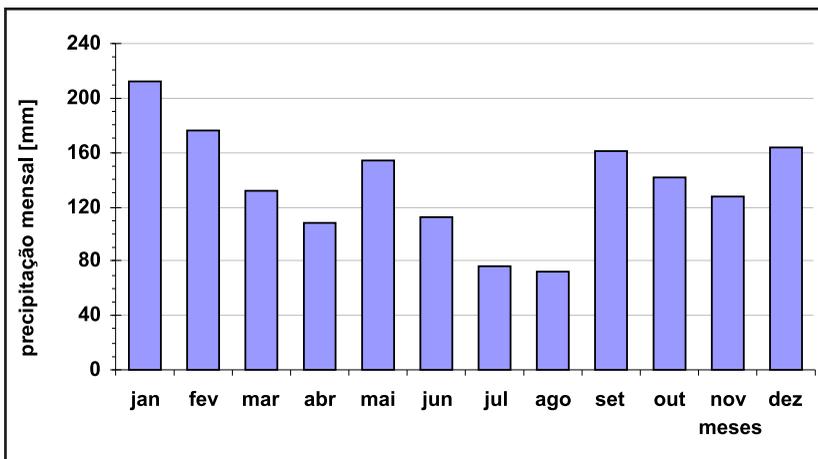
**Gráfico 1.** Temperatura média mensal de 1983 até 2003, no Município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná.

Entre 1983 e 2003, período de crescimento das árvores, a precipitação pluviométrica anual apresentou variações acentuadas, Gráfico 2. Durante este período, a precipitação registrada foi, para a maioria dos anos avaliados, superior à média da região. Por outro lado, registraram-se precipitações inferiores à média nos anos de 1985, 1988, 1991 e 1999.



**Gráfico 2.** Precipitação anual de 1983 até 2003, no Município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná.

A precipitação média mensal, durante o período de crescimento das árvores, é apresentada no Gráfico 3. Entre dezembro e janeiro, ocorre o período de maior precipitação. Entre junho a agosto, as menores precipitações são verificadas.



**Gráfico 3.** Precipitação média mensal de 1983 até 2003, no Município de Telêmaco Borba, Estado do Paraná.

### 3.3. Solos

Os solos das áreas estudadas, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, Embrapa (1999), pertencem à classe dos Latossolos e dos Cambissolos.

#### 3.3.1 Latossolos

Nas áreas T1 e T2, o solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico, A moderado, textura argilosa. São solos profundos, bem drenados, resistentes à erosão, de relevo plano à suave ondulado, normalmente ocupando as posições mais elevadas do relevo com cores nos horizontes inferiores tendendo para o 2,5YR a 10R. Por apresentar elevados teores de sua microestrutura, é mais desenvolvido, facilitando assim a drenagem da água e permitindo trabalhar mecanicamente no período chuvoso. Entretanto, é susceptível à compactação. Os solos identificados são álicos, tendo a hematita como o mineral de ferro dominante. A CTC dos horizontes inferiores situa-se entre 6 a 8 meq/100g, e mais elevada nos horizontes superiores devido ao elevado teor de matéria orgânica.

#### 3.3.2 Cambissolos

São solos que, devido à heterogeneidade do material de origem do relevo e do clima, variam muito de um local para o outro. Esta classe comporta desde solos muito bem drenados até solos com drenagem lenta e sujeitos a encharcamento temporário. Apresentam profundidades variáveis; textura desde arenosa até argilosa, passando pelas siltosas, baixa capacidade de retenção de água (principalmente os mais arenosos), quimicamente pobres e álicos; Na área T3, foi identificado o Cambissolo Háplico Tb Distrófico típico, A moderado, textura média. Na área T4, Cambissolo Háplico Tb Distrófico léptico, A moderado, textura argilosa. As diferenças entre esses dois solos são a textura e a profundidade. O solo da área T3 apresenta textura média, é profundo e tem boa drenagem. O solo da área T4 apresenta textura argilosa, é raso (Impedimento físico - rocha semi-alterada entre 30 e 50 cm e com baixa microporosidade) com profundidade menor que 50 cm, apresentando drenagem lenta e é sujeito a encharcamento temporário.

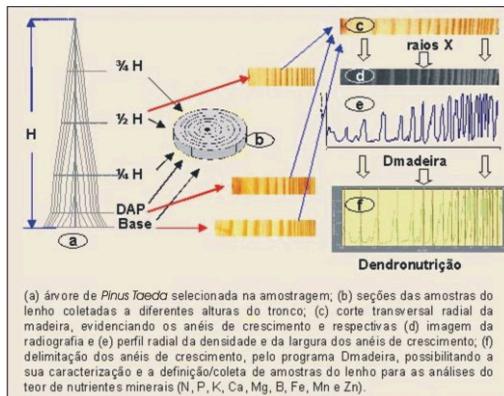
## 4. Materiais e Métodos

### 4.1. Seleção e amostragem das árvores

Foram utilizados plantios comerciais de *Pinus taeda*, com 20 anos de idade, estabelecidos em diferentes tipos de solos e com crescimentos diferenciados em altura e em diâmetro. Em cada área, foram demarcadas parcelas experimentais. Com base no inventário florestal, foram selecionadas árvores representativas da população. Estas árvores, enquadradas na categoria de árvores do extrato dominante, foram amostradas. Em cada parcela experimental, foram selecionadas e cortadas quatro árvores.

Para cada árvore derrubada, foram realizadas medições da altura total, altura comercial para serraria, para celulose e diâmetro a altura do peito - DAP. Para a altura comercial para celulose, foi considerado o diâmetro mínimo de 8 cm e para serraria o diâmetro mínimo de 24 cm. Após as medições, foram separados os diferentes compartimentos das árvores (tronco, galhos e acículas). Os galhos e as acículas, depois de separados, foram pesados (peso verde total) e retiradas amostras para quantificação de biomassa produzida e para as análises de nutrientes minerais.

A amostragem do tronco constituiu da retirada de discos com casca, de cinco posições diferentes do tronco: da base, do DAP, de 25%, 50% e 75% da altura total e da ponteira das árvores. A casca foi separada dos discos. Foram retirados dois discos por posição, sendo um utilizado nas análises de nutrientes minerais e o outro como corpo de prova para as avaliações tecnológicas e análise de tronco, conforme mostrado na Figura 1.



**Fig. 1.** Dendronutrição: seqüência metodológica desenvolvida no trabalho.

#### 4.1.1 Análise de tronco

A análise de tronco foi realizada para determinar o incremento anual em altura das árvores. Para essas análises, foram utilizados os discos do tronco da base, DAP, 25%, 50% e 75% da altura total. A determinação da altura das árvores, em função da idade, foi obtida conforme metodologia descrita por Finger (1992). A obtenção da espessura dos anéis e conseqüentemente do incremento anual em diâmetro, necessário para os cálculos descritos pelo autor, foram obtidos de duas formas. Nos discos de 25% e 75% da altura total, foram feitas medições manuais. Nos discos da base, do DAP e do meio das árvores, o diâmetro dos anéis foi obtido utilizando-se o programa denominado Dmadeira, que utiliza os resultados de densidade específica da madeira obtida através da densitometria de raios X.

#### 4.1.2 Cálculo do volume e do peso total das árvores

O incremento anual e corrente anual em volume das árvores foram calculados utilizando-se a equação de Smalian, expresso pelo somatório dos toretes entre base e DAP; DAP e 25% da altura total; 25 e 50%; 50 e 75% e 75 até altura total. Com os dados obtidos de densidade específica, pela densitometria, determinou-se o peso seco do tronco, nas diferentes idades das árvores.

$$V = \frac{1}{2} ( D^2 / 4 + d^2 / 4 ) h$$

Onde: V = Volume do segmento [m<sup>3</sup>]

D = Diâmetro maior do segmento [m]

d = Diâmetro menor do segmento [m]

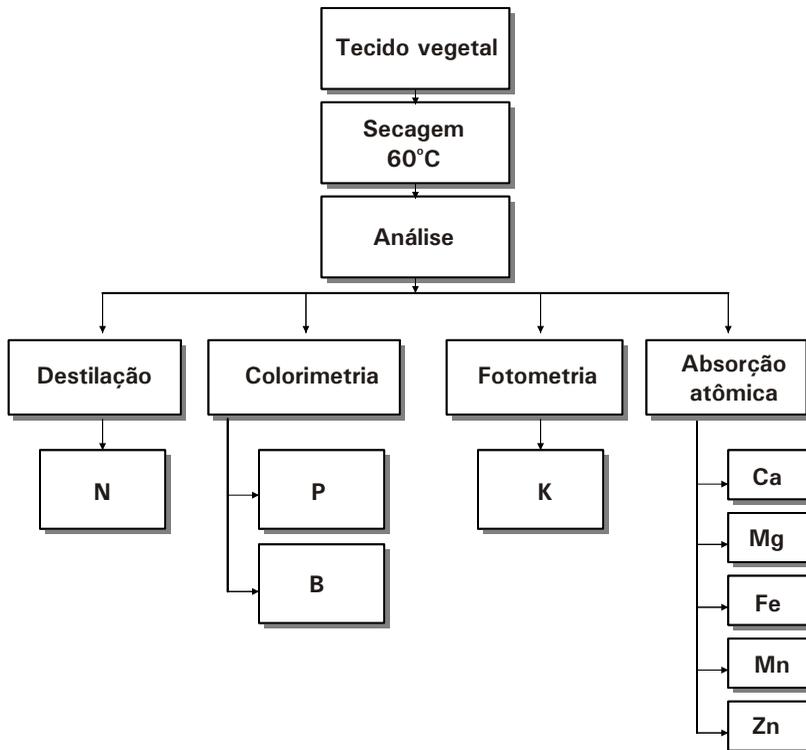
h = Comprimento do segmento [m]

#### 4.1.3 Análises nutricionais das amostras

Para as análises químicas dos nutrientes minerais presentes nas acículas, nos galhos e no lenho das árvores, as amostras, após secas em estufa a 60 2,5°C, foram moídas em moinho tipo Wiley (peneira de malha 20) e analisadas para os nutrientes N, P, K, Ca, Mg, B, Fe, Mn e Zn, conforme apresenta o Organograma 1. O preparo e digestão das amostras foram feitos pelo método

via úmida, de acordo com as descrições metodológicas feitas por Embrapa (1997). Para o N, foi utilizado a digestão sulfúrica, e para os demais nutrientes, exceto o B, a digestão nitroperclórica.

Para o N, o extrato obtido na digestão foi submetido à destilação pelo método micro Kjeldahl, seguido de titulação. O P foi determinado por colorimetria pelo método Vanado-molibdato de amônia, o K por fotometria de chama, e o Ca, Mg, Fe, Mn e Zn por espectometria de absorção atômica. O B foi analisado via seca, pelo método da curcumina (SARRUGE & HAAG, 1974), seguido de determinação via colorimétrica.



**Organograma 1.** Esquema das análises de nutrientes nas amostras de acículas, casca, galhos e lenho.

#### 4.1.4 Caracterização do lenho

##### 4.1.4.1 Variação radial da densidade por densitometria de raios X

A avaliação do perfil densitométrico do lenho foi realizada nos discos da base, do DAP e a 50% da altura total das árvores. A Figura 1 ilustra a seqüência dos procedimentos.

Inicialmente, foi definida a região de corte nos discos de madeira selecionados, onde se procurou a região representativa do diâmetro do disco e que não apresentasse defeito. Após isso, foi retirada uma sub-amostra do disco, com dimensões de 20 mm de altura por 10 mm de espessura. Essas amostras foram separadas na região da medula, constituindo-se em duas amostras de madeira por disco. Essas sub-amostras radiais do lenho foram fixadas em suporte de madeira e cortadas em seções transversais (1,0 mm de espessura por 10 mm de altura) em aparelho de dupla serra circular.

As amostras foram acondicionadas em sala climatizada (12 horas a 20 °C, e 50% UR), para atingir 12% de umidade. A seguir, foram dispostas sobre filmes de raios X (Kodak, Diagnostic Film X-Omat XK1, 240x180 mm), e radiografadas utilizando-se o equipamento de raios X (Hewlett Packard, Faxitron 43805 N). Detalhes são apresentados no trabalho desenvolvido por Amaral (1994).

Os filmes obtidos através dos raios X foram utilizados para produzir imagens através de scanner e analisados nos programas Crad e Cerd, os quais forneceram os perfis densitométrico das amostras radiais do lenho e a espessura dos anéis de crescimento. Os perfis densitométricos obtidos foram submetidos ao programa Dmadeira, permitindo definir e caracterizar a delimitação dos anéis de crescimento, bem como a espessura dos lenhos inicial e tardio. Com os dados obtidos, foram determinados os valores de densidade específica mínima, média e máxima dos anéis de crescimento e dos lenhos inicial e tardio. Também foram obtidos dados de largura dos anéis e dos lenhos inicial e tardio em cada um.

Com os perfis densitométricos das amostras do DAP, foram elaboradas tabelas para cada árvore e obtido o Índice de Uniformidade (ECHOLS, 1973) da madeira para cada árvore. Este índice mostra a variação da densidade ao longo da seção radial. Valores de Índice de Uniformidade próximos a 100 são indicadores de maior uniformidade no sentido medula-casca.

$$I.U. = \sum_{i=1}^i X_i \times K_i$$

Onde: IU = índice de uniformidade (%)

X = porcentagem de madeira em cada classe de variação da densidade

K = coeficiente de ponderação (0,05 g/cm<sup>3</sup>)

I = número de classes estabelecidas

#### **4.1.4.2 Variação radial das dimensões dos traqueídeos**

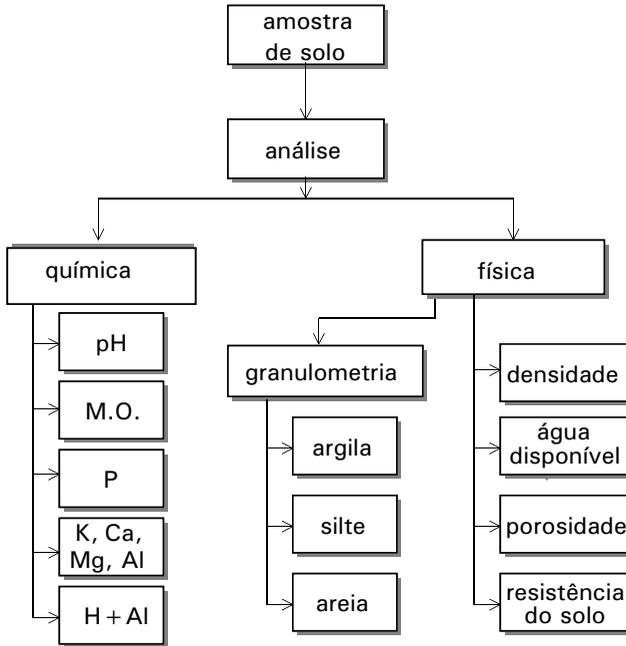
Para o estudo das dimensões dos traqueídeos, foram utilizadas as amostras do lenho do DAP de três árvores por área de estudo. Em cada disco, foram considerados duas subamostras radiais, no sentido medula-casca, perfazendo um total de 24 corpos de prova.

Nestes corpos de provas, foram selecionados e retirados os anéis de crescimento correspondentes às idades de 4, 8, 12, 16 e 20 anos de idade. Em cada anel selecionado, foram separados os lenhos inicial e tardio, cortados em pequenas lascas, transferidos para tubos de ensaio e adicionado solução macerante, segundo método proposto por Franklin (????) e descrito por Johansen (1940) e Sass (1951). Os tubos foram fechados e mantidos em estufa a 60 °C, por 24 horas. Após esse período, o material macerado foi lavado com água destilada e montadas lâminas histológicas. Nestas lâminas, foram medidas as dimensões dos traqueídeos (comprimento, espessura da parede, largura e diâmetro do lúmen) em microscópio com ocular micrométrica. A partir dos gráficos obtidos para cada uma das dimensões das fibras, foram elaboradas tabelas com as respectivas equações das tendências e coeficientes de variação para a análise dos resultados.

## **4.2 Amostragem do solo**

### **4.2.1 Análise química do solo**

Na projeção da copa de cada árvore derrubada, foi aberto um micro-perfil de 0,50 x 0,50 x 0,50 m, onde foram coletadas amostras de solo, nas profundidades de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm. Essas amostras foram encaminhadas para laboratório e analisadas de acordo com o Organograma 2.



**Organograma 2.** Esquema das análises químicas e físicas do solo, nas áreas estudadas.

As amostras de solos foram secas ao ar (TFSA) e posteriormente peneiradas em malha de 2 mm para todas as análises. O P assimilável, o  $K^+$  e o  $Na^+$  trocáveis foram extraídos com  $HCl$  0,05 N +  $H_2SO_4$  0,025 N; o pH com  $CaCl_2$ ;  $Ca^{+2}$  +  $Mg^{+2}$  e  $Al^{+3}$  trocáveis, extraídos com  $KCl$  1N, conforme procedimentos descritos por Embrapa (1997). A acidez potencial (H + Al) foi determinada através de solução tampão SMP, conforme descrição de Rajj (1983) e Quaggio (1985). A matéria orgânica foi determinada pelo método Walkley e Black, conforme descrito por Embrapa (1997).

De posse desses resultados, foram calculados a capacidade de troca de cátions do solo (CTC), a saturação de bases do solo (V%), a soma de bases do solo (S%) e a saturação em alumínio do solo (m%), de acordo com recomendação de Rajj (1983) e Quaggio (1985).

## **4.2.2 Análise física do solo**

### **4.2.2.1. Granulometria**

As análises granulométricas foram realizadas nas mesmas amostras de solo coletadas para as análises químicas. As análises foram feitas pelo método da pipeta, com fracionamento em areia grossa e areia fina, segundo Embrapa (1997).

### **4.2.2.2. Densidade, porosidade e água disponível do solo**

Para as análises da densidade, porosidade e água disponível no solo, foram utilizados os micro-perfis já abertos para a amostragem nas análises químicas. Foram utilizados anéis volumétricos de 68,71 cm<sup>3</sup> de capacidade e coletadas nas profundidades de 0 - 5 cm, 5 - 10 cm, 10 - 20 cm e 20 - 30 cm. As amostras, depois de saturadas com água, foram submetidas às tensões de 0,006; 0,01; 0,1; 0,3 e 1,5 MPa, através da mesa de tensão e do Extrator de Richards e, ao final, secas em estufa à temperatura de 105 °C. Com os resultados obtidos, foram calculados: a densidade global do solo, a porosidade total, a macro e a microporosidade e a água disponível no solo, de acordo com Embrapa (1997).

### **4.2.2.3. Resistência do solo à penetração das raízes**

A resistência do solo à penetração das raízes foi medida com penetrógrafo da Soilcontrol, modelo SC-60, com haste de 1 cm<sup>2</sup> de base. As medições foram realizadas na linha de plantio entre árvores, sendo a primeira medição realizada sob a linha de plantio ao lado da árvore amostrada. A partir daí, de 25 em 25 cm, foram feitas medições até a distância de 1,5 m da linha de plantio, perfazendo sete pontos amostrados por árvore.

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1. Crescimento e Produtividades dos Plantios Estudados

#### 5.1.1 Atributos Físicos e Químicos dos solos das áreas estudadas

A análise química dos solos, apresentada na Tabela 3, mostra para todas as áreas estudadas, acidez muita elevada e teores de matéria orgânica variando de médio (16 a 35 g/dm<sup>3</sup>), até alto (35 a 50 g/dm<sup>3</sup>) (TOMÉ JUNIOR, 1997). Valores altos de matéria orgânica foram observados nas áreas T1, T2 e T4 apenas nas primeiras profundidades avaliadas. Na profundidade de 0-5 cm, observam-se teores de matéria orgânica aproximadamente 40% a mais na área T1 do que na T2. Os teores de P nos solos variaram bastante, tanto em função da área, como em profundidade. Estatisticamente, na profundidade de 0-5 cm, os teores foram significativamente maiores que os observados nas demais profundidades, exceção da área T1, onde os maiores teores foram observados nas profundidades intermediárias. Embora exista esta variação, os teores de P encontrados são classificados, de acordo com Tome Junior (1997), como muito baixo (<2,0 mg/dm<sup>3</sup>) e baixo (2,1 a 4,0 mg/dm<sup>3</sup>). Apenas na área T1, na profundidade de 0-5 cm, o teor de P observado foi classificado como médio. De todos os atributos químicos avaliados, as bases trocáveis K, Ca+Mg são as que se apresentam como as mais deficientes nos solos estudados. Assim, para o K, apenas na área T4, os teores são classificados, segundo Tome Junior (1997), como médios. Nas demais áreas e em todas as profundidades avaliadas, os teores se enquadram como baixos.

**Tabela 3.** Análise química do solo, nas profundidades estudadas, para os diferentes sítios. [n = 4]

| Área | Prof. do solo | pH                | M.O                | P                   | K                      | Ca + Mg | Al   | H + Al | CTC  | S    | V  | m  |
|------|---------------|-------------------|--------------------|---------------------|------------------------|---------|------|--------|------|------|----|----|
|      | cm            | CaCl <sub>2</sub> | g.dm <sup>-3</sup> | mg.dm <sup>-3</sup> | cmolc.dm <sup>-3</sup> |         |      |        | %    |      |    |    |
| T1   | 0-5           | 3,52              | 43,4               | 2,15                | 0,06                   | 0,92    | 4,01 | 13,4   | 14,4 | 0,98 | 7  | 80 |
|      | 5-10          | 3,85              | 30,4               | 0,15                | 0,06                   | 0,76    | 2,63 | 9,8    | 10,6 | 0,82 | 8  | 76 |
|      | 10-20         | 3,87              | 28,9               | 0,23                | 0,06                   | 0,95    | 3,10 | 8,7    | 9,7  | 1,01 | 10 | 76 |
|      | 20-30         | 3,87              | 33,2               | 0,18                | 0,06                   | 0,86    | 2,67 | 11,0   | 11,9 | 0,91 | 8  | 75 |
| T2   | 0-5           | 3,72              | 35,5               | 0,43                | 0,08                   | 0,83    | 3,16 | 11,2   | 12,1 | 0,91 | 8  | 78 |
|      | 5-10          | 3,79              | 38,6               | 1,15                | 0,09                   | 0,98    | 3,49 | 11,6   | 12,7 | 1,07 | 8  | 77 |
|      | 10-20         | 3,84              | 37,5               | 1,85                | 0,09                   | 1,00    | 4,18 | 11,7   | 12,8 | 1,09 | 8  | 79 |
|      | 20-30         | 3,94              | 27,1               | 0,78                | 0,07                   | 0,71    | 3,34 | 10,7   | 11,4 | 0,77 | 7  | 81 |
| T3   | 0-5           | 3,80              | 30,3               | 5,35                | 0,08                   | 1,14    | 2,37 | 9,3    | 10,5 | 1,22 | 12 | 66 |
|      | 5-10          | 4,15              | 26,3               | 3,93                | 0,07                   | 1,46    | 2,42 | 8,3    | 9,8  | 1,52 | 16 | 60 |
|      | 10-20         | 3,93              | 19,8               | 2,25                | 0,06                   | 1,30    | 2,18 | 7,4    | 8,8  | 1,36 | 16 | 61 |
|      | 20-30         | 3,86              | 19,5               | 0,20                | 0,04                   | 0,66    | 2,11 | 6,9    | 7,6  | 0,70 | 9  | 76 |
| T4   | 0-5           | 3,57              | 51,6               | 2,85                | 0,15                   | 1,45    | 5,62 | 14,3   | 15,9 | 1,60 | 10 | 78 |
|      | 5-10          | 3,91              | 43,1               | 1,98                | 0,15                   | 1,13    | 5,22 | 13,3   | 14,6 | 1,28 | 9  | 80 |
|      | 10-20         | 3,83              | 34,9               | 1,38                | 0,13                   | 0,88    | 4,47 | 12,6   | 13,6 | 1,01 | 8  | 82 |
|      | 20-30         | 3,96              | 33,2               | 0,41                | 0,12                   | 0,92    | 4,58 | 12,5   | 13,6 | 1,18 | 9  | 80 |

Para o Ca + Mg, existe uma variação bastante acentuada, tanto em relação às diferentes áreas como em relação à profundidade. Embora os teores destes elementos tenham mostrado diferença entre as áreas avaliadas, eles são classificados como baixos (RECOMENDAÇÕES... 1995). Em consequência dos baixos teores observados para as bases trocáveis, o reflexo na soma de bases (S) e na saturação de bases do solo (V) é direto, fazendo com que essas variáveis sejam baixas em todos os sítios estudados.

Para o Al, os menores teores foram observados na área T3 e os maiores na área T4. A comparação entre essas duas áreas mostra que os solos na área T3, por serem mais arenosos (Tabela 4), apresentam menores teores de matéria orgânica. Esta situação é refletida também quando se analisa a saturação do solo em Al (m). Em todas as áreas avaliadas, a saturação com Al em todas as profundidades são classificadas, de acordo com Tomé Junior (1997), como muito alta, mostrando o caráter epiálico das camadas superficiais desses solos. Os valores da capacidade de troca de cátions (CTC) foram baixos em todas as áreas. Os solos mais argilosos apresentaram os maiores valores, enquanto que os arenosos, os menores valores, coincidindo com aqueles observados por Santos Filho (1985) e Santos Filho & Rocha (1987).

A análise granulométrica dos solos, apresentada na Tabela 4, mostra os teores médios de argila, silte, areia grossa e areia fina, nos solos, e não mostra variação dos teores em função da profundidade do solo. Para as áreas T1 e T2, classificados como Latossolo Vermelho, foram observadas variações apenas em relação aos teores de areia fina e areia grossa. Para as áreas T3 e T4, onde os solos foram classificados, respectivamente, como Cambissolo háplico típico e Cambissolo háplico léptico, houve variação na textura; textura média e textura argilosa. Ainda com respeito às diferenças texturais, observa-se que o Cambissolo da área T4 foi a classe que apresentou os maiores teores de argila e silte, e os menores teores de areia grossa e areia fina, dentre todos os solos. Bowersox & Ward (1972) constataram que os teores de silte e argila, até determinados valores nos horizontes superficiais e subsuperficiais, estão geralmente associados com aumento no crescimento das árvores. No entanto, nem todo solo que apresenta altos teores de argila e silte deve necessariamente ser um sítio produtivo, pois se os teores de areia forem baixos, pode haver problemas de compactação do solo, fato este que restringe o crescimento das plantas e conseqüentemente a produtividade.

A densidade do solo, para todos as áreas, foi menor até a profundidade de 10

cm, ocorrendo, a partir daí, um aumento. A menor densidade nos primeiros 10 cm deve-se à presença de maiores quantidades da matéria orgânica do solo, a qual é sempre superior na superfície e está relacionada com a deposição de serapilheira durante o período de crescimento das árvores (20 anos). As maiores densidades nos solos da área T3 estão relacionadas com a granulometria do solo. Embora os valores de densidade apresentem uma variação entre áreas, eles estão dentro dos níveis críticos aceitáveis.

**Tabela 4.** Distribuição de tamanho de partículas do solo, nas profundidades estudadas, para os diferentes sítios. [n = 4]

| Área | Profundidade do solo | Granulometria |      |       |                     | Densidade do solo                 | Porosidade |         | Água Disponível |
|------|----------------------|---------------|------|-------|---------------------|-----------------------------------|------------|---------|-----------------|
|      |                      | Areia         |      | Silte | Argila              |                                   | Total      | Aeração |                 |
|      |                      | Grossa        | Fina |       |                     |                                   |            |         |                 |
| cm   | %                    |               |      |       | kg.dm <sup>-3</sup> | cm <sup>3</sup> .cm <sup>-3</sup> |            |         |                 |
| T1   | 0-5                  | 30            | 19   | 12    | 39                  | 0,96                              | 0,62       | 0,34    | 0,068           |
|      | 5-10                 | 28            | 20   | 12    | 40                  | 0,96                              | 0,62       | 0,32    | 0,061           |
|      | 10-20                | 30            | 19   | 12    | 40                  | 1,05                              | 0,56       | 0,24    | 0,055           |
|      | 20-30                | 28            | 20   | 13    | 40                  | 1,11                              | 0,53       | 0,20    | 0,066           |
| T2   | 0-5                  | 18            | 26   | 13    | 44                  | 0,79                              | 0,66       | 0,39    | 0,070           |
|      | 5-10                 | 18            | 26   | 14    | 43                  | 0,92                              | 0,62       | 0,34    | 0,066           |
|      | 10-20                | 19            | 24   | 14    | 43                  | 0,98                              | 0,61       | 0,29    | 0,064           |
|      | 20-30                | 20            | 24   | 14    | 43                  | 1,11                              | 0,56       | 0,19    | 0,062           |
| T3   | 0-5                  | 39            | 28   | 14    | 19                  | 1,05                              | 0,56       | 0,34    | 0,049           |
|      | 5-10                 | 45            | 23   | 13    | 20                  | 1,27                              | 0,50       | 0,26    | 0,043           |
|      | 10-20                | 38            | 28   | 15    | 19                  | 1,34                              | 0,49       | 0,24    | 0,044           |
|      | 20-30                | 37            | 26   | 16    | 21                  | 1,40                              | 0,44       | 0,22    | 0,038           |
| T4   | 0-5                  | 3             | 6    | 38    | 53                  | 0,84                              | 0,65       | 0,32    | 0,044           |
|      | 5-10                 | 3             | 7    | 35    | 56                  | 1,00                              | 0,64       | 0,27    | 0,047           |
|      | 10-20                | 4             | 6    | 39    | 52                  | 1,18                              | 0,59       | 0,17    | 0,033           |
|      | 20-30                | 5             | 5    | 40    | 50                  | 0,95                              | 0,55       | 0,14    | 0,023           |

A porosidade total do solo é responsável pelo armazenamento e transporte da água e do ar do solo. Observa-se na Tabela 4 que existe diferença significativa na porosidade do solo, apenas para o solo da área T3, diferindo das áreas T2 e T4 nas duas profundidades iniciais. Na profundidade de 20-30 cm, não houve diferença estatística significativa. Em termos gerais, áreas com textura argilosa apresentaram maiores valores de porosidade total.

A porosidade de aeração consiste em uma parte da porosidade total, descontada a porosidade ocupada pela solução do solo. Para o ótimo desenvolvimento das plantas, a porosidade de aeração não deve ser menor do que 10% a 15% (PREVEDELLO, 1996). Assim, conforme mostram os dados da Tabela 4, a situação de porosidade de aeração que pode interferir no desenvolvimento das árvores é observada apenas na profundidade de 10 a 30 cm do solo da área T4.

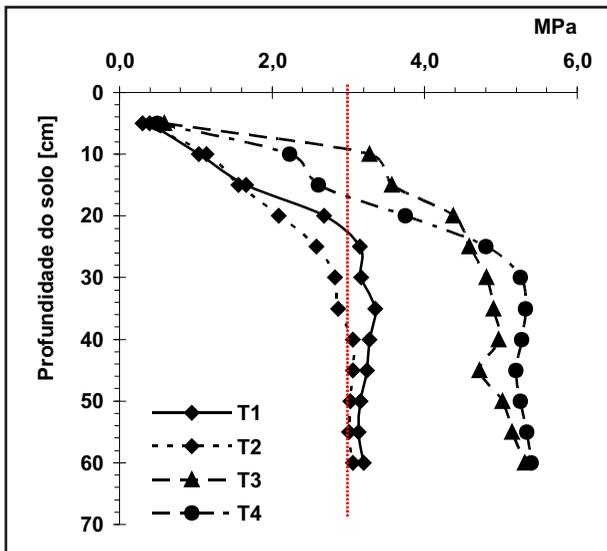
Um solo perfeitamente aerado apresenta uma concentração aproximada de 20% de oxigênio (BRADY, 1996). Segundo Oliveira et al. (1998), solos com porosidade de aeração abaixo de 10% comprometem o crescimento das plantas, pois o oxigênio, além de ser necessário à respiração das raízes, também participa na geração de energia necessária à absorção de nutrientes minerais.

Com relação à água disponível às plantas, os resultados obtidos mostraram diferenças significativas entre as áreas T2 e T4, nas profundidades 0-5 cm e 10-20 cm. Na profundidade de 20-30 cm, as áreas T1 e T2 diferem estatisticamente das áreas T3 e T4. Independente dos resultados estatísticos, os solos das áreas T1 e T2 apresentaram, nas profundidades iniciais, aproximadamente 50% a mais de água disponível. Nas maiores profundidades, 10 até 30 cm, a diferença com o solo da área T3 chega a 70% a mais de água disponível.

A resistência do solo à penetração das raízes é outro atributo físico que interfere no desenvolvimento das árvores. No Gráfico 4, são apresentados os dados obtidos desse atributo do solo, nas áreas estudadas.

Facilmente, observa-se que os solos apresentaram comportamentos variados com relação à resistência à penetração das raízes. As diferenças iniciam-se entre 5 a 10 cm de profundidade. É possível distinguir dois grupos de solos. Um grupo representado pelas áreas T1 e T2, que apresentaram resistência máxima de cerca de 3,0 MPa, até a profundidade de 60 cm. O outro representado pelas áreas T3 e T4, que apresentaram uma resistência máxima de cerca de 5,5 MPa, à profundidade de 60 cm. Como o limite para a

compactação do solo, de acordo com Sands et. al. (1979), é de 3,0 MPa, os solos das áreas T1 e T2 não oferecem resistência ao crescimento das raízes. Para os solos das áreas T3 e T4, as raízes se desenvolvem sem resistência até a profundidade de 18 cm para o solo T4 e 10 cm para o solo T3. Estes resultados indicam que, nas áreas T3 e T4, por apresentarem solos mais compactados, o sistema radicular das árvores explora menores volumes de solo.



**Gráfico 4.** Resistência do solo à penetração das raízes dos solos das áreas estudadas, medida através do penetrógrafo.

Menor volume de solo explorado significa absorção de menor volume de água, menor quantidade de nutrientes e, conseqüentemente, menor crescimento e produtividade.

### 5.1.2 Estado nutricional das árvores

Na Tabela 5, estão demonstrados os teores médios de nutrientes minerais nas acículas de *Pinus taeda*. Para os nutrientes P, B, Mn e Zn, não foram observadas diferenças nos teores, nas distintas áreas estudadas. Para o N e K, observou-se diferenças apenas na área T3. Os teores de Ca e Mg na área T3

foram superiores aos teores das acículas das demais áreas. Com relação aos teores de N nas acículas, é observado nas árvores da área T4 que os valores encontram-se dentro da faixa considerada adequada por Reissmann & Wisniewski, (2000). Nas demais áreas, os valores, embora estejam abaixo dos considerados adequados, são bastante superiores aos encontrados por Rigatto (2002), com a mesma espécie e na mesma região. Pelo fato do N ter funções fundamentais na planta, pois participa na formação de todos os compostos orgânicos fisiologicamente importantes, esses resultados sugerem que é preciso considerar vários aspectos quando se realiza um diagnóstico nutricional. Frequentemente, o resultado pode ser mascarado por efeitos de diluição ou concentração do nutriente no tecido vegetal, o que pode ter ocorrido com esse nutriente, nas árvores estudadas.

**Tabela 5.** Estado nutricional das árvores, aos 20 anos de idade, nas diferentes áreas estudadas.

| Área | N                  | P     | K      | Ca    | Mg     | B                 | Fe    | Mn    | Zn   |
|------|--------------------|-------|--------|-------|--------|-------------------|-------|-------|------|
|      | mg.g <sup>-1</sup> |       |        |       |        | g.g <sup>-1</sup> |       |       |      |
| T1   | 17,3 a             | 0,9 a | 5,9 a  | 0,7 c | 0,6 b  | 30 a              | 95 a  | 229 a | 18 a |
| T2   | 17,8 ab            | 0,8 a | 4,9 ab | 1,5 b | 0,8 ab | 29 a              | 94 a  | 364 a | 16 a |
| T3   | 16,7 b             | 0,9 a | 3,7 b  | 2,2 a | 1,0 a  | 17 a              | 79 ab | 320 a | 13 a |
| T4   | 20,6 a             | 0,9 a | 5,2 ab | 0,7 c | 0,6 b  | 22 a              | 70 b  | 254 a | 20 a |

OBS: Médias com letras iguais nas colunas não diferem significativamente, segundo teste de Tukey (p < 0,05)

As mesmas observações são aplicadas ao P nas acículas. Os teores encontrados estão bem abaixo dos valores considerados adequados por Reissmann & Wisniewski, (2000). Ainda, segundo estes autores, este nutriente, além da demanda, apresenta alta capacidade de redistribuição no interior das plantas. Estas características indicam que pode estar ocorrendo um típico caso de efeito de diluição. De qualquer maneira, como não foi observado qualquer sintoma visual de deficiência de P nas acículas, os valores observados indicam que as árvores podem estar com uma deficiência latente para esse nutriente.

Os resultados para os teores de K nas acículas mostram que apenas as árvores da área T1 encontram-se com bons suprimentos deste nutriente, de acordo com Reissmann & Wisniewski, (2000). Os teores das árvores da área T3 encontram-se na faixa considerada deficiente por Zöttl (1973), tendo sido

inclusive identificadas, em campo, deficiências visuais desse nutriente. Para as áreas T2 e T4, as árvores não mostravam sintomas visuais de deficiências nutricionais de K.

Tanto na área de maior crescimento do Pínus (T1), como na área de menor crescimento (T4), as árvores apresentaram teores de Ca abaixo dos níveis considerados adequados por Reissmann & Wisniewski (2000), mas acima dos considerados deficientes por Zöttl (1973). As áreas com crescimentos intermediários mostraram teores considerados adequados.

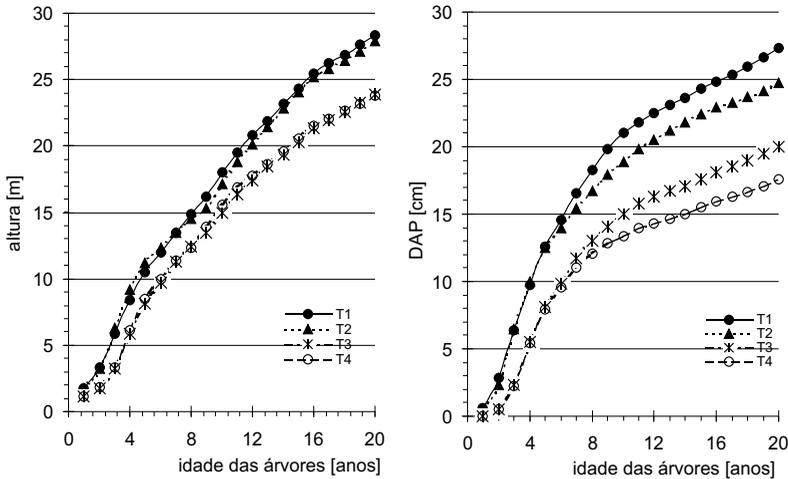
Em todas as áreas, os teores de Mg encontrados, segundo Reissmann & Wisniewski (2000), estão dentro da faixa considerada como boa para o suprimento de *Pinus taeda*.

Para os micronutrientes, menção é realizada apenas ao Zn, onde Reissmann (1981) e Reissmann & Zöttl (1984) relatam que, para povoamentos com mais de 15 anos de idade, os teores considerados como adequados situam-se acima de 30 mg/kg, o que caracteriza um nível inadequado de Zn, para todas as áreas estudadas.

### **5.1.3 Incremento anual em Altura e Diâmetro das árvores**

Os valores de Incremento anual em altura e diâmetro das árvores, nas áreas estudadas, encontram-se resumidos no Gráfico 5. As árvores das áreas T1 e T2 não apresentaram diferenças estatísticas para o crescimento em altura, em todas as idades estudadas. O mesmo ocorreu para o DAP das árvores, até a idade de 13 anos. A partir de 16 anos de idade, são observadas diferenças estatísticas no DAP das árvores, de todas as áreas estudadas.

O crescimento diferenciado das árvores está relacionado com as variações nos atributos do solo, discutidos anteriormente. Outros fatores que podem ter interferido nesse crescimento são o espaçamento de plantio e os desbastes realizados nas áreas T1 e T2 (conforme visto na Tabela 2).



**Gráfico 5.** Incremento anual em altura e diâmetro das árvores, nas áreas estudadas.

#### 5.1.4 Produtividade das árvores

Os dados dendrométricos relativos à altura, diâmetro e volume das árvores aos 20 anos de idade, nas distintas áreas estudadas, são apresentados na Tabela 6. Em relação à altura total das árvores, não foram detectadas diferenças estatísticas significativas entre as áreas T1 e T2, assim como entre as áreas T3 e T4. Para todas as outras variáveis analisadas, foi detectada diferença significativa entre as áreas estudadas.

Nas áreas T1 e T2, o solo é classificado como Latossolo vermelho, com variações, entre elas, na saturação de K e nos teores de areia fina e areia grossa (Tabelas 3 e 4). Também foram semelhantes os tratos culturais e os espaçamentos de plantio utilizados. Com essas observações, pode-se supor que a única diferença entre as duas áreas foi a época de desbaste. A área T2 foi desbastada um ano antes que a área T1. Estas informações não significam que o maior crescimento em DAP e volume observado na área T1 tenha sido devido ao efeito do solo, dos tratos culturais e do manejo.

**Tabela 6.** Variáveis dendrométricas do crescimento e produtividade das árvores de *Pinus taeda*, plantados em diferentes condições, aos 20 anos de idade.

| Área | Altura total | DAP        |            | Volume         |             |
|------|--------------|------------|------------|----------------|-------------|
|      |              | s/casca    | c/casca    | c/casca        | s/casca     |
|      | m            | cm         |            | m <sup>3</sup> |             |
| T1   | 28,3 ± 0,1   | 27,4 ± 0,4 | 31,6 ± 0,1 | 1,18 ± 0,04    | 0,88 ± 0,03 |
| T2   | 27,9 ± 0,2   | 24,8 ± 0,3 | 28,3 ± 0,3 | 0,90 ± 0,01    | 0,71 ± 0,02 |
| T3   | 23,9 ± 0,5   | 20,0 ± 0,4 | 24,0 ± 0,2 | 0,56 ± 0,04    | 0,42 ± 0,02 |
| T4   | 23,8 ± 0,4   | 17,6 ± 0,2 | 20,7 ± 0,1 | 0,43 ± 0,01    | 0,32 ± 0,01 |

Obs: Dados médios ± erro padrão da média (p<0,05)

Diferentemente, ocorre com as áreas T3 e T4, onde a variação em diâmetro e volume mostra relações com os solos em que estão plantados. Embora o solo da área T4 tenha, de certa forma, uma fertilidade melhor que da área T3, este apresenta melhor disponibilidade de água às árvores e uma melhor porosidade, tanto a macro como a de aeração. Além disso, o solo da área T3 é mais arenoso, não tem problema de profundidade, e a água, quando em excesso, pode ser drenada mais rapidamente.

Os plantios de *Pinus taeda* normalmente abastecem dois mercados consumidores. Um dos mercados é o do desdobro para uso da madeira serrada, em que as árvores são utilizadas até um diâmetro mínimo de 24 cm, e as toras com 2,20 m de comprimento. O outro é o de celulose e papel, para o qual são utilizadas as árvores até diâmetro mínimo de 8 cm. O restante da biomassa do tronco, assim como a casca, galhos e acículas, normalmente são consideradas como resíduos da colheita e ficam no sítio. Assim, a produtividade por árvore, dos plantios estudados, encontra-se sumarizada na Tabela 7. Foram observadas diferenças significativas entre árvores, para todas as variáveis dendrométricas estudadas.

Tanto para a altura como para o volume de madeira destinada à produção de celulose, as áreas T1 e T2 não apresentaram diferenças estatísticas significativas. O mesmo ocorreu com as árvores das áreas T3 e T4. Entretanto, foram observadas diferenças das áreas T1 e T2 com as áreas T3 e T4. Em média, o volume de madeira produzida nas áreas T1 e T2 foi 2 vezes maior do que nas áreas T3 e T4.

**Tabela 7.** Produtividade de *Pinus taeda*, aos 20 anos de idade, plantado em diferentes condições de solo.

| Área      | Altura     |            | Volume                |                |
|-----------|------------|------------|-----------------------|----------------|
|           | celulose   | serraria   | celulose              | serraria       |
|           | m          |            | m <sup>3</sup> x 1000 |                |
| <b>T1</b> | 24,6 ± 0,1 | 11,8 ± 0,7 | 465,6 ± 14,0          | 121,55 ± 9,618 |
| <b>T2</b> | 23,8 ± 0,4 | 8,5 ± 0,3  | 403,8 ± 18,4          | 51,86 ± 6,829  |
| <b>T3</b> | 19,2 ± 0,6 | 1,8 ± 0,2  | 230,2 ± 22,4          | 0,499 ± 0,262  |
| <b>T4</b> | 19,2 ± 0,3 | 0,4 ± 0,1  | 176,3 ± 10,5          | 0,002 ± 0,001  |

Obs: Dados médios ± erro padrão da média (p < 0,05)

Os volumes de madeira, para uso em serrarias, mostraram diferenças significativas entre todos os sítios. Para as áreas T3 e T4, devido às árvores não terem atingido a comprimento mínimo de 2,20 m, não houve produção para serraria. Na área T2, a madeira produzida foi o equivalente a três toras de madeira por árvore, com 2,20 m de comprimento cada, enquanto que a área T1 produziu cinco toras, ou seja, cerca de 65% a mais de madeira.

Essas variações observadas tanto no crescimento quanto em volume de madeira são reflexo direto do efeito dos atributos do solo, notadamente de suas propriedades físicas, químicas e biológicas, nos plantios de *Pinus taeda*. Dentro deste enfoque e para que sejam melhoradas, quando possível, a capacidade produtiva das áreas, é necessário o uso de técnicas silviculturais e manejo dos solos de forma compatível a cada área. Entre essas práticas, a manutenção dos resíduos da colheita florestal na área é importante, pois, após sua decomposição, além de fornecer nutrientes minerais às árvores do novo plantio, são excelentes condicionadores do solo. As quantidades de biomassa produzidas pelos diferentes compartimentos das árvores são apresentadas na Tabela 8.

Nas áreas T1 e T2, apenas 50% da biomassa total produzida destina-se ao mercado de celulose, papel e serraria; enquanto que nas áreas T3 e T4, apenas 40% tem o mesmo destino. Estas diferenças, embora pequena para a produção de madeira de uma árvore, tornam-se bastante significativas quando se considera a produção de madeira por hectare. Se por um lado, observam-se menor produtividade nas áreas T3 e T4, por outro, a quantidade de resíduos

que permanece no sítio, após a colheita, é proporcionalmente maior. Isto tem um significado considerável, principalmente pela importância que os resíduos possam exercer para os futuros plantios.

**Tabela 8.** Biomassa total produzida por árvores de *Pinus taeda*, com 20 anos de idade, plantadas em diferentes condições.

| Área      | Biomassa produzida [kg] |        |         |         |          | Total   |
|-----------|-------------------------|--------|---------|---------|----------|---------|
|           | acículas                | galhos | casca   | tronco  |          |         |
|           |                         |        |         | mercado | resíduo  |         |
| kg        |                         |        |         |         |          |         |
| <b>T1</b> | 15,1 a                  | 31,4 a | 107,2 a | 348,7 a | 170,2 a  | 672,6 a |
| <b>T2</b> | 14,5 a                  | 32,6 a | 70,6 b  | 271,5 b | 148,2 ab | 537,4 b |
| <b>T3</b> | 14,1 a                  | 30,3 a | 52,3 b  | 151,5 c | 124,1 bc | 375,3 c |
| <b>T4</b> | 5,9 b                   | 11,5 b | 44,3 b  | 119,2 c | 98,0 c   | 278,8 c |

Obs: letra iguais nas colunas não diferem estatisticamente ( $p < 0,05$ ).

De toda a biomassa que permanece no sítio, após a colheita, são as ponteiros do tronco (diâmetro menor que 8 cm) as que apresentam as maiores quantidades, seguida da biomassa de casca, galhos e acículas. Além da maior quantidade de biomassa, essas ponteiros também apresentam maior acúmulo de nutrientes minerais (Tabela 9).

**Tabela 9.** Acúmulo de nutrientes na biomassa dos diferentes compartimentos das árvores, nas diferentes áreas estudadas.

| Partes das árvores | Área | N    | P  | K   | Ca  | Mg  | B    | Fe    | Mn    | Zn   |
|--------------------|------|------|----|-----|-----|-----|------|-------|-------|------|
|                    |      | g    |    |     |     |     | mg   |       |       |      |
| acículas           | T1   | 260  | 14 | 89  | 10  | 9   | 460  | 1430  | 3420  | 264  |
|                    | T2   | 251  | 10 | 72  | 22  | 11  | 408  | 1395  | 5623  | 226  |
|                    | T3   | 237  | 13 | 54  | 31  | 14  | 233  | 1095  | 4403  | 192  |
|                    | T4   | 121  | 5  | 31  | 4   | 4   | 130  | 412   | 1477  | 116  |
| galhos             | T1   | 145  | 8  | 55  | 32  | 20  | 579  | 2911  | 5040  | 614  |
|                    | T2   | 125  | 6  | 32  | 54  | 18  | 482  | 3329  | 5240  | 320  |
|                    | T3   | 132  | 7  | 27  | 62  | 23  | 319  | 1896  | 3117  | 290  |
|                    | T4   | 48   | 2  | 16  | 11  | 8   | 154  | 867   | 1847  | 168  |
| casca              | T1   | 368  | 14 | 108 | 42  | 18  | 954  | 2709  | 4806  | 1165 |
|                    | T2   | 288  | 8  | 81  | 66  | 29  | 822  | 2165  | 4220  | 451  |
|                    | T3   | 203  | 14 | 59  | 89  | 30  | 468  | 1153  | 2054  | 476  |
|                    | T4   | 167  | 7  | 42  | 31  | 13  | 324  | 1011  | 2571  | 321  |
| tronco             | T1   | 608  | 18 | 275 | 216 | 90  | 4873 | 3845  | 50324 | 2360 |
|                    | T2   | 578  | 12 | 185 | 228 | 100 | 1826 | 2133  | 36701 | 1602 |
|                    | T3   | 366  | 25 | 109 | 209 | 65  | 1208 | 1004  | 13110 | 641  |
|                    | T4   | 245  | 21 | 119 | 102 | 47  | 856  | 403   | 20561 | 727  |
| Total              | T1   | 1381 | 53 | 528 | 301 | 136 | 6867 | 10895 | 63590 | 4402 |
|                    | T2   | 1247 | 36 | 370 | 370 | 158 | 3537 | 9022  | 51785 | 2598 |
|                    | T3   | 938  | 59 | 249 | 391 | 131 | 2228 | 5149  | 22684 | 1600 |
|                    | T4   | 582  | 36 | 207 | 147 | 71  | 1464 | 2693  | 26456 | 1333 |

Conforme mostra a Tabela 9, entre os macronutrientes, o N é o nutriente mais absorvido (Tabela 5) e acumulado na biomassa de Pínus, vindo na seqüência o K, Ca, Mg, P. Para os micronutrientes, observou-se a seqüência: Mn > Fe > B > Zn. No tronco, o Mn foi o nutriente que mais acumulou (75% do total existente na biomassa), e o Fe, o que menos acumulou (28% do total existente na biomassa). Em média, cerca de 60% dos nutrientes acumulados na biomassa do tronco são exportados pela exploração florestal, permanecendo os 40% restantes na biomassa da ponteira das árvores (diâmetro menor que 8 cm). Essas quantidades, mais aquelas existentes na biomassa de acículas, galhos e casca, representam quantidades expressivas de nutrientes que permanecem no sítio.

De todas as práticas silviculturais utilizadas, a colheita florestal é a operação mais agressiva em termos de prejuízos ao sítio, sendo a principal fonte de exportação de nutrientes, podendo inclusive levar ao esgotamento do solo, após sucessivas rotações. Este fato recomenda que apenas o tronco das árvores seja extraído do sítio, reconhecendo-se a importância dos demais compartimentos das árvores para a proteção do solo e manutenção de nutrientes no sistema (BELLOTE & SILVA, 2000). O problema da exportação de nutrientes pode ser agravado por rotações curtas e exploração de árvores jovens que podem remover maior quantidade de nutrientes do que o corte das árvores em idades mais avançadas (LIMA, 1993). Isto pode representar um efeito negativo para a sustentabilidade de produção do sítio (POGGIANI, 1985; PEREIRA, 1990). Soma-se a isso a queima dos restos da colheita, que contribui ainda mais para um empobrecimento do sítio (COSTA, 1995).

### **5.1.5 Correlações entre produtividade, nutrientes minerais e atributos dos solos.**

As correlações obtidas entre o estado nutricional das árvores e as variáveis dendrométricas, embora significativas estatisticamente para alguns elementos minerais, de uma maneira geral, não foram as que diretamente mais influenciaram no crescimento e produtividade das árvores. Os nutrientes minerais que mostraram correlações significativas estão apresentados na Tabela 10.

Para o N, observou-se uma fraca correlação entre os teores nas acículas e o diâmetro das árvores. Esse resultado mostra que, independentemente da área estudada, o N não está limitando o crescimento das árvores, reforçando a hipótese de efeito de diluição (visto anteriormente, Tabela 5) e indicando que

devem ser melhor investigados outros efeitos como a lei das proporções, onde os demais elementos minerais sejam fornecidos em quantidades proporcionais, assim como a lei do mínimo (REISSMANN & WISNIEWSKI, 2000).

**Tabela 10.** Correlação linear entre os teores de nutrientes minerais nos diferentes compartimentos das árvores, com as variáveis dendrométricas em *Pinus taeda*, com 20 anos de idade.

| Compartimento das árvores | Nutrientes | Altura das árvores   | DAP sem casca      | Volume sem casca     | r |  |  |  |  |
|---------------------------|------------|----------------------|--------------------|----------------------|---|--|--|--|--|
|                           |            |                      |                    |                      |   |  |  |  |  |
| acículas                  | N          | - 0,27 <sup>ns</sup> | - 0,50 *           | - 0,43 <sup>ns</sup> |   |  |  |  |  |
|                           | K          | 0,51 *               | 0,32 <sup>ns</sup> | 0,39 <sup>ns</sup>   |   |  |  |  |  |
|                           | B          | 0,60 *               | 0,60 *             | 0,66 **              |   |  |  |  |  |
|                           | Fe         | 0,67 **              | 0,76 **            | 0,71 **              |   |  |  |  |  |
| galhos                    | B          | 0,69 **              | 0,69 **            | 0,75 **              |   |  |  |  |  |
|                           | Fe         | 0,58 *               | 0,57 *             | 0,56 *               |   |  |  |  |  |
| alburno                   | B          | 0,55 *               | 0,70 **            | 0,67 **              |   |  |  |  |  |
|                           | Fe         | 0,70 **              | 0,82 **            | 0,79 **              |   |  |  |  |  |
|                           | Zn         | 0,58 *               | 0,51 *             | 0,61 **              |   |  |  |  |  |

Obs: \* e \*\* - significativos para  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$  respectivamente

Também para o K, foi observada uma correlação fraca entre os teores nas acículas e a altura das árvores. Esse resultado difere daqueles apresentados por vários autores que afirmam ser o K um dos nutrientes que guardam estreita relação com o crescimento das árvores (KIM & HAN, 1997; GARICOITS, 1990). Possivelmente, a baixa correlação do K com o crescimento pode ser devido à baixa disponibilidade deste elemento na maioria dos solos das áreas estudadas e suas relações com o Ca e o Mg do solo, onde podem ter ocorrido efeitos antagônicos na absorção desse nutriente.

As correlações positivas observadas para o Zn indicam que este nutriente pode vir a ser limitante ao crescimento de *Pinus taeda*. Resultados semelhantes foram observados por Reissmann (1981), para o qual o K se mostrou altamente correlacionado com o crescimento de *Pinus taeda*, no Estado do Paraná. Pelo fato de ter sido identificado baixos teores nas acículas (Tabela 5) e não ter sido realizada análise de Zn nos solos estudados, supõe-se que a oferta às árvores encontra-se abaixo do nível ou valor adequado presente em

todos os solos estudados.

Para o B, foram observadas correlações positivas com o crescimento das árvores, mostrando uma tendência de aumento do crescimento com o aumento na concentração, nos compartimentos avaliados. A falta de informação na literatura sobre esse elemento não permite uma avaliação detalhada ou pormenorizada. Entretanto, pode-se afirmar que em rotações sucessivas, sem a devida reposição de B, poderá surgir futuros problemas nutricionais.

Outro nutriente que apresentou correlações com todas as variáveis dendrométricas foi o Fe. Este resultado é interessante, uma vez que entre os micronutrientes catiônicos, o Fe é o mais abundante nos solos estudados, sendo, aliás, um dos principais constituintes destes. Deficiências minerais desse elemento são praticamente inexistentes, pois não é conhecida na literatura nenhuma citação sobre deficiência ou toxidez de Fe em plantios de *Pinus*, no Sul do País. Uma possível explicação para essas correlações pode ser sua interação com o Ca no solo, pois em solos de baixa fertilidade pode ocorrer dificuldade na sua absorção, por problemas de antagonismo induzido pelo Ca (REISSMANN & WISNIEWSKI, 2000).

As correlações obtidas para o B, Fe e Zn não permitem afirmar que estes nutrientes são, para as condições avaliadas, limitantes ao crescimento das árvores, provavelmente porque outras variáveis avaliadas apresentaram correlações mais estreitas com o desenvolvimento, prevalecendo nesse caso a lei do mínimo. Entretanto, é possível que a correção dessas variáveis, ou após sucessivas rotações e exportação de nutrientes, sem a devida reposição, venham a ocorrer problemas de ordem nutricional com esses nutrientes.

Para as propriedades químicas, devem ser mencionados o efeito conjunto do K, Ca e Mg, e, como conseqüência, a soma de bases. As correlações negativas observadas para estes nutrientes mostram situações distintas. O Ca, por ser um nutriente praticamente imóvel na planta, quando absorvido, é incorporado em compostos orgânicos de forma definitiva. Como o solo é de baixa fertilidade e muito pobre em Ca, à medida que as árvores crescem, aumenta sua necessidade de acumular nutrientes. Por outro lado, ocorre uma diminuição na oferta do solo, tendo como conseqüência uma menor absorção. Esse elemento não é o mais limitante à produção, porque existem, como já mencionado anteriormente, outras variáveis mais limitantes.

Para o K e o Mg, a justificativa é semelhante. A diferença é que estes elementos apresentam maior mobilidade no interior das plantas. Embora eles tenham uma ciclagem interna, a absorção deles é menor do que o acúmulo de biomassa na planta, por unidade de tempo, fazendo com que ocorra um típico

caso de efeito de diluição desses nutrientes. Se, por um lado, os teores de nutrientes nas árvores apresentaram fracas correlações com o crescimento, o mesmo não ocorreu com relação aos atributos do solo, os quais mostram estreitas correlações com a produtividade das árvores, (Tabela 11).

Entre as propriedades físicas estudadas, a água disponível e a resistência do solo à penetração das raízes foram as que mais se correlacionaram com o crescimento das árvores, em todas as profundidades avaliadas. Para as propriedades químicas do solo, destacam-se: soma de bases, K, Ca, Mg e o P. A água disponível apresentou uma correlação positiva e crescente com a profundidade do solo, atingindo valores máximos entre 20 a 30 cm de profundidade. Estas correlações são melhor entendidas quando analisadas em conjunto com a resistência do solo.

**Tabela 11.** Correlação linear entre os atributos do solo e as variáveis dendrométricas em *Pinus taeda*, com 20 anos de idade.

| variáveis           | profundidade do solo [cm] | altura das árvores | DAP [sem casca] | volume [sem casca] | r |  |  |  |  |
|---------------------|---------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|---|--|--|--|--|
|                     |                           |                    |                 |                    |   |  |  |  |  |
| água disponível     | 0 – 5                     | 0,73 **            | 0,71 **         | 0,70 **            |   |  |  |  |  |
|                     | 5 – 10                    | 0,58 *             | 0,50 *          | 0,50 *             |   |  |  |  |  |
|                     | 10 – 20                   | 0,61 *             | 0,61 *          | 0,57 *             |   |  |  |  |  |
|                     | 20 – 30                   | 0,84 **            | 0,88 **         | 0,84 **            |   |  |  |  |  |
| silte               | 0 – 5                     | - 0,61 **          | - 0,76 **       | - 0,72 **          |   |  |  |  |  |
|                     | 5 – 10                    | - 0,50 ns          | - 0,60 **       | - 0,64 **          |   |  |  |  |  |
|                     | 10 – 20                   | - 0,58 *           | - 0,74 **       | - 0,70 **          |   |  |  |  |  |
|                     | 20 – 30                   | - 0,58 *           | - 0,75 **       | - 0,68 **          |   |  |  |  |  |
| resistência do solo | 10                        | - 0,84 **          | - 0,74 **       | - 0,75 **          |   |  |  |  |  |
|                     | 20                        | - 0,71 **          | - 0,67 **       | - 0,64 **          |   |  |  |  |  |
|                     | 30                        | - 0,84 **          | - 0,86 **       | - 0,82 **          |   |  |  |  |  |
| K                   | 0 – 5                     | - 0,54 *           | - 0,71 **       | - 0,65 **          |   |  |  |  |  |
|                     | 5 – 10                    | - 0,46 ns          | - 0,68 **       | - 0,63 **          |   |  |  |  |  |
|                     | 10 – 20                   | - 0,40 ns          | - 0,62 *        | - 0,58 *           |   |  |  |  |  |
|                     | 20 – 30                   | - 0,33 ns          | - 0,54 *        | - 0,51 *           |   |  |  |  |  |
| P                   | 5 – 10                    | - 0,77 **          | - 0,63 **       | - 0,69 **          |   |  |  |  |  |
| Ca                  | 0 – 5                     | - 0,43 ns          | - 0,55 *        | - 0,56 *           |   |  |  |  |  |
| Mg                  | 0 – 5                     | - 0,50 *           | - 0,38 ns       | - 0,41 ns          |   |  |  |  |  |
| soma bases          | 0 – 5                     | - 0,70 **          | - 0,69 **       | - 0,71 **          |   |  |  |  |  |
| macroporos          | 10 - 20                   | 0,65 **            | 0,60 *          | 0,60 *             |   |  |  |  |  |

Obs: \* e \*\* - significativos para  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$  respectivamente

Como os solos apresentaram grande variação na compactação e esta interfere na porosidade e na disponibilidade de água às árvores, os resultados obtidos estão dentro do esperado. Nas áreas T3 e T4, a compactação do solo cresce com a profundidade (Gráfico 4), diminuindo a quantidade de água disponível às plantas, diminuindo a porosidade de aeração (Tabela 4) e, conseqüentemente, diminuindo o crescimento das árvores. Outro fato que comprova estes resultados é a correlação positiva para a água disponível às plantas e negativa para a resistência do solo.

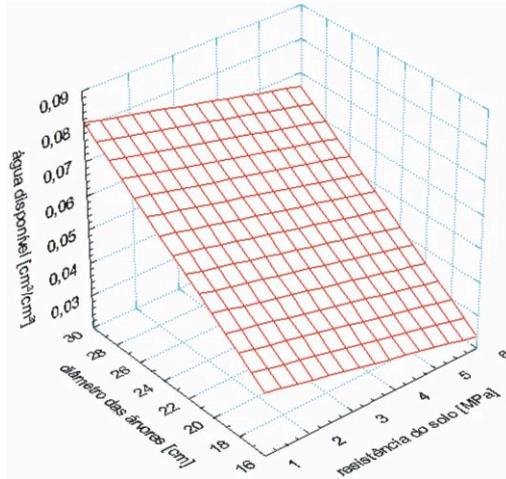
#### **5.1.6 Regressão múltipla entre a produtividade, os nutrientes minerais e os atributos dos solos**

Pelo fato de o crescimento de *Pinus taeda*, nas áreas estudadas, ser influenciado por alguns nutrientes minerais, e por algumas propriedades físicas e químicas do solo, utilizou-se a análise de regressão múltipla, para selecionar as variáveis e saber quais delas estão mais relacionadas com o crescimento. Quando se utilizou o DAP como variável dependente e os nutrientes minerais e as propriedades físicas e químicas como variáveis independentes, o programa selecionou um modelo (Gráfico 6), o qual confirma que a água disponível no solo (profundidade de 20 a 30 cm) e a resistência do solo à penetração das raízes (profundidade de 30 cm) são os maiores responsáveis pela variação do crescimento em diâmetro das árvores. Juntas, essas duas variáveis explicam, conforme o coeficiente de correlação múltiplo (R), 91% das variações do crescimento em diâmetro das árvores. Deste total, a água disponível é a que contribui mais para o crescimento em diâmetro das árvores, conforme mostram os coeficientes de correlação, apresentados na Tabela 11.

A equação gerada mostra que os maiores valores de diâmetros ocorreram quando o teor de água no solo, na profundidade de 20 a 30 cm, foi de  $0,076 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , e a resistência do solo, na profundidade de 30 cm, foi de 2,33 MPa. Os menores valores de diâmetros foram registrados quando a água no solo e a resistência, nas mesmas profundidades, foram respectivamente, de  $0,02 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  e 5,33 MPa.

Quando a variável dependente utilizada foi a altura total, foi selecionado um modelo matemático, conforme mostra o Gráfico 7. Os resultados mostraram que o crescimento das árvores em altura também foi influenciado pelas mesmas variáveis observadas para o crescimento em diâmetro. Neste caso, os atributos do solo juntos explicam, conforme mostra o coeficiente de correlação

múltiplo (R), 90% das variações do crescimento em altura. A resistência do solo à penetração das raízes pelo solo é a variável que demonstrou maior influência nesse crescimento, conforme mostram os coeficientes de correlação (Tabela 11) e os dados obtidos com o penetrógrafo (Tabela 12).



**Gráfico 6.** Relação entre o diâmetro das árvores, água disponível e a resistência do solo. n = 16. Abaixo, resultados da análise de regressão múltipla.

| dependente | independente               | valor   | erro   | valor t | prob >  t |
|------------|----------------------------|---------|--------|---------|-----------|
|            | água disponível [20-30cm]  | 121,418 | 44,207 | 2,746   | <0,02     |
| DAP        | resistência do solo [30cm] | - 1,510 | 0,668  | -2,262  | <0,04     |
|            | constante                  | 22,538  | 4,635  | 4,862   |           |

Equação de Regressão:

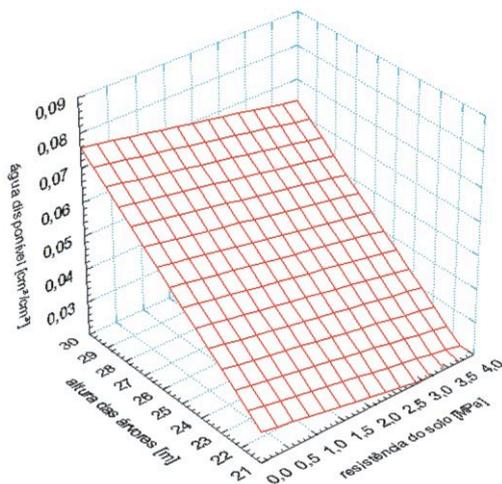
$$\text{DAP [cm]} = [121,418 * \text{água disponível}] - [1,510 * \text{resistência do solo}] + 22,538$$

R = 0,913

F = 32,653

F [13; 2 p < 0,001] = 6,36

Uma avaliação geral dos resultados permite concluir que o crescimento e a produtividade das árvores podem aumentar nas áreas estudadas, exceto na área T4, a qual apresenta impedimento físico (conforme descrito anteriormente). Difícilmente, nessa área, poderá ser conseguida produção adequada de madeira para desdobro e uso em serrarias, uma vez que, na idade de corte utilizada, ao redor de 24 a 28 anos, as árvores não terão diâmetros suficientes para produzir sequer uma tora. Nesta situação, a solução é realizar o plantio para a produção de celulose, embora com rendimentos inferiores ao potencial que se pode obter na região, sem os problemas físicos descritos.



**Gráfico 7.** Relação entre a altura das árvores, resistência do solo e a água disponível no solo . n = 16. Abaixo, resultados da análise de regressão múltipla.

| dependente    | independente               | valor   | erro   | valor t | prob >  t |
|---------------|----------------------------|---------|--------|---------|-----------|
|               | resistência do solo [10cm] | - 1,080 | 0,435  | -2,484  | <0,02     |
| <b>Altura</b> | água disponível [20-30cm]  | 64,463  | 24,849 | 2,594   | <0,02     |
|               | Constante                  | 24,889  | 1,949  | 12,769  |           |

Equação de Regressão

$$\text{Altura [m]} = [64,463 * \text{água disponível}] - [1,080 * \text{resistência do solo}] + 24,889$$

R = 0,896

F = 26,488

F [13;2 p<0,001]=6,36

Associando ao que foi dito anteriormente, para que se possa aumentar a produtividade nessas 3 áreas, além da descompactação da área T3, da adubação nas áreas T1 e T2, os tratos silviculturais e o manejo através da poda e dos desbastes são imprescindíveis.

Para as demais áreas, a situação é diferente. Na área T3, é possível obter ganho em produtividade, com a descompactação do solo, anteriormente ao plantio. Para as áreas T1 e T2, é provável que maiores crescimentos possam ser obtidos através da adubação, embora não tão significativos como os ganhos que se pode obter na área T3.

**Tabela 12.** Resistência do solo a penetração das raízes, determinadas através do penetrógrafo, nas áreas estudadas. n = 28.

| Área | Profundidade do solo [cm] |             |             |
|------|---------------------------|-------------|-------------|
|      | 10                        | 20          | 30          |
|      | MPa                       |             |             |
| T1   | 1,04 ± 0,08               | 2,68 ± 0,21 | 3,17 ± 0,22 |
| T2   | 1,14 ± 0,27               | 2,08 ± 0,24 | 2,82 ± 0,28 |
| T3   | 3,28 ± 0,13               | 4,38 ± 0,37 | 4,81 ± 0,30 |
| T4   | 2,23 ± 0,19               | 3,75 ± 0,32 | 5,26 ± 0,07 |

Obs: dados médios ± erro padrão da média ( $p < 0,05$ ).

As correlações negativas entre as bases trocáveis do solo e o crescimento das árvores, em altura e diâmetro, não significam que as árvores crescem menos em solos com menores teores dessas bases. Na verdade, duas situações existentes contribuíram para a ocorrência desses resultados: a primeira situação é a conhecida lei do mínimo, onde as variáveis físicas do solo (água no solo e resistência à penetração das raízes) foram as variáveis que mais influenciaram o crescimento das árvores; a segunda é que justamente os solos com maior oferta desses nutrientes foram os solos onde se registrou os menores crescimentos (áreas T3 e T4).

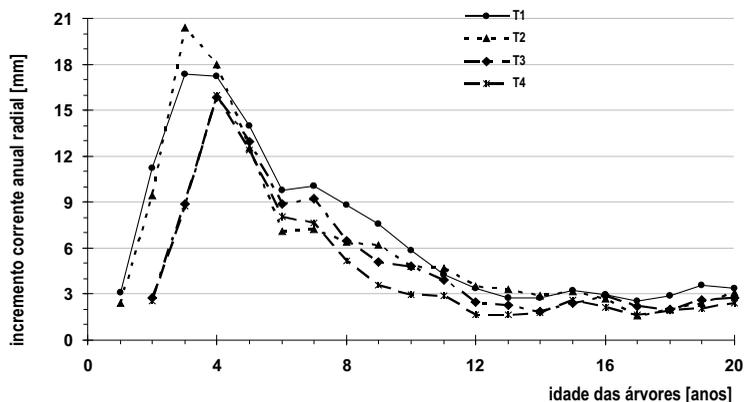
Além disso, existem outras implicações que devem ser mencionadas, principalmente aquelas relacionadas com o antagonismo e o sinergismo existente entre esses nutrientes e a interferência da matéria orgânica e da granulometria do solo, na absorção desses nutrientes pelas árvores (RAIJ,

1983; QUAGGIO. 1985; VITTI, 1987). Como os solos estudados mostraram variações dessas variáveis (Tabelas 3 e 4), é possível que tenham ocorrido interações entre elas que conduziram aos resultados obtidos.

## 5.2. Estrutura anatômica e densidade da madeira produzida

### 5.2.1 Incremento em diâmetro

Para a identificação, separação e obtenção dos dados quantitativos, referentes aos anéis de crescimento, foi utilizado o perfil densitométrico da varredura das radiografias das amostras de madeira. Assim, no Gráfico 8, é apresentado o incremento corrente anual radial de DAP das árvores, nas áreas avaliadas. Conforme mostra o Gráfico 8, em todas as áreas estudadas, as árvores tiveram um comportamento semelhante, isto é, sofreram um aumento no tamanho dos anéis até a idade de quatro anos e, a partir daí, uma diminuição até a idade de 12 anos, quando o incremento foi praticamente constante. Em todas as idades estudadas, não houve diferença estatística nas espessuras dos anéis das árvores nas áreas T1, T2 e T3. Entre a idade de 8 a 12 anos, foram observadas diferenças significativas apenas entre as árvores das áreas T1 e T4. É provável que o período de transição entre madeira juvenil e madeira adulta seja entre as idades de 4 a 12 anos, o que leva a supor que essa transição está mais diretamente ligada aos fatores bióticos das árvores do que com os fatores ambientais.

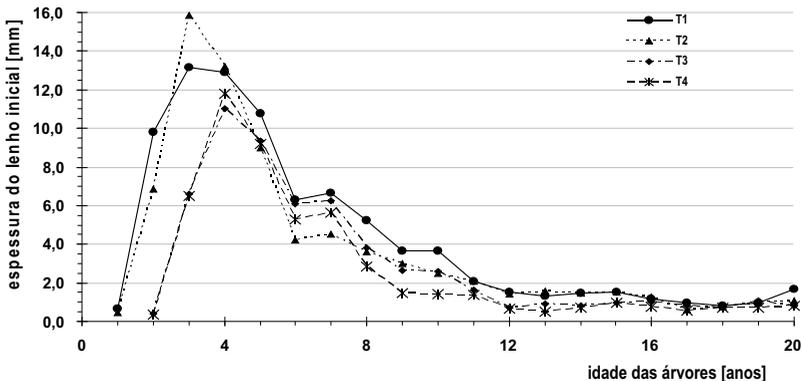


**Gráfico 8.** Incremento corrente anual radial, no sentido medula-casca, nos discos de madeira, do DAP das árvores de *Pinus taeda*, nas áreas estudadas

A espessura do lenho primaveril ou lenho inicial segue uma formatação semelhante ao incremento corrente anual radial, variando apenas em relação à espessura (Gráfico 9). Diferenças estatísticas foram observadas apenas entre os tratamentos T1 e T4, nas idades de 9 até 11 anos. Entre as idades 2 e 3 anos, as árvores das áreas T1 e T2 apresentaram diferenças estatísticas na espessura dos anéis com relação às árvores das áreas T3 e T4.

Também para o lenho inicial, o acréscimo da espessura aumenta até quatro anos, chegando a valores variando de 11 até 16 mm, a partir daí, decrescendo rapidamente até seis anos, chegando a valores próximos a 5 mm. Dos 6 aos 10 anos, observa-se uma queda menos acentuada e, após a idade de 12 anos, uma tendência de estabilização do incremento.

Os maiores incrementos observados até a idade de quatro anos são mais decorrentes de uma resposta de *Pinus taeda* às condições de sítio, à falta de competição por nutrientes e água entre as plantas e aos tratos silviculturais realizados durante o plantio. Após a idade de quatro anos, começa a ocorrer competição entre as árvores, por luz, água e nutrientes. Esta situação agrava-se com a falta de manejo, principalmente a poda dos galhos. A partir dos oito anos de idade, além da competição da copa das árvores, ocorre uma competição entre as árvores, e a não realização de desbaste agrava ainda mais o problema.



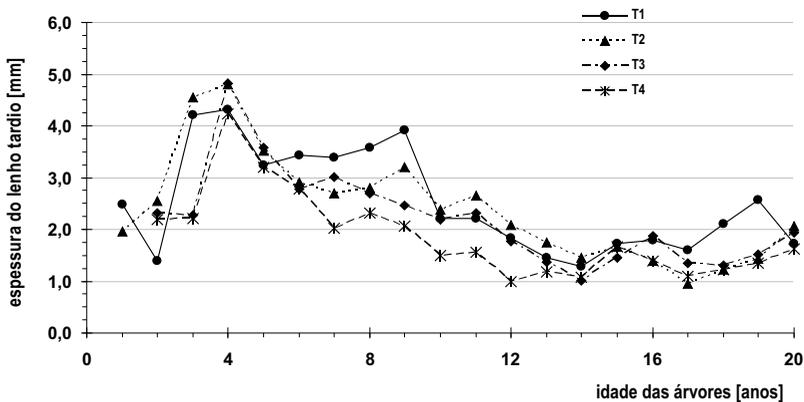
**Gráfico 9.** Espessura do lenho inicial, no sentido medula-casca, nos discos de madeira, do DAP das árvores de *Pinus taeda*, nas áreas estudadas.

Com relação à espessura do lenho outonal ou lenho tardio, embora tenham sido observadas pequenas variações entre os anéis das árvores de uma mesma

área, não foram observadas diferenças significativas quando a comparação foi entre as árvores das diferentes áreas estudadas (Gráfico 10).

Assim, em termos de média, a tendência dos anéis de crescimento no lenho tardio é o aumento da espessura até a idade de quatro anos, crescendo de cerca de 2 até 4,5 mm de espessura. Entre 4 e 12 anos de idade, observou-se uma diminuição da espessura até valores médios de 1,5 mm. A partir daí, mantém-se esse incremento corrente anual até a idade de 20 anos. De uma forma geral, o incremento corrente anual dos anéis de crescimento, quer seja pela somatória dos lenhos, quer seja para o lenho inicial ou para o lenho tardio, teve comportamento semelhante em todas as áreas estudadas. Inicialmente, ocorreu um incremento em espessura seguido de uma redução até atingir um valor constante de incremento anual.

Sabe-se que a madeira é produzida num ciclo anual, por uma camada de tecido regenerativo cambial e que se situa no interior da casca. A cada estação de crescimento, uma nova camada de tecido lenhoso é sobreposta à madeira existente. Esta constante atividade resulta na formação do lenho.



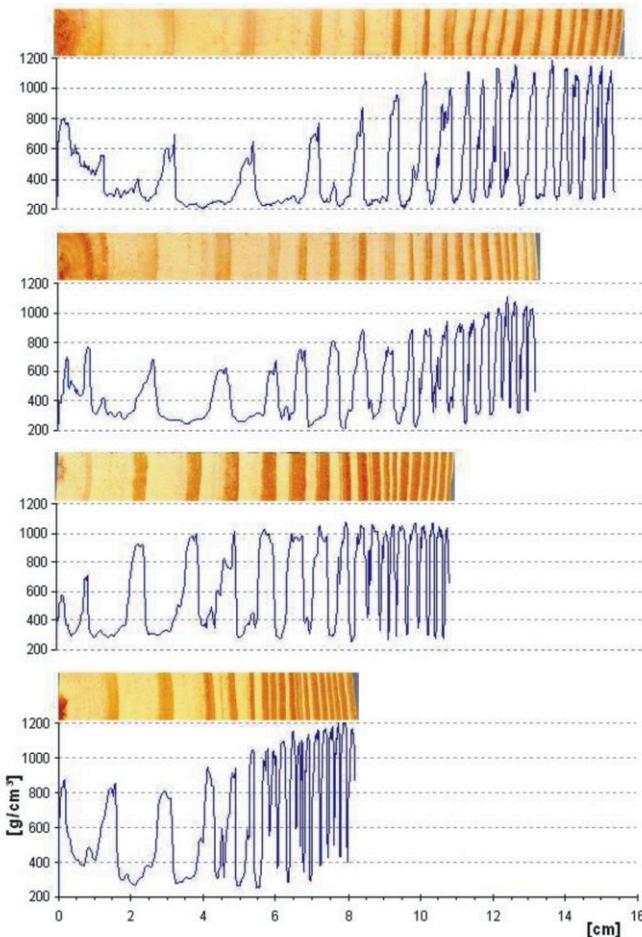
**Gráfico 10.** Espessura do lenho tardio, no sentido medula-casca, nos discos de madeira, do DAP das árvores de *Pinus taeda*, nas áreas estudadas.

Pelo fato desses plantios terem sido realizados na mesma época, sob as mesmas condições de clima, pode-se concluir que as variações observadas na espessura dos anéis e no incremento anual em diâmetro (já discutido anteriormente, Gráfico 5), são decorrentes dos atributos físicos e químicos do solo, associados à densidade inicial de plantio e ao desbaste realizado nas áreas T1 e T2.

### 5.2.2 Densidade específica da madeira

A varredura das radiografias das amostras de todas as árvores estudadas forneceu os perfis densitométricos, na posição do DAP. Para efeito ilustrativo, foi selecionada uma árvore representativa de cada área estudada, o qual é apresentado no Gráfico 11.

Conforme mostra o Gráfico 11, o crescimento radial das árvores variou significativamente, tendo as árvores de menor crescimento atingido um comprimento de cerca de 8 cm, e as árvores de maior crescimento um comprimento de cerca de 15 cm, variação esta já discutida anteriormente.

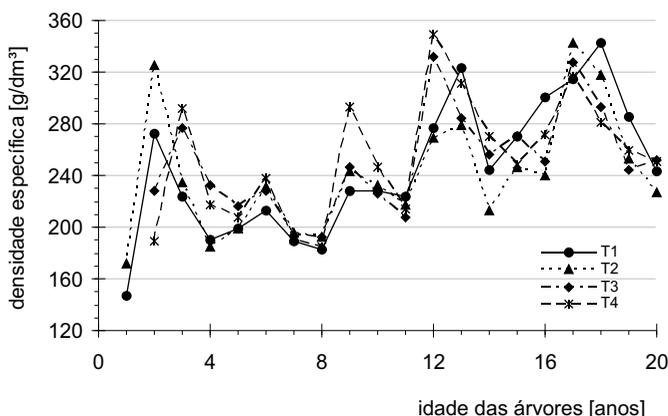


**Gráfico 11.** Perfil densitométrico da variação da densidade radial, no sentido medula-casca, e respectivas imagens das seções da madeira das árvores de *Pinus taeda*, das diferentes áreas estudadas.

De uma maneira geral, a variação da densidade específica da madeira, mostrada pelo perfil densitométrico, indica a existência de três tipos de madeira. O primeiro tipo de madeira, restrita à região interna do tronco, ocupa os primeiros anéis de crescimento, e é caracterizado pelos menores valores de densidade, tanto no lenho inicial como no lenho tardio e associado com a madeira juvenil. O segundo tipo de madeira está localizado na região intermediária do lenho e apresenta variações graduais, e sem uma orientação definida nos picos de densidade, definida como madeira de transição. O terceiro tipo, definido como madeira adulta, inicia-se a partir do 12º anel e mostra valores maiores de densidade.

Essas variações observadas na densidade sugerem que a madeira juvenil é formada durante os primeiros 3-4 anos de idade das árvores; e a madeira adulta a partir da idade de 12 anos. Larson, et al., (2001) observaram que a formação da verdadeira madeira juvenil em *Pinus taeda* ocorre até a idade de três anos. Para essa mesma espécie, Bendtsen & Senft (1986) indicam que até os 12 anos de idade, as árvores apresentam madeira juvenil e que, a partir dessa idade, começam a formar madeira adulta.

Ainda, com relação aos perfis densitométricos, observa-se nítida diferenciação entre as densidades que ocorrem nos lenhos inicial e tardio. Para o lenho inicial, Gráfico 12, a densidade mínima oscilou bastante durante o crescimento, registrando valores sempre crescentes de 150 até 320 g.dm<sup>-3</sup>, embora, com essa oscilação, os valores tendem a ser crescentes, no sentido medula casca.



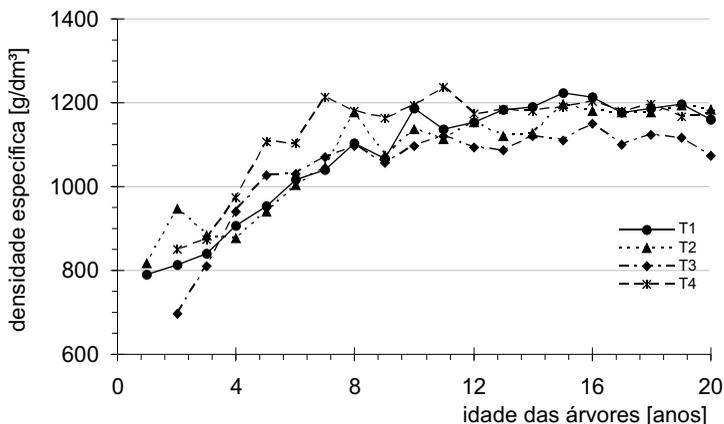
**Gráfico 12.** Variação radial da densidade específica mínima do lenho inicial nos anéis de crescimento, sentido medula-casca, de árvores de *Pinus taeda* com 20 anos de idade, plantados nas diferentes áreas.

Pela tendência dos dados, pode-se observar dois comportamentos distintos. Nos primeiros dez anéis, a densidade mínima foi praticamente constante. A partir daí, até a formação do último anel, houve uma pequena, mas constante, elevação na densidade. A densidade mínima inicial situou-se ao redor de  $200 \text{ g dm}^{-3}$ , e após, com aumentos sucessivos, atingiu  $320 \text{ g.dm}^{-3}$ . Estas variações radiais de densidade são típicas e estão ligadas às diferenças de madeira juvenil e adulta (Mcgraw, 1985).

Ao comparar os picos de densidade observados nos anéis de crescimento com os dados do Gráfico 2, observa-se que nestes anos foram registradas as menores precipitações pluviométricas ocorridas durante o ciclo de crescimento das árvores. Estes resultados mostram claramente o efeito da disponibilidade de água na densidade da madeira, e está de acordo com trabalhos desenvolvidos por diversos pesquisadores, dentre eles Ohta (1981), citado por Rigatto (2002) e Pereira (1982).

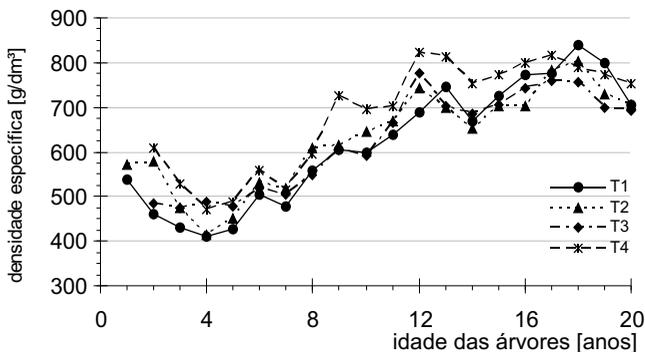
Para o lenho tardio, isso não ocorreu, Gráfico 13. Os picos de densidade, neste lenho, apresentaram pequenas variações, sem diferenças significativas. Para as árvores de todas as áreas estudadas, o comportamento da densidade foi semelhante e bastante homogêneo, mostrando um crescimento exponencial radial, no sentido medula-casca. Em valores, a densidade aumentou do primeiro até o 12º anel, de cerca de  $800$  até  $1.100 \text{ g.dm}^{-3}$ , tendendo a estabilizar a partir daí. Embora os valores observados não tenham mostrado diferenças estatísticas significativas, a densidade máxima nas árvores da área T4, até a idade de 12 anos, foram ligeiramente superiores aos valores observados nas demais áreas estudadas.

Considerando a média de todas as árvores, a densidade máxima apresentou comportamento polinomial, atingindo o valor de  $938 \text{ g.dm}^{-3}$ , aos 12 anos de idade. Estes valores são semelhantes aos obtidos por Amaral (1994), trabalhando com a mesma espécie.



**Gráfico 13.** Variação radial da densidade específica máxima no lenhotardio nos anéis de crescimento, sentido medula-casca, de árvores de *Pinus taeda* com 20 anos de idade, plantadas nas diferentes áreas.

A análise da densidade específica média nos anéis de crescimento, sentido medula-casca, apresentou comportamento conforme apresentado no Gráfico 14. Ocorreu inicialmente uma queda da densidade do primeiro para o quarto anel, no valor de 575 até 450 g.dm<sup>-3</sup>. A partir daí, até o décimo anel, ocorreu uma elevação para cerca de 750 g.dm<sup>-3</sup>, a qual sofreu pequenas oscilações até a formação do último anel.



**Gráfico 14.** Variação radial da densidade específica média da madeira das árvores de *Pinus taeda* com 20 anos de idade, plantados nas diferentes áreas.

A classe de menor diâmetro, representada pelas árvores da área T4, apresentou densidades médias ligeiramente superiores, embora não diferindo estatisticamente das demais áreas. Esse resultado é devido simplesmente à maior quantidade de lenho tardio existente proporcionalmente nas árvores de menor crescimento, conforme discutido anteriormente. Conforme destaca Larson (1969), o lenho inicial é formado na estação de crescimento primavera-verão, portanto, dependente de água e nutrientes para a produção de hormônios e carboidratos. Como a área T4 apresenta maiores limitações de água, produz menor quantidade de compostos orgânicos, o que interfere na formação do lenho. Por ocasião da formação do lenho tardio, período outono-inverno, a disponibilidade de água é menor em todas as áreas e, desta forma, a interferência na formação deste lenho é menor.

Outro parâmetro importante relacionado à densidade das árvores é o índice de uniformidade descrito por Echols (1973) e apresentado na Tabela 13. Este índice está relacionado com as variações da densidade da madeira no sentido medula-casca, ou seja, quanto maiores as variações radiais de densidade, maiores são os valores do índice. Quanto maior é o índice, menos uniforme é a madeira, portanto maiores são as perdas durante os processos de transformação, quer seja para aplicações específicas, quer seja utilizada como madeira sólida ou transformada.

**Tabela 13.** Valores máximos, mínimos e médios de densidade específica, DAP e Índice de Uniformidade da madeira das árvores de *P.taeda*, plantadas nas diferentes áreas.

| área | árvore nº | DAP<br>[média: 22,0 cm] | Densidade específica da madeira<br>[média = 639,0 g/dm <sup>3</sup> ] |        |       | Uniformidade das amostras<br>[média = 490] |
|------|-----------|-------------------------|---|--------|-------|--|
|      |           |                         | mínima  | máxima | média |  |
|      |           | [cm]                    | [g/dm <sup>3</sup> ]  |        |       | nº   |
| T1   | 1         | 27,5                    | 190   | 1099   | 561   | 538  |
|      | 2         | 27,2                    | 235   | 1078   | 648   | 494  |
|      | 3         | 28,3                    | 284   | 1051   | 634   | 466  |
|      | 4         | 26,4                    | 271   | 1081   | 631   | 509  |
|      | média     | 27,4                    | 245   | 1077   | 619   | 502  |
| T2   | 1         | 25,2                    | 214   | 958    | 549   | 430  |
|      | 2         | 24,7                    | 263   | 1123   | 673   | 502  |
|      | 3         | 24,0                    | 211   | 1148   | 615   | 527  |
|      | 4         | 25,1                    | 276   | 1076   | 682   | 420  |
|      | média     | 24,8                    | 241   | 1076   | 630   | 469  |
| T3   | 1         | 20,4                    | 185   | 912    | 521   | 439  |
|      | 2         | 19,3                    | 274   | 1095   | 649   | 495  |
|      | 3         | 19,5                    | 294   | 1058   | 645   | 460  |
|      | 4         | 21,0                    | 248   | 1129   | 684   | 535  |
|      | média     | 20,0                    | 250   | 1048   | 625   | 482  |
| T4   | 1         | 17,6                    | 227   | 1012   | 621   | 483  |
|      | 2         | 17,9                    | 259   | 1170   | 653   | 496  |
|      | 3         | 16,9                    | 268   | 1132   | 717   | 495  |
|      | 4         | 17,8                    | 275   | 1221   | 743   | 546  |
|      | média     | 17,5                    | 257   | 1134   | 683   | 505  |

Na Tabela 13, são apresentados os índices de uniformidade obtidos para as árvores, de todas as áreas estudadas. Em relação às diferentes áreas, as densidades máximas, mínimas e médias tiveram variações bastante semelhantes, resultando, com isso, índices de uniformidade, com pouca variação. Isto mostra que inexistência de influência dos atributos físicos e químicos do solo na homogeneidade da densidade das árvores.

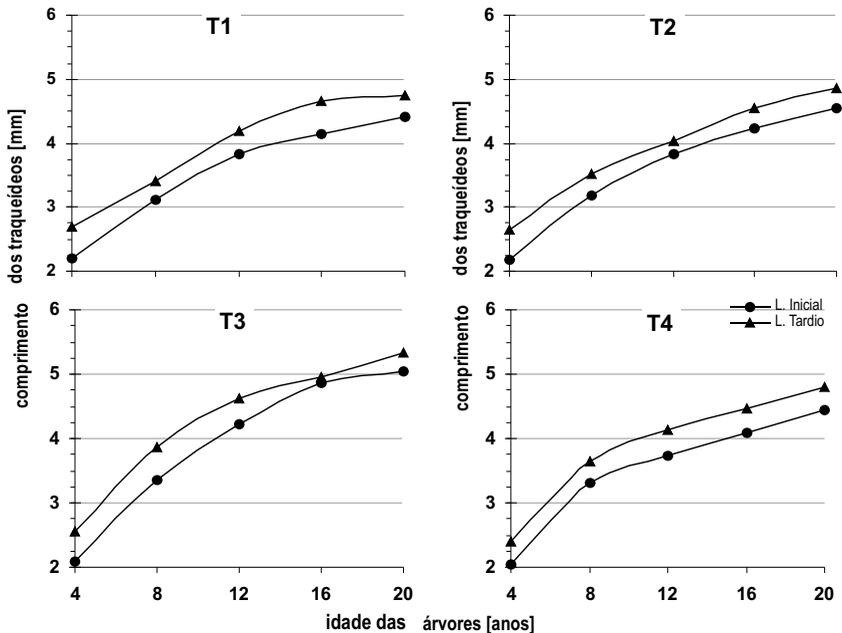
Embora os valores obtidos sejam estatisticamente iguais, os valores encontrados são bastante superiores aos valores observados por Echols (1973), para outras espécies (223, 240 e 317, respectivamente para árvores de *Pinus contorta*, *Pinus ponderosa* e *Pseudotsuga menziesii*), e por Alzate (2004), que observou valores inferiores a 50 para diversos clones de *Eucalyptus*.

Os altos valores de índice de uniformidade obtidos, característicos das coníferas, conferem a esta espécie características de madeira com elevada heterogeneidade no sentido medula-casca, principalmente pelo fato dos lenhos inicial e tardio serem muito diferentes. A quantidade, tipo e velocidade na formação das células do lenho tardio apresentam grande efeito na qualidade da madeira produzida e nos produtos dela derivados (AMARAL, 1994). De acordo com Louzada (1990), para a maioria das indústrias de transformação, são preferidas as madeiras com maior uniformidade de densidade nos anéis.

### **5.2.3 Características morfológicas dos traqueídeos**

Para as avaliações das dimensões dos traqueídeos (ou das fibras) como comprimento, largura, espessura das paredes e diâmetro do lúmen, realizadas neste trabalho, foram utilizados os anéis de crescimento no DAP, correspondentes às idades das árvores de 4, 8, 12, 16 e 20 anos. No Gráfico 15, é apresentado o comprimento médio das fibras, para as árvores das diferentes áreas estudadas.

Os resultados obtidos mostram não haver diferenças no comprimento das fibras do lenho inicial e do lenho tardio, nas idades de 4 e 8 anos, para as árvores de todas as áreas. As fibras do lenho tardio, das árvores na área T3, apresentaram maior comprimento apenas em relação às árvores da área T4. Nas idades de 12 até 20 anos, as fibras do lenho inicial nas árvores da área T3 apresentaram comprimento maior estatisticamente do que as árvores das demais áreas. Neste lenho, o comprimento menor dos traqueídeos, nas árvores de maior crescimento, pode estar relacionado com o ritmo de crescimento das árvores. Conforme enfatizado por Nicholls (1971), o comprimento das fibras é influenciado, principalmente, pela taxa de divisões transversais do câmbio. Sob um ritmo maior de crescimento, essa taxa de divisão impede o desenvolvimento total dos traqueídeos, diminuindo, em consequência disso, o seu ritmo de crescimento.



**Gráfico 15.** Variação radial no comprimento dos traqueídeos, da madeira de *Pinus taeda*, plantados nas diferentes áreas.

O aumento no comprimento dos traqueídeos, em função da idade, assim como os valores obtidos tanto para o lenho tardio como para o lenho inicial, situa-se dentro dos valores encontrados por outros pesquisadores, como Koch (1972), Bolzon de Muñiz (1993) e Rigatto (2002).

Diferente dos resultados obtidos por Rigatto (2002), o comprimento dos traqueídeos não guardou relação com a fertilidade do solo, com a textura e tampouco com o crescimento das árvores, mostrando que, para as áreas estudadas, não houve influência dos atributos do solo no comprimento dos traqueídeos.

Os valores relativos à largura dos traqueídeos, para ambos os lenhos avaliados, não mostraram variação estatística significativa entre as árvores, nas diferentes áreas estudadas (Tabela 14). A comparação entre os lenhos mostra que a largura dos traqueídeos no lenho inicial é superior à largura observada no lenho tardio.

**Tabela 14.** Variação radial da largura média dos traqueídeos, da madeira de *Pinus taeda*, plantados nas diferentes áreas.

| Idade das árvores [anos] | Largura dos traqueídeos [ $\mu\text{m}$ ] |      |      |      |                 |              |      |      |      |                 |
|--------------------------|---|------|------|------|-----------------|--------------|------|------|------|-----------------|
|                          | Lenho Inicial                             |      |      |      | Anova<br>P<0,01 | Lenho tardio |      |      |      | Anova<br>P<0,01 |
|                          | T1  | T2   | T3   | T4   |                 | T1           | T2   | T3   | T4   |                 |
| 4                        | 49,9                                      | 49,0 | 48,8 | 48,8 | n.s.            | 41,6         | 41,0 | 40,4 | 41,5 | n.s.            |
| 8                        | 56,3                                      | 61,6 | 58,3 | 52,9 | n.s.            | 42,0         | 46,3 | 44,2 | 40,9 | n.s.            |
| 12                       | 54,6                                      | 48,7 | 52,3 | 47,8 | n.s.            | 43,2         | 44,7 | 46,1 | 43,5 | n.s.            |
| 16                       | 54,9                                      | 55,2 | 55,4 | 52,5 | n.s.            | 42,7         | 46,1 | 46,8 | 41,1 | n.s.            |
| 20                       | 57,1                                      | 53,3 | 55,1 | 55,7 | n.s.            | 42,6         | 44,7 | 45,6 | 43,1 | n.s.            |

Diferente do observado para o comprimento, a largura dos traqueídeos não apresentou um modelo definido de variação no sentido medula-casca. Resultados muito contraditórios são encontrados na literatura, para a variação da largura das fibras em função do aumento no ritmo de crescimento. Ainda, conforme a Tabela 14, para as árvores de todas as áreas, na idade de 8 anos, houve uma elevação brusca na largura dos traqueídeos, seguido de uma queda nesses valores, na idade seguinte. A mesma situação pode ser observada na Tabela 15, quando se analisa os valores de diâmetro médio do lúmen, no lenho inicial. Essas variações são semelhantes às observadas por Correa (1995), para *Pinus Caribaea* var. *hondurensis*.

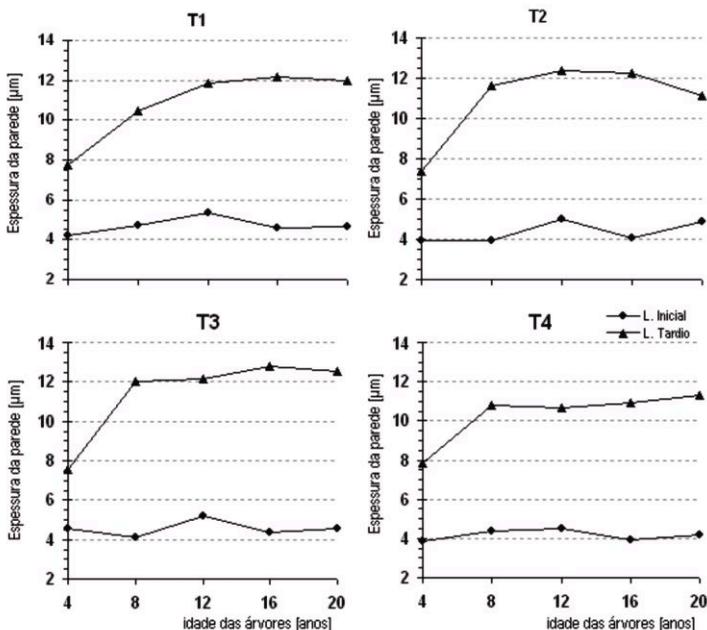
**Tabela 15.** Variação radial no diâmetro médio do lúmen dos traqueídeos, da madeira de *Pinus taeda*, plantados nas diferentes áreas.

| idade das árvores [anos] | diâmetro do lúmen [ $\mu\text{m}$ ] |      |      |      |                 |              |      |      |      |                 |
|--------------------------|-------------------------------------|------|------|------|-----------------|--------------|------|------|------|-----------------|
|                          | lenho Inicial                       |      |      |      | Anova<br>P<0,01 | lenho tardio |      |      |      | Anova<br>P<0,01 |
|                          | T1                                  | T2   | T3   | T4   |                 | T1           | T2   | T3   | T4   |                 |
| 4                        | 41,6                                | 41,2 | 40,0 | 41,1 | n.s.            | 26,0         | 26,3 | 25,2 | 25,8 | n.s.            |
| 8                        | 46,8                                | 53,7 | 50,2 | 44,2 | n.s.            | 21,0         | 23,1 | 20,2 | 19,3 | n.s.            |
| 12                       | 43,9                                | 38,7 | 40,6 | 38,8 | n.s.            | 19,5         | 20,0 | 21,9 | 23,7 | n.s.            |
| 16                       | 45,7                                | 47,0 | 46,7 | 44,6 | n.s.            | 18,4         | 21,6 | 21,2 | 19,3 | n.s.            |
| 20                       | 47,8                                | 43,6 | 46,0 | 47,3 | n.s.            | 18,7         | 22,4 | 20,6 | 20,5 | n.s.            |

De acordo com Larson et al. (2001), essas variações, tanto na largura da parede como no diâmetro do lúmen, caracterizam os traqueídeos de transição entre a madeira juvenil e a madeira adulta. Ainda, segundo este autor, a zona de transição não é somente isso, mas também é a maior determinante na qualidade da madeira. Nessa fase, as fibras formadas no lenho inicial apresentam lúmen grande, paredes estreitas e estrutura débil e uma redução dos anéis de crescimento das árvores, podendo reduzir a quantidade de lenho inicial formado, o qual é mais afetado do que o lenho tardio.

Os valores obtidos para a espessura da parede dos traqueídeos mostraram um comportamento típico para a espécie (Gráfico 16). Para o lenho inicial, foram observados valores com pequena variação, no sentido medula-casca, para as árvores das áreas estudadas.

Para o lenho tardio, a variação foi significativa no sentido medula-casca, aumentando substancialmente de 4 para 12 anos e, a partir daí, praticamente constante. Para este lenho, é interessante notar que as árvores da área T4 apresentaram valores inferiores de espessura da parede dos traqueídeos, embora não significativos, estatisticamente, do que as demais áreas.



**Gráfico 16.** Variação radial na espessura média da parede dos traqueídeos, da madeira de *Pinus taeda*, plantados nas diferentes áreas.

No geral, pode-se dizer que a espessura da parede e a largura dos traqueídeos são as variáveis determinantes da porcentagem de lenho tardio. Os traqueídeos do lenho inicial são grandes e com espessura relativamente pequena das paredes, enquanto que os traqueídeos no lenho tardio são mais estreitos em largura, mas com maior espessura das paredes. Como a largura dos traqueídeos não apresenta uma variação significativa, quer em função do crescimento das árvores, quer em função da idade do anel de crescimento (Tabela 14), essa variável, segundo Larson et al., (2001), não tem significado algum para estudos de qualidade da madeira.

Como não houve diferença significativa para as variáveis espessura da parede dos traqueídeos e diâmetro do lúmen das árvores, das diferentes áreas estudadas, pode-se afirmar estatisticamente que as variações de crescimento das árvores, tanto em diâmetro como em altura, observadas nos diferentes locais estudados, não foram suficientes para alterar a qualidade da madeira. Para essas variáveis, a madeira produzida nas diferentes áreas apresentou as mesmas propriedades.

Com relação ao comprimento das fibras, os resultados mostram que existe variação e que as árvores que menos cresceram (área T4), tanto em diâmetro como em altura, apresentaram comprimentos menores dos traqueídeos do lenho inicial e do lenho tardio na madeira adulta, isto é, a partir da idade de 12 anos. Estes resultados mostram que o solo da área T4 é o de maior fertilidade e, portanto, estão de acordo com as observações feitas por Rigatto (2002). Entretanto, nesta área, as árvores apresentaram menor desenvolvimento e, por isso, os resultados diferem dos obtidos por Tsoumis & Panagiotidis (1980). Em uma primeira análise, pode-se concluir que as observações anteriores são conflitantes, pois solos férteis e crescimento vegetal apresentam normalmente correlação positiva. Mas, analisando-se os resultados obtidos, observa-se que, embora os solos da área T3 sejam os mais férteis quimicamente, não são esses os atributos do solo que estão influenciando no crescimento das árvores, e sim a água disponível, a resistência à penetração das raízes e a profundidade do solo dessa área. Com estas observações, pode-se supor que estes atributos químicos do solo podem ter interferido indiretamente no desenvolvimento dos traqueídeos.

#### **5.2.4 Correlações entre o crescimento das árvores, a densidade da madeira e as dimensões dos traqueídeos**

As correlações entre a densidade específica da madeira e as variáveis

dendrométricas encontram-se na Tabela 16. Todas as correlações efetuadas foram significativas estatisticamente. Para o incremento em altura, foram observadas correlações positivas, e correlações negativas para o incremento corrente anual. Os resultados apresentados mostram que a densidade aumenta quando aumenta o incremento anual e diminui quando aumenta o incremento corrente anual.

Todas as correlações observadas para a densidade mínima, embora significativas estatisticamente, mostraram apenas uma tendência de aumento ou diminuição da densidade com o incremento em diâmetro e altura das árvores. As mesmas considerações são feitas para a densidade média no lenho inicial.

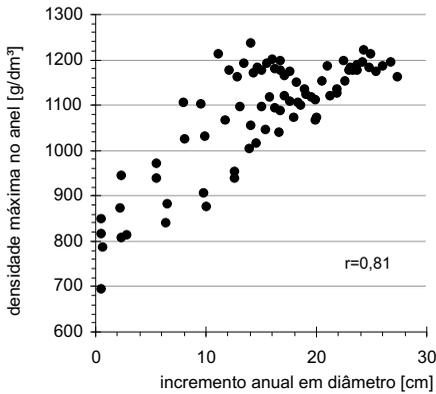
**Tabela 16.** Coeficiente de correlação linear ( $r$ ) entre o incremento anual (I.A.) e o corrente anual (I.C.A.) em altura e diâmetro (DAP) com a densidade específica da madeira. [n = 80]

| variáveis                 |          | densidade |        |        | densidade média |        |
|---------------------------|----------|-----------|--------|--------|-----------------|--------|
|                           |          | anel      |        |        | lenho           |        |
|                           |          | média     | mínima | máxima | inicial         | tardio |
| incremento anual          | altura   | 0,82      | 0,46   | 0,84   | 0,42            | 0,82   |
|                           | diâmetro | 0,67      | 0,35   | 0,81   | 0,32            | 0,76   |
| incremento corrente anual | altura   | -0,74     | -0,47  | -0,49  | -0,47           | -0,51  |
|                           | diâmetro | -0,84     | -0,43  | -0,58  | -0,45           | -0,61  |

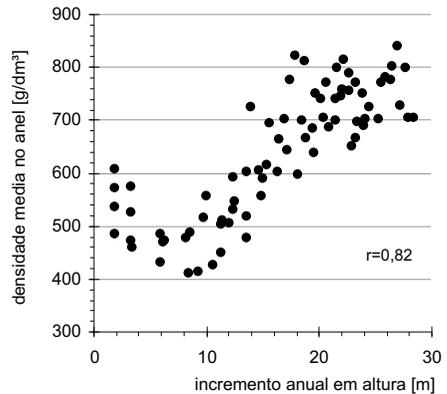
$p < 0,01$  para valores de  $|r| > 0,29$

A densidade média e a máxima no anel, assim como a densidade média no lenho tardio, apresentaram correlações bastante estreitas com o incremento anual em diâmetro e altura das árvores. Os Gráficos 17 e 18, apresentados a seguir, ilustram estas correlações.

Durante o crescimento em diâmetro, a densidade máxima no anel aumentou de 800 para 1.200 g.dm<sup>-3</sup>, do primeiro para o vigésimo ano de crescimento das árvores. A densidade média da madeira decresceu até a árvore atingir cerca de 8 metros de altura, o que corresponde à idade de cerca de 4 anos. Entre 8 e 10 metros, aproximadamente, ocorreu um período de transição e, a partir daí, até atingir a altura total, o aumento da densidade média foi linear, variando de 450 para 800 g.dm<sup>-3</sup>.



**Gráfico 17.** Correlações simples entre a densidade máxima no anel e o incremento anual em diâmetro, [no DAP], de *Pinus taeda* com 20 anos de idade.



**Gráfico 18.** Correlações simples entre a densidade média no anel e o incremento anual em altura, de *Pinus taeda* com 20 anos de idade.

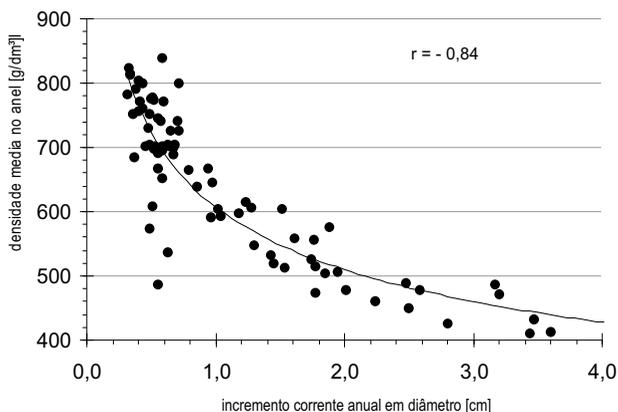
Uma explicação para a diminuição da densidade média ocorrida até a idade de 4 anos pode estar relacionada com o ritmo de crescimento das árvores e com o tipo de madeira formada. Assim, conforme já mostrado, além de existir apenas madeira juvenil, os anéis de crescimento formados neste período apresentam um volume de lenho inicial bem superior ao do lenho tardio.

Já o Gráfico 19 exemplifica o que ocorre entre a densidade da madeira e o incremento corrente anual. Para o incremento corrente em diâmetro e a densidade média no anel foi observado uma estreita e forte correlação negativa.

O gráfico mostra uma tendência exponencial de diminuição nos valores da densidade específica da madeira com o aumento da espessura dos anéis. Anéis com espessura menor que 1 cm são os que apresentaram os maiores valores de densidade média. Entre 1 e 2 cm, é observado uma queda brusca dos valores de densidade. Anéis com largura acima de 2,5 cm apresentam uma tendência de maior homogeneidade da densidade.

Esses resultados encontrados são bastante enfatizados na literatura e estão diretamente relacionados com a proporção de lenho inicial e lenho tardio (KOCH, 1972; BARRICHELLO, 1979; LARSON et al, 2001). Assim, os resultados mostram claramente que, durante os primeiros anos de idade, os anéis são mais largos e com maior proporção de lenho inicial, devido às

condições inerentes ao potencial de crescimento da espécie associado com as condições de sítios e práticas silviculturais realizadas. À medida que as árvores crescem, diminui a espessura dos anéis e aumenta a proporção de lenho tardio, crescendo, conseqüentemente, a densidade média da madeira.



**Gráfico 19.** Correlações simples entre a densidade média no anel e o incremento corrente anual em diâmetro [no DAP] de *Pinus taeda* com 20 anos de idade.

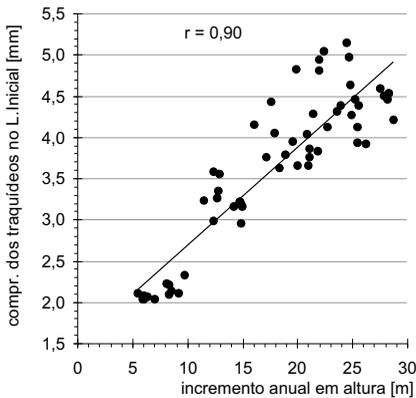
Assim como ocorre para a densidade, também são observadas correlações entre as variáveis dendrométricas e as dimensões dos traqueídeos (Tabela 17). O comprimento dos traqueídeos, tanto no lenho inicial como no lenho tardio, e a espessura da parede dos traqueídeos tiveram comportamento semelhante ao das correlações de densidade média obtidas.

**Tabela 17.** Coeficiente de correlação linear ( $r$ ) entre o incremento anual (I.A.) e o corrente anual (I.C.A.) em altura e diâmetro (DAP) com as dimensões dos traqueídeos. [n = 60]

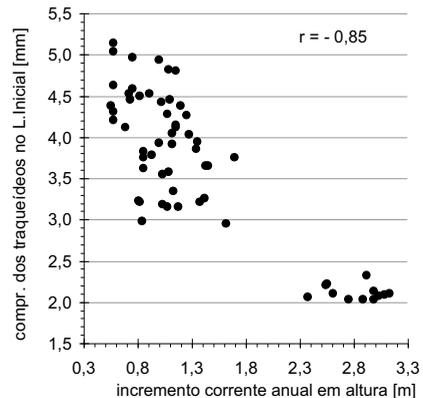
| variáveis                 |          | traqueídeos   |               |                |                |              |               |                |                |
|---------------------------|----------|---------------|---------------|----------------|----------------|--------------|---------------|----------------|----------------|
|                           |          | lenho inicial |               |                |                | lenho tardio |               |                |                |
|                           |          | compr.        | largura fibra | diâmetro lúmen | espess. parede | compr.       | largura fibra | diâmetro lúmen | espess. parede |
| incremento anual          | altura   | 0,90          | 0,29          | 0,22           | 0,21           | 0,90         | 0,27          | -0,53          | 0,61           |
|                           | diâmetro | 0,79          | 0,35          | 0,25           | 0,28           | 0,79         | 0,29          | -0,53          | 0,62           |
| incremento corrente anual | altura   | -0,85         | -0,44         | -0,36          | -0,14          | -0,85        | -0,34         | 0,55           | -0,67          |
|                           | diâmetro | -0,88         | -0,35         | -0,26          | -0,23          | -0,88        | -0,35         | 0,58           | -0,70          |

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

Essas estreitas correlações observadas mostram que, com o crescimento das árvores, tanto em altura como em diâmetro, ocorre um aumento no comprimento das fibras e na espessura das paredes dos traqueídeos no lenho tardio. Além disso, como existe uma relação inversa entre a espessura das paredes e o diâmetro do lúmen, os resultados obtidos mostram correlações significativas entre o diâmetro do lúmen e os dados dendrométricos. Entre o comprimento dos traqueídeos e o incremento anual ocorre uma positiva e estreita correlação linear. Para o incremento corrente anual, foi observada uma correlação negativa e uma tendência exponencial (Gráficos 20 e 21). O comprimento dos traqueídeos tem uma importância especial para o processo industrial de produção de celulose e papel. De acordo com Larson et al. (2001), o comprimento dos traqueídeos tem pouca ou nenhuma importância para as avaliações estruturais dos produtos originários da madeira. De qualquer maneira, as correlações observadas para o comprimento dos traqueídeos estão intimamente relacionadas com os diversos estágios do desenvolvimento das árvores, principalmente pela taxa de divisão transversal no câmbio. A frequência nessas divisões é influenciada pelos fatores ambientais, solo e clima e, conseqüentemente, pelo ritmo de crescimento das árvores (NICHOLLS, 1971).



**Gráfico 20.** Correlações simples entre o comprimento dos traqueídeos no lenho inicial e o incremento anual em altura, de *Pinus taeda* com 20 anos de idade.



**Gráfico 21.** Correlações simples entre o comprimento dos traqueídeos no lenho inicial e o incremento anual em altura, de *Pinus taeda* com 20 anos de idade.

Como a densidade específica da madeira mantém correlação estreita com o ritmo de crescimento e com a idade das árvores, conforme visto anteriormente, eram esperadas correlações significativas entre a densidade e o comprimento dos traqueídeos. Os resultados da Tabela 18 confirmam isso. Embora esperadas, de acordo com McGraw (1985), os fatores que governam as variações no comprimento dos traqueídeos e a densidade da madeira são diferentes. Enquanto a densidade não depende da razão de crescimento das árvores, o comprimento das fibras é diretamente afetado por ela. A literatura existente sobre as correlações entre densidade, dimensões de traqueídeos e taxas de crescimento das árvores é extensa. Trabalhos recentes, desenvolvidos por McGraw (1985) e Larson et al. (2001), discutem essas correlações e mostram que, com algumas variações, as correlações apresentam uma mesma tendência. Para densidade, comprimento dos traqueídeos e espessura da parede do lenho tardio, os resultados encontrados neste trabalho são similares aos descritos na literatura.

**Tabela 18.** Coeficiente de correlação linear(r) entre os valores de densidade específica nos lenhos e o comprimento dos anéis com as dimensões dos traqueídeos. [n = 60]

| variáveis           |           | traqueídeos   |               |                |                |              |               |                |                |
|---------------------|-----------|---------------|---------------|----------------|----------------|--------------|---------------|----------------|----------------|
|                     |           | lenho inicial |               |                |                | lenho tardio |               |                |                |
|                     |           | compr.        | largura fibra | diâmetro lúmen | espess. parede | compr.       | largura fibra | diâmetro lúmen | espess. parede |
| densidade nos anéis | média     | 0,79          | 0,03          | -0,04          | 0,24           | 0,77         | 0,25          | -0,51          | 0,58           |
|                     | mínima    | 0,39          | -0,31         | -0,37          | 0,33           | 0,38         | 0,05          | -0,15          | 0,16           |
|                     | máxima    | 0,62          | 0,36          | 0,32           | 0,04           | 0,61         | 0,26          | -0,61          | 0,65           |
| densidade           | l.inicial | 0,43          | -0,25         | -0,33          | 0,40           | 0,40         | 0,13          | -0,18          | 0,24           |
|                     | l.tardio  | 0,51          | 0,27          | 0,24           | 0,01           | 0,50         | 0,24          | -0,55          | 0,59           |
| comprimento         | l.inicial | -0,89         | -0,34         | -0,24          | -0,27          | -0,88        | -0,37         | 0,60           | -0,73          |
|                     | l.tardio  | -0,76         | -0,36         | -0,31          | -0,10          | -0,77        | -0,30         | 0,45           | -0,57          |
|                     | anel      | -0,89         | -0,35         | -0,26          | -0,24          | -0,88        | -0,36         | 0,58           | -0,72          |

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

Os resultados obtidos deixam claro que a formação da madeira é bastante complexa e depende de uma série de processos fisiológicos inerentes à própria árvore, da variabilidade de seu genótipo, dos fatores ambientais e das interações existentes, em maior ou menor grau, dessas variáveis. Assim, a densidade pode variar entre espécies do mesmo gênero e árvores de uma mesma espécie (BARRICHELLO, 1983) por modificações no meio físico como clima, solo, altitude, umidade do solo, e por interferências silviculturais como poda, desbaste, densidade do povoamento e outros. As dimensões dos traqueídeos são influenciadas pela taxa de crescimento anual, que depende do meio físico, idade das árvores, tipo de lenho e atividade cambial.

### 5.3. Dendronutrição

#### 5.3.1 Correlações entre o crescimento das árvores e os nutrientes minerais no lenho.

As correlações simples obtidas entre as variáveis dendrométricas e os teores de nutrientes minerais no lenho de *Pinus taeda*, em função da idade, são apresentadas na Tabela 19. Correlações significativas foram observadas para Ca, Mg e Mn.

**Tabela 19.** Coeficiente de correlação linear(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 |
| <b>N</b>  | 0,09             | 0,04  | 0,28   | -0,14                     | -0,09 | 0,12   |
| <b>P</b>  | -0,21            | -0,39 | -0,36  | -0,23                     | -0,22 | -0,56  |
| <b>K</b>  | 0,21             | 0,12  | 0,36   | -0,23                     | -0,16 | 0,18   |
| <b>Ca</b> | -0,69            | -0,68 | -0,62  | 0,28                      | 0,23  | -0,60  |
| <b>Mg</b> | -0,79            | -0,81 | -0,70  | 0,38                      | 0,30  | -0,68  |
| <b>B</b>  | -0,08            | 0,07  | 0,15   | 0,24                      | 0,24  | 0,33   |
| <b>Fe</b> | -0,22            | -0,04 | 0,04   | 0,41                      | 0,38  | 0,28   |
| <b>Mn</b> | -0,55            | -0,44 | -0,43  | 0,48                      | 0,40  | -0,23  |
| <b>Zn</b> | -0,32            | -0,21 | -0,03  | 0,32                      | 0,40  | 0,04   |

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

O nitrogênio é um elemento que ocupa uma posição especial entre os elementos nutritivos. Ele tem funções fundamentais na planta, participando essencialmente na formação de todos os compostos orgânicos fisiologicamente importantes, como as proteínas e os nucleotídeos, tendo, além disso, uma notável influência sobre o crescimento vegetativo (ZÖTTL & TSCHINKEL, 1971). Devido a essas funções, o N é um nutriente altamente móvel no interior das plantas, translocando sempre para as regiões de maior atividade fisiológica dentro das plantas. Esta característica faz com que as baixas concentrações de N presente no lenho das árvores estejam apenas ligadas às moléculas ou compostos orgânicos que ficaram retidos nesses tecidos. Devido a isso é que não foram observadas correlações entre esse nutriente e as variáveis dendrométricas analisadas.

Além de não ter se correlacionado com os incrementos em altura e diâmetro das árvores, esse nutriente também não apresentou correlação alguma com a densidade específica do lenho (Tabela 20), e tampouco com as dimensões dos traqueídeos (Tabela 21).

**Tabela 20.** Coeficiente de correlação linear(r) entre os teores de nutrientes no lenho e a densidade específica da madeira. [n = 80].

| variáveis | densidade da madeira |        |        |          |        |
|-----------|----------------------|--------|--------|----------|--------|
|           | no anel              |        |        | no lenho |        |
|           | média                | mínima | máxima | inicial  | tardio |
| <b>N</b>  | 0,05                 | 0,05   | -0,11  | 0,08     | -0,12  |
| <b>P</b>  | 0,11                 | 0,10   | 0,01   | 0,03     | 0,02   |
| <b>K</b>  | 0,24                 | 0,10   | 0,17   | 0,27     | -0,01  |
| <b>Ca</b> | -0,56                | -0,26  | -0,65  | -0,33    | -0,57  |
| <b>Mg</b> | -0,63                | -0,33  | -0,72  | -0,30    | -0,67  |
| <b>B</b>  | -0,27                | -0,17  | -0,17  | -0,16    | -0,23  |
| <b>Fe</b> | -0,46                | -0,32  | -0,34  | -0,31    | -0,39  |
| <b>Mn</b> | -0,48                | -0,30  | -0,35  | -0,20    | -0,36  |
| <b>Zn</b> | -0,44                | -0,34  | -0,39  | -0,16    | -0,51  |

$p < 0,01$  para valores de  $|r| > 0,29$

Para o P, também não foi observada nenhuma correlação significativa, tanto para crescimento das árvores, como para a densidade e para dimensões dos traqueídeos. Este nutriente, a exemplo do N, é bastante móvel no interior das plantas. Suas principais funções estão relacionadas com os componentes estruturais (ácido nucléico, açúcares fosfatados e coenzimas) e na sua participação direta nas moléculas energéticas (ADP e ATP) da célula (KIND & WOEBER, 1975). Devido a isso, ele normalmente é encontrado em regiões de intensa atividade fisiológica nas plantas. Assim, as concentrações desses nutrientes em tecidos vegetais de baixa ou nenhuma atividade fisiológica são baixas, ou mesmo traços, como o caso do P em várias amostras analisadas. Essa situação tem como resultado a ausência de correlações desses nutrientes com os tecidos lenhosos do presente estudo.

Além de não terem sido identificadas correlações, os teores observados foram muito baixos, chegando, em algumas análises, a não serem detectados pelos métodos de análise utilizados. Por este motivo é que a única correlação significativa que foi identificada neste trabalho, para as condições do estudo (entre os teores de P e o volume corrente anual, Tabela 19), está sendo interpretada aqui como um acaso matemático e, por isso, sem condições de explicá-la cientificamente.

**Tabela 21.** Coeficiente de correlação linear(r) entre os teores de nutrientes no lenho e as dimensões dos traqueídeos. [n = 60].

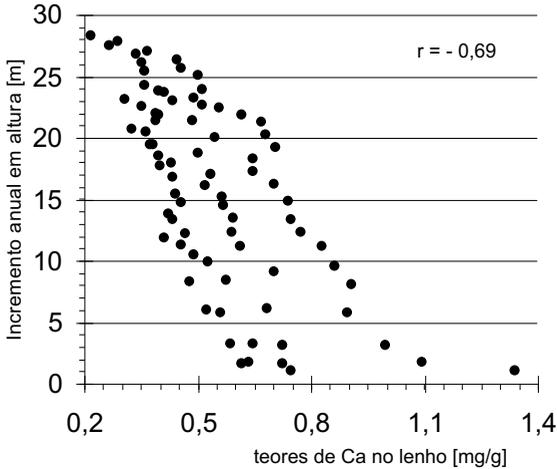
| variáveis | traqueídeos   |               |                |                |              |               |                |                |
|-----------|---------------|---------------|----------------|----------------|--------------|---------------|----------------|----------------|
|         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

O K foi outro elemento o qual podemos considerar que não apresentou correlação significativa com as variáveis estudadas. Quando ocorreram correlações (Tabelas 19 e 21), estas foram muito fracas e não apresentaram tendência. Por esse motivo, pode-se concluir que, para as condições do estudo e pelas metodologias de amostragens e de análises realizadas, não foram observadas correlações. Embora isso tenha ocorrido, é importante mencionar que o K tem um papel importante no crescimento do gênero *Pinus* no Sul do Brasil (REISSMANN & WISNIEWSKI, 2000; Ferreira et al., 2001). Para as áreas estudadas, foi observada correlação positiva entre os teores desse nutriente nas acículas e o crescimento em altura das árvores (Tabela 10). Esses fatos também estão relacionados com a função e a mobilidade do K no interior das plantas. Outro fator que contribui para isso é a oferta desse nutriente no solo, com teores médios apenas na área onde ocorreu o menor crescimento das árvores (Tabela 3). Vale destacar que o íon K nas plantas atua como cofator nas reações enzimáticas. Devido ao fato da baixa afinidade na formação de ligações orgânicas e pelas altas concentrações no simplasto das células, o K funciona no processo osmótico de manutenção da abertura do câmbio (BAUCH, 1993, citado por DÜNISCH, 1993). Além disso, o  $K^+$  está diretamente envolvido no transporte pelo floema de sintetizados da fotossíntese.

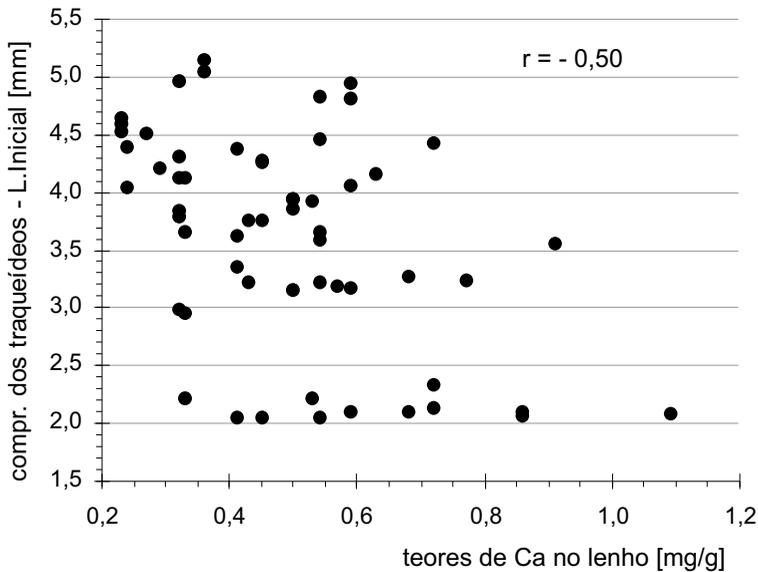
Entre os micronutrientes, o B e o Zn, de uma forma geral, também não mostraram correlação significativa com as variáveis estudadas. O B é importante no metabolismo de açúcares (MENGEL & KIRKBY, 1987; MARSCHNER, 1995), os quais formam complexos fracos com esse nutriente. Entretanto, mesmo que o efeito do B no metabolismo de açúcares seja secundário, a união desses dois elementos demonstra que eles estão associados, já que existe colineariedade entre eles (MAESCHNER, 1995). Já o Zn, além de constituinte e ativador de uma série de enzimas, é essencial na síntese do triptofano, composto precursor das auxinas (EPSTEIN, 1975). Ele, juntamente com o Cu, interage com N na formação de proteínas (JACKSON et al., 1978; citado por MENGEL & KIRKBY, 1987). Segundo esses autores, as folhas contêm altas concentrações de uma proteína chamada dismutase superoxidase que contém 2 átomos de Zn e 2 átomos de Cu, por proteína, sendo que 90% do conteúdo total dessa proteína encontra-se nos cloroplastos. Essas funções justificam a falta de correlação nos tecidos do lenho. Entre os nutrientes avaliados, os teores de Ca no lenho foram um dos que apresentaram correlações com as variáveis densidade, incremento em altura e

diâmetro e dimensões dos traqueídeos. Embora as correlações não tenham sido estreitas, elas mostraram tendência negativa que podem ser visualizadas nos Gráficos 22 e 23.



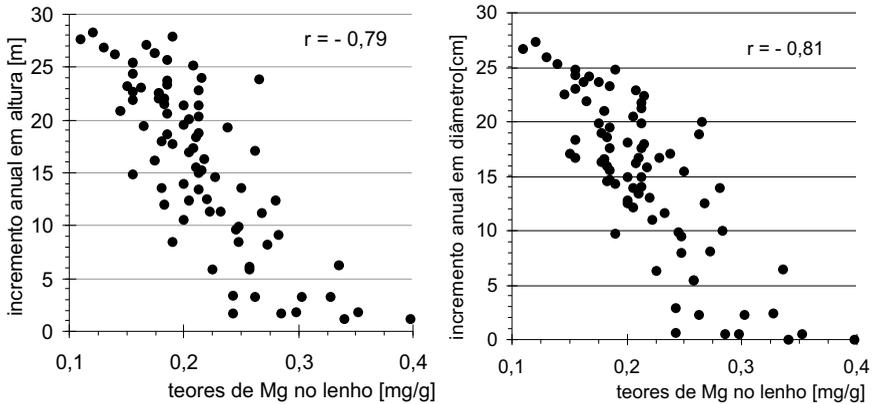
**Gráfico 22.** Correlação entre os teores de Ca nos anéis de crescimento e o incremento anual em altura das árvores.

Conforme mostra o Gráfico 22, os teores encontrados variaram de 0,2 até 1,4 mg Ca. Até a altura de 5 metros, correspondente à idade de cerca de 3 anos (Gráfico 5), os teores foram variáveis e tiveram uma influência dos teores disponíveis no solo (Tabela 3). As árvores com altura superior a 20 metros apresentaram teores variando de 0,2 a 0,8 mg e acima de 25 metros de altura teores máximos de 0,35 mg. Estes resultados mostram claramente a limitação do solo em fornecer Ca para as árvores, nas necessidades que as plantas demandam durante o seu ciclo de crescimento. Assim, presume-se que, no início do desenvolvimento das plantas, as árvores, por apresentarem menor quantidade de biomassa e menor competição por água e nutriente, necessitam de quantidades menores de Ca, que eram supridas pelo solo. Com o crescimento das árvores e oferta limitada desse nutriente no solo, houve uma diminuição na absorção do Ca. Em relação ao comprimento dos traqueídeos, embora a correlação tenha sido significativa, não é possível afirmar que exista uma tendência definida entre essas variáveis.



**Gráfico 23.** Correlação entre os teores de Ca nos anéis de crescimento e o comprimento dos traqueídeos, no lenho inicial das árvores.

De qualquer maneira, e independente de serem positivas ou negativas, essas correlações do Ca observadas já eram esperadas devido à sua função e mobilidade na planta. O Ca é um elemento, ao contrário dos nutrientes anteriores, imóvel na planta (MENGEL & KIRKBY, 1987). Além disso, sua função na planta é estabilizar a membrana celular. Dentro das paredes celulares, o  $\text{Ca}^{++}$  estrutural aparece ligado às protopectinas (KLEINING & SITTE, 1986). Outra função importante do Ca está no processo de lignificação, principalmente na formação da lignina, a qual tem uma forte dependência do conteúdo de Ca (WESTERMARK, 1982). O Mg é outro nutriente mineral que apresentou correlações significativas com o incremento em altura e diâmetro das árvores, com a densidade e com o comprimento dos traqueídeos (Tabelas 19, 20 e 21). Entre estas variáveis, o incremento anual foi o que mostrou as maiores correlações, apresentando diminuição nos teores do lenho dos anéis com a idade (Gráfico 24). A exemplo do Ca, as maiores concentrações do Mg ocorreram quando as árvores estavam no início do crescimento e, desta forma, as mesmas considerações feitas acerca do Ca valem para o Mg.

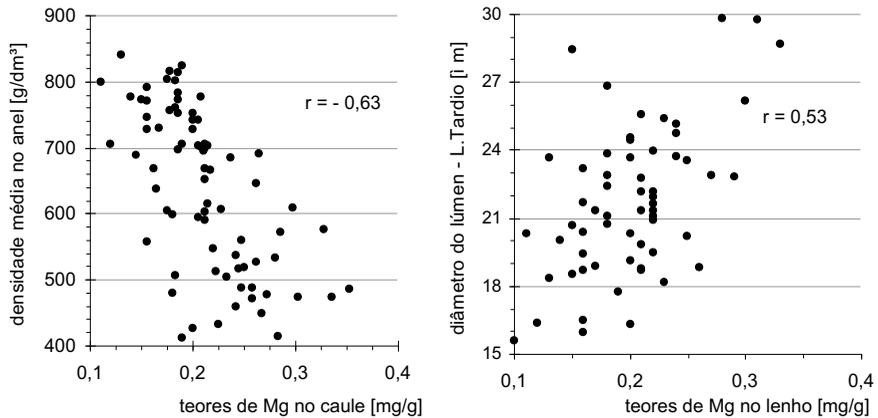


**Gráfico 24.** Correlação entre os teores de Mg nos anéis de crescimento e o incremento anual em altura e diâmetro das árvores.

Esta tendência dos teores de Ca e do Mg no lenho das árvores, em diminuir com o crescimento destas, está relacionado, conforme já mencionado, com a oferta no solo. Resultados semelhantes sobre essas relações podem ser observados nos trabalhos conduzidos por Kenk & Unfried (1984), que mostraram a influência da oferta de Mg no solo e sua presença nos anéis de crescimento da árvore.

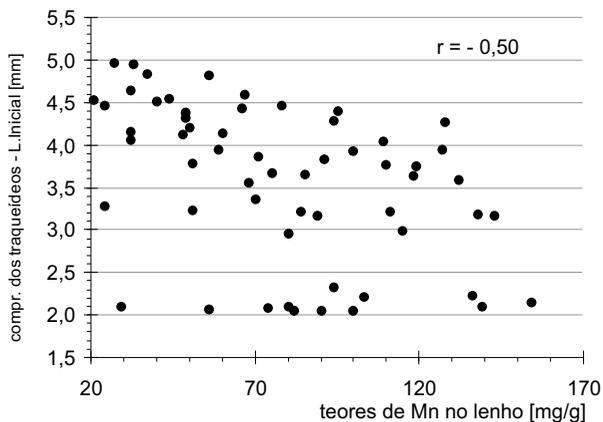
Para a densidade média, existe uma leve tendência em aumentar os teores de Mg no lenho, com a diminuição da densidade média nos anéis (Gráfico 25). Já para o diâmetro do lúmen, embora a correlação tenha sido significativa, os dados são dispersos e não permitem uma explicação, do ponto de vista fisiológico das plantas.

Como o Mg é um nutriente que participa da molécula de clorofila e, com isso, faz parte ativa da fotossíntese, é de se supor que estas correlações sejam apenas um acaso matemático e, portanto, sem condições de explicá-la cientificamente.



**Gráfico 25.** 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

Para o Fe e o Mn, ocorreram algumas correlações significativas, conforme mostrado nas tabelas anteriores. Entretanto, todas elas com valores dispersos e sem uma tendência definida, conforme mostram os Gráficos 26 e 27. Nos solos estudados, o Fe é o micronutriente catiônico mais abundante, sendo, aliás, um dos principais constituintes destes (EMBRAPA, 1999). Os teores de Mn em solos ácidos, como os do presente estudo, encontram-se em níveis altos, chegando a apresentar níveis tóxicos para as plantas, em algumas situações (QUADROS, 1996).

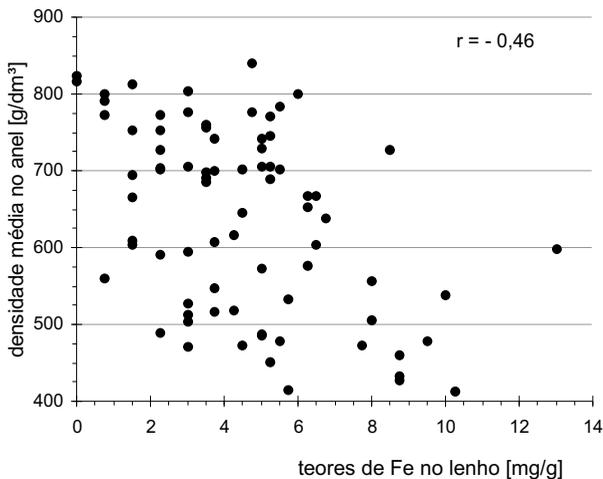


**Gráfico 26.** Correlação entre os teores de Mn nos anéis de crescimento com a densidade média nos anéis e o comprimento dos traqueídeos no lenho inicial.

Nas plantas, o Fe atua em muitos metabolismos como constituintes fixos, participando na composição de algumas proteínas. Participa também na composição de enzimas das mitocôndrias que desempenham papéis no transporte eletrônico. O Mn atua como ativador de muitas enzimas envolvidas no ciclo de Krebs. Estas funções mostram uma participação ativa desses metais nas atividades fisiológicas das plantas (EPSTEIN, 1975).

Como as plantas absorvem grandes quantidades desses nutrientes (Tabela 5), é possível que parte desses nutrientes seja acumulada em tecidos de baixa atividade metabólica, embora, pelas funções desempenhadas pelo Fe e Mn nas plantas, não ocorressem correlações entre os teores desses nutrientes no lenho e as variáveis estudadas.

Assim, como mera especulação, possivelmente essas correlações podem estar ocorrendo devido à existência de compostos orgânicos, contendo esses nutrientes nos tecidos do lenho. Considerando as questões colocadas anteriormente e, sobretudo, a falta de informações na literatura sobre esses nutrientes, é pertinente sugerir que sejam realizados estudos específicos com os mesmos, o que permitiria melhor elucidar esses resultados.

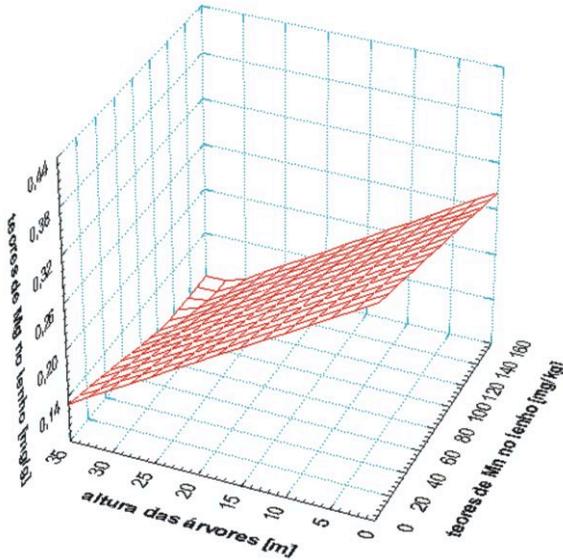


**Gráfico 27.** Correlação entre os teores de Fe nos anéis de crescimento com a densidade média nos anéis de crescimento das árvores.

Face aos resultados encontrados, foram realizadas análises de regressão múltipla entre as variáveis estudadas, com o objetivo de identificar quais os nutrientes minerais que apresentam maiores correlações com o crescimento das árvores, a densidade e as dimensões dos traqueídeos. De todas as avaliações realizadas, foi observado apenas relação entre o incremento anual em altura e os teores no lenho de Mg e Mn, conforme mostra o Gráfico 28. Observa-se que, entre as variáveis nutricionais, o Mn no lenho apresenta uma maior relação com o crescimento em altura das árvores. Para o menor teor de Mn (21 mg.kg<sup>-1</sup>), quando os teores de Mg diminuem de 0,35 até 0,11 mg.g<sup>-1</sup>, as árvores crescem de 8,4 a 34 m de altura. Estes resultados mostram que de todos os nutrientes avaliados no lenho, o Mn é aquele que guarda a maior relação com o crescimento das árvores (Gráfico 28).

De uma forma geral, os nutrientes Ca, Mg e Mn foram aqueles que apresentaram correlações significativas com as variáveis estudadas neste trabalho. Para o incremento em altura e diâmetro das árvores, esses nutrientes apresentaram relações diferenciadas. A análise de regressão múltipla mostrou que o Mn é comprovadamente o nutriente que mantém a mais estreita relação, seguido pelo Mg.

Do ponto de vista nutricional, os teores de Mn (Tabela 5) encontram-se dentro da faixa considerada adequada por Reissmann & Wisniewski (2000) e, desta forma, não são limitantes ao crescimento das árvores. As árvores com menor taxa de crescimento apresentam uma menor quantidade de compostos orgânicos e, conseqüentemente, necessitam de menores quantidades de Mn ao seu metabolismo. Estes dois fatos, associados com a média mobilidade desse nutriente no interior das plantas (EPSTEIN, 1975), fazem com que a translocação do Mn para as regiões de grande atividade fisiológica seja proporcional a essa atividade, isto é, menores quantidades translocadas nas árvores de menor crescimento. Como conseqüência disso, têm-se teores maiores desse nutriente nas regiões das plantas de menor atividade, ou seja, nos tecidos do lenho. Este fato pode explicar, caso o Mn não seja componente de compostos orgânicos fixados no lenho, as correlações negativas deste nutriente. O mesmo raciocínio pode ser aplicado às correlações desse nutriente com a densidade e as dimensões dos traqueídeos.



**Gráfico 28.** Relação entre a altura das árvores e os teores de Mg e Mn, dos anéis de crescimento das árvores de *Pinus taeda*. Abaixo, 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

Para o Mg, a situação é um pouco diferente. Embora as árvores estejam bem nutridas com este elemento (REISSMANN & WISNIEWSKI, 2000), é possível que os teores estejam próximos ao nível de deficiência latente. Com isso, e

pela razão da alta mobilidade desse nutriente, as árvores que crescem mais necessitam de maiores quantidades nas áreas de maior atividade fisiológica. As mesmas observações são válidas para as correlações com a densidade e com as dimensões dos traqueídeos.

Para o Ca, devido à sua função como componente da lamela média da parede celular, presume-se que as correlações observadas com a densidade e as dimensões dos traqueídeos poderiam estar associadas com as suas funções nos tecidos. De acordo com vários autores citados por Epstein (1975), o Ca, pelo fato de estar presente na parede celular, na forma de pectatos, tem importante relação com a resistência mecânica dos tecidos vegetais.

Com base nos resultados obtidos, deduz-se que os atributos físicos do solo são os maiores responsáveis pelas variações no crescimento e produtividade das árvores, nas diferentes áreas estudadas. Devido a isso, e para que se possa ter segurança que as correlações obtidas com a densidade e as dimensões dos traqueídeos têm fundamento fisiológico, é importante que esses nutrientes minerais possam ser melhor avaliados. Para tanto, sugere-se que sejam realizadas avaliações em solos sem problemas físicos e com diferentes níveis de fertilidade ou por meio de experimentos de adubação.

## 6. Conclusões

Os resultados obtidos permitem apresentar as seguintes conclusões:

### **Estrutura anatômica/densidade (raios X) da madeira das árvores de *Pinus taeda***

A disponibilidade de água no solo e a resistência do solo à penetração das raízes interferem na espessura dos lenhos inicial e tardio dos anéis de crescimento. Estas variações na espessura alteram a densidade média do lenho dos anéis de crescimento. Assim, quanto maior o desenvolvimento do lenho inicial, em relação ao tardio, menor é a sua densidade média.

A idade e a taxa de crescimento anual em diâmetro e altura das árvores alteram as dimensões dos traqueídeos, aumentando o seu comprimento e diminuindo o diâmetro do lume. As árvores mais jovens apresentam traqueídeos menores e lume com diâmetros maiores. A madeira adulta começa a se formar no lenho das árvores, a partir dos 12 anos de idade, independente do sítio e do crescimento das árvores. Nos primeiros anos de idade, ocorre a formação de lenho associado com a madeira juvenil, seguido do lenho associado com a madeira de transição (4 até 12 anos).

### **Dendronutrição**

As concentrações de N, P, K e B no lenho das árvores não apresentaram correlação com o crescimento das árvores, com a densidade da madeira e com as dimensões dos traqueídeos. Estes resultados indicam que, aumentando ou diminuindo a concentração desses nutrientes no lenho, a produtividade e a estrutura anatômica da madeira não são alteradas.

O Ca, Mg e Mn apresentam relação com as dimensões dos traqueídeos e com a densidade da madeira. O Ca, assim como o Mg e Mn, apresenta tal relação pela função fisiológica que desempenha na planta. A função desempenhada nos processos fisiológicos e na estrutura do xilema das árvores de *Pinus taeda* por estes nutrientes minerais deve ser avaliada com maiores detalhes.

### **Crescimento e Produtividade das árvores de *Pinus taeda***

Todas as árvores de *Pinus taeda*, independente da área e do tipo de solo, apresentaram deficiência mineral de P, Ca e Zn. Correções nutricionais destes elementos minerais não garantem aumentos de produtividade.

As variações no crescimento das árvores são devido aos atributos físicos do solo; a água disponível e a resistência do solo à penetração das raízes: a disponibilidade de água é a principal causa da variação do crescimento em DAP; a resistência do solo à penetração das raízes na altura das árvores de *Pinus taeda*.

Aumentos de produtividade das árvores nas três áreas podem ser obtidos na próxima rotação: para as áreas T1 e T2, com a aplicação de técnicas silviculturais (poda e desbaste) e adição de fertilizantes; para a área T3, com a descompactação do solo e associação da adubação e técnicas silviculturais; para a área T4, medidas como a descompactação, aplicação de fertilizantes e técnicas silviculturais não devem resultar em melhoria da produtividade, pelo impedimento físico do solo.

Recomendam-se estudos em solos com diferentes níveis de fertilidade e isentos de restrições físicas, deficiência hídrica e compactação, impedimentos físicos do solo que mascaram os efeitos dos nutrientes minerais.

## 7. Referências Bibliográficas

ALZATE, S. B. A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *urophylla***. 2004. 133 f. Tese (Doutorado Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

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

ATTIWILL, P. M. Nutrient cycling in *Eucalyptus obliqua* (L' Herit.) forest: III Growth, biomass, and net primary production. **Australian Journal of Botany**, v. 27, n. 4, p. 439-458, 1979.

BARRICHELLO, L. E. G. Densidade básica e características da fibra de madeira de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CELULOSE E PAPEL, 3., 1983, São Paulo. **Trabalhos técnicos**. São Paulo: Associação Técnica Brasileira de Celulose e Papel, 1983. v. 1, p. 113-125.

BARRICHELLO, L. E. G. **Estudo das características físicas, anatômicas e químicas da madeira de *Pinus caribaea hondurensis* Barr. e Golf. para a produção de celulose Kraft**. 1979. 167 f. Tese (Livre docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

BATAGLIA, O. C.; DECHEN, A. R. Critérios alternativos para diagnose foliar. In: **SIMPÓSIO AVANÇADO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO**, 1., 1986, Piracicaba. **Anais**. Campinas: Fundação Cargill, 1986. p. 115-135.

BELLOTE, A. F. J. **Concentração, acumulação e exportação de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* (Hill, ex-Maiden) em função da idade**. 1979. 129 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

BELLOTE, A. F. J. **Nahrelementversorgung und Wuchsleistung von gedungenen Eucalyptus grandis - Plantagen im Cerrado von Sao Paulo (Brasilien)**. Freiburg: Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 1990. 159 p. (Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, 26). Tese apresentada ao Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, para obtenção do título de Doutor.

BELLOTE, A. F. J.; DEDECEK, R. A.; SILVA, H. D.; GAVA, J. L.; MENEGOL, O. Nutrient export by clear cutting of *Eucalyptus grandis* of different ages on two sites, in São Paulo, Brazil. In: KOBAYASHI, S.; TURNBULL, J. W.; TOMA, T.; MORI, T.; MAJID, N. M. N. A. (Ed.). **Rehabilitation of degraded tropical forest ecosystems: workshop proceedings, 2-4 november 1999, Bogor, Indonesia**. Bogor: CIFOR, 2001. p. 173-177.

BELLOTE, A. F. J.; SARRUGE, J. R.; HAAG, H. P.; OLIVEIRA, G. D. Extração e exportação de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis*, em função da idade. 1- Macronutrientes. **IPEF**, Piracicaba, v. 20, p. 1-23, 1980.

BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D. da. Nutrição e crescimento de plantações de eucaliptos. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 105-133.

BENDTSEN, J. S.; SENFT, J. Mechanical and anatomical properties in individual growth rings of plantation-grown eastern cottonwood and loblolly pine. **Wood and Fiber Science**, v. 18, n. 1. p. 23-38, 1986.

BEVEGE, D. I. The management of forest soils and nutrition. In: AUSTRALIAN FOREST NUTRITION WORKSHOP, 1981, Canberra. **Productivity in perpetuity: proceedings**. Canberra: CSIRO, 1981. p. 253-261.

BIRKLAND, R. Efficient process for quality products. In: WORLD CONGRESS IUFRO, 19., 1990, Montreal. **Proceedings**. Montreal: IUFRO, 1990. v. 5, p. 139-147.

BOLZON de MUÑIZ, G. I. **Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L.** 1993. 235 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

BOWERSOX, T. W.; WARD, W. W. Prediction of oak site index in the ridge and valley region of Pennsylvania. **Forest Science**, Washington, DC, v. 18, n. 3, p. 192-195, 1972.

BRADY, N. C. **The nature and properties of soils.** 11<sup>th</sup> ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1996.

BRITO, J. O. **Influência da adubação mineral nas características dos anéis de crescimento da madeira de *P. caribaea* var. *bahamensis*.** 1983. 113 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

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.

COLE, D. W. Nutrient cycling in world forests. In: GESSEL, S. P. (Ed.). **Forest site and productivity.** Dordrecht: Martinus Nijhoff Publ., 1986. p. 103-105.

CORREA, A. M. V. **Variação das características anatômicas e da densidade básica da madeira em árvores de *Pinus caribaea* Morelet var. *hondurensis* Barret e Golfari em função do espaçamento de plantio.** 1995. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

COSTA, M. D. Biomassa microbiana e atividade biológica do solo decorrentes da decomposição de resíduos de eucalipto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995, Viçosa. **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e desenvolvimento sustentado: resumos expandidos.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995. v. 1, p. 474-475.

COWN, D. J. Wood density of radiata pine: its variation and manipulation. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 19, p. 84-94, 1974.

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

ECHOLS, R. M. Uniformity of wood density assessed from X-rays of increment cores. **Wood Science and Technology**, v. 7, p. 34-44, 1973.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

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.

EVANS, J. The effects of leaf position and leaf age in foliar analysis of *Gmelina arborea*. **Plant and Soil**, v. 52, p. 547-552, 1979.

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.; BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H. D. da. Concentração de nutrientes minerais no lenho de *Eucalyptus saligna* e sua relação com a aplicação de fertilizantes. In: CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1.; CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., 1993, Curitiba. **Floresta para o desenvolvimento: política, ambiente, tecnologia e mercado: anais**. São Paulo: SBS; [S.I.]: SBEF, 1993. v. 1, p. 227-230.

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).

FIELDING, J. M. Pruning *Pinus radiata* in Australia, with particular reference to the wood produced. In: IUFRO MEETING OF SECTION 41, 1965, Melbourne.

**Forest products, working groups of wood and tree chemistry: proceedings.** Melbourne: IUFRO, 1965. v. 2, p. 1-8.

FIELDING, J. M. The influence of silvicultural practices on wood properties.

**International Review of Forestry Research**, v. 2, p. 95-126, 1967.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal.** Santa Maria:

Universidade Federal de Santa Maria, 1992. 269 p.

FREUDENBERG, K.; NEISH, A. C. **Constitution and biosynthesis of lignin.**

Berlin: Springer Verlag, 1968. 120 p.

GARICOITS, L. S. L. **Estado nutricional e fatores do solo limitantes do crescimento de *Pinus taeda* L. em Telêmaco Borba.** 1990 128 f. Tese (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

GONÇALVES, J. L. M.; DEMATTÊ, J. L. I.; COUTO, H. T. Z. Relações entre a produtividade de sítios florestais de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e média no Estado de São Paulo. **IPEF**, Piracicaba, n. 43/44, p. 24-39, 1990.

HARRIS, J. M. Note on wood density of *Pinus radiata* grown under

temperature, sub tropical conditions. In: IUFRO WORKSHOP, 1977, Brisbane.

**Proceedings.** Brisbane: [s.n.], 1977. p. 112-115.

INGESTAD, T. New concepts on soil fertility and plant nutrition as illustrated

by forest trees and stands. **Geoderma**, v. 40, p. 237-252, 1987.

JOHANSEN, D. A. **Plant microtechnique.** New York: MacGraw-Hill Book, 1940.

533 p.

KADEBA, O. Growth and nutrient accumulation by *Pinus caribea* on three

savanna sites in northern Nigeria agriculture. **Ecosystems and Environment**, v.

49, n. 2, p. 139-147, 1994.

KELLER, T. Oekophysiologische Folgen niedriger, aber langandauernder SO<sub>2</sub>-Konzentrationen fuer Waldbaumarten. In: SEMINAR DER GESELLSCHAFT FÜR STRAHLEN- UND UMWELTFORSCHUNG, 1983, München. **SO<sub>2</sub> und die Folgen. München: GSF, 1983. p. 31-47. (GSF-Bericht A3/83).**

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.

KIM, K. S.; HAN, Y. C. Variation in growth characteristics of *Pinus densiflora* S. et Z. at eight experimental plantations in Korea. **Journal of Korean Forestry Society**, Seoul, v. 86, n. 2, p. 119-127, 1997.

KIND, H.; WOEBER, G. **Biochemie der Pflanzen**. Berlin: Springer-Verlag, 1975.

KLEINING, H.; SITTE, P. **Zellbiologie**. Stuttgart: Gustav Fisher Verlag, 1986. 528 p.

KOCH, P. **Utilization of the southern pines**. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1972. 734 p.

LA TORRACA, S. M. Recrutamento e exportação de nutrientes por *Pinus elliottii* var. *elliottii* em latossolo vermelho escuro, na região de Agudos, SP. **IPEF**, Piracicaba, n. 27, p. 41-47, 1984.

LAMB, D. Variations in the foliar concentrations of macro and micro elements in a fast-growing tropical eucalypt. **Plant and Soil**, v. 45, p. 477-492, 1976.

LARSON, P. R. Assessing wood quality of fertilized trees. In: SYMPOSIUM FOREST FERTILIZATION, 1967, Gainesville. **Proceedings**. Gainesville: [s.n.], 1968. p. 275-280. Editado por G. W. Bengtson.

LARSON, P. R. **Wood formation and the concept of wood quality**. New Haven: Yale University: School of Forestry, 1969. (Bulletin, n. 74).

LARSON, P. R.; KRETSCHMANN, D. E.; CLARK III, A.; ISEBRANDS, J. G. **Formation and properties of juvenile wood in southern pines: a synopsis.** Madison: USDA, Forest Service, 2001. 42 p. (USDA. For. Serv. FPL-GTR-129).

LEMOINE, B.; RANGER, J.; GELPE, J. Interprétation et modélisation de la distribution des éléments nutritifs dans les différents compartiments de la biomasse d' un jeune peulment de pin maritime. **Annales des Sciences Forestieres**, v. 47, p. 101-115, 1990.

LIMA, W. P. **Impacto ambiental do eucalipto.** São Paulo: EDUSP, 1993. 299 p.

LIMA, W. P. **O reflorestamento com eucalipto e seus impactos ambientais.** São Paulo: Artpress, 1987. 114 p.

LOOMIS, R. S.; NG, E.; HUNT, W. F. Dynamics of development in crop production systems. In: ANNUAL HARRY STEENBOCK SYMPOSIUM, 5., 1975, Madison, WI. **CO2 metabolism and plant productivity: proceedings.** Baltimore: University Park Press, 1976. p. 269-286. Edited by: R. H. Burris e C. C. Black.

LOUZADA, J. L. P. C. **Variação nos componentes da densidade da madeira de *Pinus pinaster* Ait.** Vila Real: Universidade De Trás-os-Montes e Alto Douro, 1990. 111 p.

MADGWICK, H. A. I.; MEAD, D. J. Variation in nutrient concentrations within *Pinus radiata* trees and their relationship to tree size. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 20, n. 1, p. 29-38, 1990.

MAIA, C. M. B. F.; SILVA, H. D. da; BELLOTE, A. F. J.; FERREIRA, C. A.; SHIMIZU, J. Y. Quantificación de la biomassa y nutrientes en *Pinus elliottii* var. *elliottii*. In: CONGRESO LATINOAMERICANO IUFRO, 1., 1998, Valdivia, Chile. **El manejo sustentable de los recursos forestales, desafio del siglo XXI: actas.** [S.I.]: CONAF; [Viena]: IUFRO, 1998. 1 CD-ROM. Tema 1: Establecimiento, manejo y proteccion de plantaciones.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants.** 2<sup>nd</sup> ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

McGRAW, R. A. **Wood quality factors in loblolly pine**. Atlanta: TAPPI Press, 1985. 88 p.

MENEGOL, O. **Índice de sítio e relação entre altura e teores nutricionais das acículas em povoamentos de *Pinus elliottii* var. *elliottii* no segundo planalto paranaense**. 1991. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 4<sup>th</sup>. ed. Bern: IPI, 1987. 686 p.

MILLER, H. G. **Forest fertilization: some guiding concepts**. *Forestry*, v. 54, n. 2, p.157-167, 1981.

MUNSON, A. D.; MARGOLIS, H. A.; BRAND, D. G. Seasonal nutrient dynamics in white spruce in response to environmental manipulation. **Tree Physiology**, v. 15, n. 3, p. 141-149, 1995.

NICHOLLS, J. W. P. The effect of environment on wood characteristics. **Silvae Genetica**, Frankfurt, v. 20, n. 3, p. 67-73, 1971.

OLIVEIRA, C. V.; BAHIA, V. G.; PAULA, M. B. de. Compactação do solo devido à mecanização florestal: causas, efeitos e práticas de controle. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 19, n. 191, p. 46-48, 1998.

PEREIRA, A. R.; ANDRADE, D. C. de; LEAL, P. G. L.; TEIXEIRA, N. C. S. dos. Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus saligna* cultivados na região de Cerrado de Minas Gerais. **Floresta**, v. 15, n. 1/2, p. 8-16, 1984.

PEREIRA, J. C. D. **A influência do ritmo de crescimento na densidade da madeira de *Pinus elliottii* var. *elliottii***. 1982. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

PEREIRA, J. S. M. Algumas notas sobre o impacto ambiental do eucalipto. In: COLÓQUIO EUCALIPTO, ECONOMIA E TERRITÓRIO, 1990. **Colóquio**. Oeiras: Sociedade Portuguesa de Estudos Rurais, 1990. 6 p.

POGGIANI, F. Florestas para fins energéticos e ciclagem de nutrientes. **IPEF**: Série Técnica, Piracicaba, v. 1, n. 2, p. D1-D11, 1980.

POGGIANI, F. Nutrient cycling in *Eucalyptus* and *Pinus* plantations ecosystems: silvicultural implications. **IPEF**, Piracicaba, n. 31. p. 31-40, 1985.

POGGIANI, F.; COUTO, H. T. Z.; SUITER FILHO, W. Biomass and nutrient estimates in short rotation intensively cultured plantation of *Eucalyptus grandis*. **IPEF**, Piracicaba, n. 3: p. 37-42, 1983.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1996. 446 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.

QUAGGIO, J. A. Respostas das culturas à calagem. In: SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS AGRÍCOLAS, Piracicaba, 1985. **Anais**. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p. 123-157.

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.

RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo**. 2. ed. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1983. 142 p.

RECOMENDAÇÕES de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 3. ed. Passo Fundo: Comissão de Fertilidade do Solo - RS/SC, 1995. 224 p.

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. **Naehrelementversorgung und Wuchsleistung von Kiefernbestaenden in Sued-Brasilien**. 1981. 169 p. Tese apresentada a Forstwissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universitat Freiburg, Freiburg, para obtenção do título de Doutor em Ciências Florestais.

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.

REISSMANN, C. B.; ZÖTTL, H. W. Mineralstoffernaehrung und Wuchsleistung von Kiefernauaufforstungen in Suedbrasilien. In: SYMPOSIUM ON SITE AND PRODUCTIVITY OF FAST GROWING PLANTATIONS, 1984, Pretória and Pietermaritzburg, South Africa. **Proceedings**. [S.l.]: IUFRO, 1984. p. 647-658.

RIGATTO, P. A. **Influencia dos atributos do solo sobre a produtividade e a qualidade da madeira de Pinus taeda para produção de celulose Kraft**. 2002. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

RUDMAN, P.; MCKINNELL, F. H. Effect of fertilizers on wood density of young radiata pine. **Australian Forestry**, v. 34, p. 170-178, 1975.

SANDS, R.; GREACEN, E. L.; GERARD, C. S. Compactions of sandy soils in radiate pine forests. I. A penetrometer study. **Australian Journal of Soil Research**, v. 17, n. 1, p. 101-103. 1979.

SANTOS FILHO, A. Capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em solos do Estado do Paraná. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 7, p. 43-46, 1985.

SANTOS FILHO, A.; ROCHA, H. O. da. Principais características dos solos que influem no crescimento de *Pinus taeda*, no segundo planalto paranaense.

**Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Curitiba, v. 9, p. 107-111, 1987.

SARRUGE, J. R.; HAAG, H. P. **Análises químicas em plantas**. Piracicaba: ESALQ: Livroceres, 1974. 56 p.

SASS, J. E. **Botanical microtechnique**. 2<sup>nd</sup> ed. Iowa: State College Press, 1951. 228 p.

SCHRANDER, L. E. CO<sub>2</sub> metabolism and productivity in C<sub>3</sub> plants: an assessment. In: BURRIS, R. H.; BLACK, C. C. (Ed.). **CO<sub>2</sub> metabolism and plant productivity**. Baltimore: University Park Press, 1975. p. 385-396.

SILVA, H. D. da. **Biomassa e aspectos nutricionais de cinco espécies do genero *Eucalyptus*, plantados em solo de baixa fertilidade**. 1983. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba.

SILVA, H. D. da. **Modelos matemáticos para a estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes em plantações de *Eucalyptus grandis* Hill (ex- Maiden) em diferentes idades**. 1996. 101 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

SILVA, H. D. da; FERREIRA, C. A.; BELLOTE, A. F. J. Quantification of the biomass and nutrients in the trunk of *Eucalyptus grandis* at different ages. In: KOBAYASHI, S.; TURNBULL, J. W.; TOMA, T.; MORI, T.; MAJID, N. M. N. A. (Ed.). **Rehabilitation of degraded tropical forest ecosystems: workshop proceedings, 2-4 november 1999, Bogor, Indonesia**. Bogor: CIFOR, 2001. p. 165-171.

SITTE, P.; ZIEGLER, H.; EHRENDORFER, F.; BRESINSKY, A. **Strasburger Lehrbuch der Botanik**. Stuttgart: Gustav Fisher Verlag, 1991. p. 338-369. (Aufgabe, 33).

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. **Estatísticas**. 2000. Disponível em: <<http://www.ipef.br/sbs/estatisticas>>. Acesso em: 17 jul. 2000.

TOMÉ JUNIOR, J. B. **Manual para interpretação de análise de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. 247 p.

TSOUMIS, G.; PANAGIOTIDIS, N. Effect of growth condition on quality characteristics of black pine (*Pinus nigra* Arn.). **Wood Science and Technology**, Berlin, v. 14, p. 301-310, 1980.

VALERI, S. V. **Exportação de biomassa e nutrientes de povoamentos de *Pinus taeda* L. desbastados em diferentes idades**. 1988. 164 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

VAN LEAR, D. H.; KAPELUCK, P. R. Above and below stump biomass and nutrient content of a mature loblolly pine plantation. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 25, n. 2, p. 361-367, 1995.

VITTI, G. C. Acidez do solo, calagem e gessagem. In: CURSO DE ATUALIZAÇÃO EM FERTILIDADE DO SOLO, 1., 1987, Ilha Solteira. **Trabalhos apresentados**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. p. 303-348.

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.

ZEN, S.; POGGIANI, F.; COUTO, H. T. Z. **Variação da concentração de nutrientes ao longo do caule de *E. saligna***: implicações na utilização energética dos resíduos florestais. Piracicaba: IPEF, 1981. 7 p. (IPEF. Circular técnica, 136).

ZÖTTL, H. W. Diagnosis of nutritional disturbances in forest stands. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST FERTILIZATION, 1973, Paris. **Proceedings**. Paris: Ministère de l'Agriculture, 1973. p. 75-95.

ZÖTTL, H. W.; TSCHINKEL, H. **Nutricion y fertilization**: una guía práctica. Medellín: Universidade Nacional de Colômbia, Departamento de Recursos Forestales, 1971. 111 p.



---

*Florestas*

**Ministério da  
Agricultura, Pecuária  
e Abastecimento**

