

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**BIOMASSA E NUTRIENTES NO CORTE RASO DE UM
POVOAMENTO DE *Pinus taeda* L. DE 17 ANOS DE
IDADE NO MUNICÍPIO DE CAMBARÁ DO SUL - RS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Rudi Witschoreck

**Santa Maria, RS, Brasil
2008**

**BIOMASSA E NUTRIENTES NO CORTE RASO DE UM
POVOAMENTO DE *Pinus taeda* L. DE 17 ANOS DE IDADE
NO MUNICÍPIO DE CAMBARÁ DO SUL - RS**

por

Rudi Witschoreck

**Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em
Silvicultura, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal.**

Orientador: Prof. Dr. nat. techn. Mauro Valdir Schumacher

**Santa Maria, RS, Brasil
2008**

W826b Witschoreck, Rudi
 Biomassa e nutrientes no corte raso de um
 povoamento de Pinus taeda L. de 17 anos de idade no
 município de Cambará do Sul - RS / por Rudi
 Witschoreck. – 2008.
 80 f. : il. ; 30 cm.

 Orientador: Mauro Valdir Schumacher.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de
 Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de
 Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2008.

 1. Engenharia Florestal 2. Silvicultura 3. Pinus taeda
 4. Biomassa 5. Nutrientes 6. Sustentabilidade
 I. Schumacher, Mauro Valdir II. Título.

 CDU: 630.5

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**BIOMASSA E NUTRIENTES NO CORTE RASO DE UM
POVOAMENTO DE *Pinus taeda* L. DE 17 ANOS DE IDADE
NO MUNICÍPIO DE CAMBARÁ DO SUL - RS**

elaborada por
Rudi Witschoreck

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Florestal

COMISSÃO EXAMINADORA:

Mauro Valdir Schumacher, Dr. nat. techn.
(Presidente/Orientador)

Marino José Tedesco, Ph.D. (UFRGS)

Hamilton Luiz Munari Vogel, Dr. (UNIPAMPA)

Santa Maria, 31 de outubro de 2008.

DEDICATÓRIA

Por ontem,
a meu pai João Francisco Bertoncello Witschoreck
e à minha mãe Ivone Abel Witschoreck

Por hoje,
à minha esposa Rachel Gonçalves de Oliveira
e à minha filha Maria Eduarda Gonçalves Witschoreck

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. nat. techn. Mauro Valdir Schumacher, por esta oportunidade, mas principalmente pela constante orientação, incentivo, amizade e confiança.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal.

À CAMBARÁ S.A. pela disponibilização da área do estudo, suporte técnico, logístico e financeiro durante os trabalhos de campo, principalmente nas pessoas do Eng. Florestal Vandir Zancan, Eng. Florestal Leonir Barichello e do Técnico Agropecuário Evandro Viero.

Ao Prof. Dr. Alessandro Dal'Col Lúcio, pela co-orientação e sugestões na análise dos dados.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Florestal, principalmente, Dr. Paulo Renato Scheneider e Dr. Solon Jonas Longhi.

Ao Eng. Florestal Lucas Pissinin, pela indispensável ajuda na realização deste trabalho.

Ao Eng. Florestal Márcio Viera, pelo auxílio na coleta de campo.

À amiga Prof. Dr. Francine Calil, pelo companheirismo e amizade.

A todos os amigos do Laboratório de Ecologia Florestal, principalmente, aos responsáveis pelas análises químicas, Karine Mayer, Liziane Moro, Francine Nascimento, Luciana Del-Fabro, Patricia da Silva, Raquel D'Avila, Carla Griebeler.

A toda minha família, pelo incondicional apoio e incentivo nos meus projetos pessoais e profissionais.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria

BIOMASSA E NUTRIENTES NO CORTE RASO DE UM POVOAMENTO DE *Pinus taeda* L. DE 17 ANOS DE IDADE NO MUNICÍPIO DE CAMBARÁ DO SUL - RS

Autor: Rudi Witschoreck

Orientador: Mauro Valdir Schumacher

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 31 de outubro de 2008.

Este trabalho, realizado em um povoamento de *Pinus taeda* de 17 anos de idade no município de Cambará do Sul (RS), em Cambissolo Húmico alumínico típico, teve como objetivos: estimar a biomassa e os nutrientes nos diferentes componentes das árvores e na serapilheira acumulada sobre o solo; estudar a variação dos nutrientes ao longo do fuste, na casca e na madeira, e determinar a altura relativa de coleta de amostra para estimar o conteúdo nutricional nesses componentes; quantificar o estoque de nutrientes disponíveis no solo até 60 cm de profundidade; avaliar o impacto nutricional de diferentes intensidades de colheita da biomassa; estabelecer o balanço nutricional e estimar o número de rotações com base no estoque de nutrientes disponíveis no sistema e nas entradas via precipitação atmosférica. A biomassa e os nutrientes foram estimados através do ajuste de equações de regressão, com coleta de 18 árvores distribuídas em 6 classes diamétricas e a serapilheira com base em unidades amostrais de área conhecida. O estoque de nutrientes no solo foi determinado com base na densidade do solo e do teor de nutrientes a intervalos de 10 cm de profundidade. O ponto de amostragem de casca e de madeira do tronco foi determinado por intervalo de confiança, com avaliação do teor de nutrientes a 10%, 30%, 50%, 70% e 90% da altura das árvores, tendo como referência o teor médio ponderado em função da biomassa. O impacto nutricional levou em conta o aumento da exportação de nutrientes em decorrência da intensidade de utilização da biomassa arbórea. O balanço nutricional e o número de rotações, em função de três métodos de colheita da biomassa, considerou a exportação de nutrientes nos desbastes aos 9 e aos 12

anos de idade e no corte raso aos 17 anos; o estoque de nutrientes disponíveis no solo e nos resíduos de colheita e as entradas via precipitação atmosférica. A biomassa arbórea foi estimada em 253,56 Mg ha⁻¹, sendo que, 62,4% é madeira do tronco, 13,6% é raiz, 8,9% é galho vivo, 7,4% é casca do tronco, 4,8% é acícula e 2,9% é galho seco. Considerando a biomassa arbórea total, o estoque de nutrientes corresponde a 567,90 kg ha⁻¹ de N, 42,37 de P, 206,66 de K, 261,19 de Ca, 96,03 de Mg, 93,87 de S, 1,73 de B, 0,84 de Cu, 13,36 de Fe, 11,09 de Mn e 1,43 de Zn; sendo que tronco, madeira e casca, correspondem a 44,0%, 39,0%, 53,8%, 50,5%, 52,9%, 61,6%, 50,4%, 37,6%, 41,2%, 54,8% e 52,9%, respectivamente, do montante de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn. A serapilheira apresentou um acúmulo de biomassa de 14,93 Mg ha⁻¹ e um conteúdo de nutrientes, em kg ha⁻¹, foi de 152,73 de N; 7,79 de P; 10,05 de K; 47,78 de Ca; 12,87 de Mg; 8,94; 0,20 de B; 0,17 de Cu; 85,05 de Fe; 4,49 de Mn e 0,41 de Zn. O solo apresentou um estoque de nutrientes disponíveis, concentrado na camada superior de solo, em kg ha⁻¹, de 1205,8 de N, 15,5 de P, 209,5 de K, 1838,0 de Ca, 449,7 de Mg e 163,3 de S. O ponto mais indicado para coleta de amostras de casca e madeira do tronco, com o objetivo de estimar o estoque total de nutrientes é a 30% da altura total das árvores. Nas simulações realizadas, o aumento da intensidade de utilização da biomassa acarretou grande elevação no impacto nutricional da colheita florestal, repercutindo em grande comprometimento da capacidade do sítio em manter sucessivos ciclos da cultura, partindo de uma estimativa, em termos de rotação de 17 anos, de 17 para N, 27 para Mg, 41 para Ca, e indefinidos ciclos (sustentável) para P, K e S, se considerada a colheita apenas da madeira do tronco; e 3 para P, 4 para N, 7 para K, 7 para Mg, 9 para Ca e 10 para S, no caso da colheita total da biomassa arbórea, acima do solo.

Palavras-chave: *Pinus taeda*; biomassa; balanço nutricional; sustentabilidade.

ABSTRACT

Master's Dissertation

Post-Graduation Program in Forest Engineering
Universidade Federal de Santa Maria

BIOMASS AND NUTRIENTS IN A 17 YEARS *Pinus taeda* L. STAND CLEAR CUTTING IN CAMBARÁ DO SUL - RS

Author: Rudi Witschoreck

Adviser: Mauro Valdir Schumacher

Date and Place of the Presentation: Santa Maria, October 31th, 2008.

This study was conducted in a 17 years old *Pinus taeda* stand in Cambará do Sul county (RS), in a typical Haplumbrept soil, and had as objectives: to evaluate the biomass and nutrients in the different trees' components and in the litter accumulated upon the soil; to determine the nutrients' variation along the stem, in the bark and in the wood, and to determine the relative height to take samples to evaluate the nutrients' content in these components; to quantify the available nutrients stock in the soil down to 60 cm of depth; to evaluate the nutritional impact from different biomasses harvest intensities; to establish a nutritional balance and to estimate the number of possible rotations based on the nutrients stock available in the system and the nutrients' input by rainfall. Biomass and nutrients were estimated using regression equations adjustments, with the harvest (cut) of 18 trees distributed in 6 diametric classes and the litter based on sampling units (with known area). Nutrients' stock in soil was determined based on soil density and the amounts of nutrients contained on each 10 cm depth layers. The sampling point of bark and stem wood was determined using confidence interval, with the nutrients' amount evaluation at 10%, 30%, 50%, 70% and 90% of the trees' height, using as reference the average amount according to the biomass. The nutritional impact considered the nutrients removal due to the above ground biomass intensity utilization. Nutritional balance and the number of rotations, as a function of three biomass harvesting methods, considered the removal of nutrients at the 9 and 12 years thinning and the clear cutting at 17 years; the available nutrients stock in the soil and in the harvesting residues and the inputs by the rainfall. The above ground biomass was estimated as

253.56 Mg ha⁻¹, being 62.4% in the stem wood, 13.6% in the roots, 8.9% in the live branches, 7.4% in the bark, 4.8% in the needles and 2.9% in the dried branches. Considering the total biomass above ground, the nutrients' stock was (kg ha⁻¹): N = 567.90; P = 42.37; K = 206.66; Ca = 261.19; Mg = 96.03; S = 93.87; B = 1.73; Cu = 0.84; Fe = 13.36; Mn = 11.09 and Zn = 1.43; the stem, the wood and the bark contributed with 44.0%, 39.0%, 53.8%, 50.5%, 52.9%, 61.6%, 50.4%, 37.6%, 41.2%, 54.8% and 52.9%, respectively, for the total N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn and Zn amounts. Litter showed a biomass accumulation of 14.93 Mg ha⁻¹, containing (kg ha⁻¹): N = 152.73; P = 7.79; K = 10.05; Ca = 47.78; Mg = 12.87; S = 8.94; B = 0.20; Cu = 0.17; Fe = 85.05; Mn = 4.49 and Zn = 0.41. Soil is upper layer nutrients' stock available was (kg ha⁻¹): N = 1205.8; P = 15.5; K = 209.5; Ca = 1838.0; Mg = 449.7 and S = 163.3. The most adequate point for collecting bark and wood stem samples is at 30% of the total height. In the simulations studied, an increase in biomass utilization decreased the site capacity to maintain successive culture cycles, starting from a estimative of 17 years; these were: 17 for N, 27 for Mg, 41 for Ca, and undefined cycles (sustainable) for P, K and S, if only the stem wood is removed; and 3 for P, 4 for N, 7 for K, 7 for Mg, 9 for Ca e 10 for S, if the total above ground biomass is harvested.

Key-words: *Pinus taeda*; biomass; nutritional balance; sustainability.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Distribuição de biomassa nos componentes das árvores em povoamentos de <i>Pinus taeda</i> de diferentes idades.	17
TABELA 2 – Concentrações de macro e micronutrientes nos diferentes componentes da biomassa de <i>Pinus taeda</i> , em duas idades, obtidas em dois estudos na região de Cambará do Sul (RS).	21
TABELA 3 – Estoque de macro e micronutrientes na biomassa de <i>Pinus taeda</i> com diferentes idades.	22
TABELA 4 - Descrição dos procedimentos analíticos utilizados na determinação dos nutrientes, em amostras de tecido vegetal.	30
TABELA 5 - Descrição dos procedimentos analíticos utilizados nas amostras de solo.	32
TABELA 6 – Entrada de nutrientes via precipitação atmosférica na região de Cambará do Sul – RS.	36
TABELA 7 – Biomassa e nutrientes no desbaste de um povoamento de <i>Pinus taeda</i> de 9 anos de idade, na região de Cambará do Sul – RS.	36
TABELA 8 – Médias, desvios-padrão, coeficientes de variação, valores mínimos e máximos para variáveis dendrométricas e de biomassa individual (kg por árvore), obtidas no povoamento de <i>Pinus taeda</i> de 17 anos de idade.	38
TABELA 9 – Parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos de regressão utilizados para estimar a biomassa de <i>Pinus taeda</i> com 17 anos de idade.	40
TABELA 10 – Produção e partição de biomassa estimada para a serapilheira e para os diferentes compartimentos das árvores de <i>Pinus taeda</i> , com 17 anos de idade.	42
TABELA 11 – Concentração de macronutrientes nos diferentes compartimentos da biomassa de <i>Pinus taeda</i> , com 17 anos de idade.	45

TABELA 12 – Concentração de micronutrientes nos diferentes compartimentos da biomassa de <i>Pinus taeda</i> , com 17 anos de idade.	46
TABELA 13 – Estoque de macronutrientes nos diferentes componentes da biomassa de <i>Pinus taeda</i> , com 17 anos de idade.....	48
TABELA 14 – Estoque de micronutrientes nos diferentes componentes da biomassa de <i>Pinus taeda</i> , com 17 anos de idade.....	49
TABELA 15 – Densidade do solo e teor de nutrientes em diferentes profundidades do solo, no povoamento de <i>Pinus taeda</i> de 17 anos de idade.	51
TABELA 16 – Estoque de nutrientes disponíveis em diferentes profundidades do solo, no povoamento de <i>Pinus taeda</i> de 17 anos de idade.	52
TABELA 17 – Teor médio de nutrientes em função da altura relativa de coleta de amostras de casca e de madeira do tronco, teor médio ponderado e intervalo de confiança para o ponto de amostragem ao longo do fuste das árvores de <i>Pinus taeda</i> de 17 anos de idade.	54
TABELA 18 – Coeficiente de utilização biológica para os diferentes componentes da biomassa de <i>Pinus taeda</i> de 17 anos de idade.....	59
TABELA 19 - Exportação de nutrientes (kg ha ⁻¹) em função da intensidade de colheita da biomassa de <i>Pinus taeda</i> , com 17 anos de idade.	60
TABELA 20 – Estimativa do número de rotações para <i>Pinus taeda</i> , com base nas entradas via precipitação atmosférica, estoque de nutrientes na biomassa e no solo (disponíveis) e nas saídas via colheita da biomassa nos desbastes e no corte raso.....	63

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Partição de biomassa em povoamentos de <i>Eucalyptus</i> spp. em função da idade (SCHUMACHER et al., 2003).....	18
FIGURA 2 – Diagrama climático da região do estudo (Fonte: INMET, 2008).....	26
FIGURA 3 – Desenho esquemático da coleta de amostras de casca e de madeira ao longo do tronco das árvores-amostra de <i>Pinus taeda</i> de 17 anos de idade.	34
FIGURA 4 – Distribuição diamétrica do povoamento de <i>Pinus taeda</i> de 17 anos de idade.	39
FIGURA 5 – Variação da biomassa relativa de madeira e casca do tronco de <i>Pinus taeda</i> com 17 anos de idade, nas diferentes classes de diâmetro e em função do diâmetro mínimo de colheita.	43
FIGURA 6 – Distribuição relativa dos nutrientes nos diferentes componentes da biomassa de <i>Pinus taeda</i> de 17 anos de idade.....	50
FIGURA 7 – Variação na concentração de macro e micronutrientes na casca, ao longo do tronco de <i>Pinus taeda</i> com 17 anos de idade.	57
FIGURA 8 – Variação na concentração de macro e micronutrientes na madeira, ao longo do tronco de <i>Pinus taeda</i> com 17 anos de idade.	57
FIGURA 9 – Distribuição absoluta e relativa dos nutrientes no povoamento de <i>Pinus taeda</i> de 17 anos de idade.....	61

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 Biomassa florestal	16
2.2 Nutrientes em ecossistemas florestais	21
3 MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1 Localização e caracterização da área de estudo	26
3.2 Histórico da área do estudo.....	27
3.3 Amostragem e determinação de biomassa	27
3.4 Estimativa de biomassa.....	29
3.5 Estimativa do estoque de nutrientes na biomassa	30
3.6 Estimativa do estoque de nutrientes disponíveis no solo	32
3.7 Determinação do ponto de amostragem de casca e madeira do tronco	33
3.8 Estimativa do número de rotações com base no balanço de nutrientes	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
4.1 Caracterização dendrométrica	38
4.2 Biomassa.....	40
4.3 Nutrientes	43
4.3.1 Nutrientes na biomassa.....	43
4.3.2 Nutrientes no solo	50
4.4 Determinação do ponto de amostragem para casca e madeira do tronco	52
4.5 Exportação de nutrientes em função da intensidade de colheita da biomassa ...	58
4.6 Estimativa do número de rotações	60
5 CONCLUSÕES	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
APÊNDICES	74

1 INTRODUÇÃO

Os fundamentos da ciclagem de nutrientes têm sido a base de muitos estudos na área florestal, entre eles, os que avaliam a sustentabilidade da produtividade primária.

Os ecossistemas florestais, naturais ou implantados, são sistemas abertos sujeitos a uma série de entradas e saídas de compostos inorgânicos e elementos químicos, muitos deles reconhecidamente essenciais para o desenvolvimento vegetal (ODUM, 1988; EPSTEIN & BLOOM, 2006; PALLARDY, 2008).

As entradas de nutrientes podem ocorrer através das deposições atmosféricas, secas e úmidas, intemperismo geológico, fixação biológica de nitrogênio e fertilização, enquanto as saídas incluem a volatilização pelas queimadas ou pela desnitrificação, lixiviação e erosão hídrica, assim como, pela colheita da biomassa (PRITCHETT, 1990).

Uma das principais vias de exportação de nutrientes, se não a mais importante, principalmente em povoamentos florestais, é a colheita da biomassa (PRITCHETT, 1990; LANDSBERG, 1986).

A ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais pode ser dividida em ciclo geoquímico, que inclui o movimento de entrada e saída de nutrientes no ecossistema; ciclo biogeoquímico, que considera as transferências entre o solo e a planta; e ciclo bioquímico, que trata dos processos de translocação dos nutrientes dentro da planta (SWITZER & NELSON, 1972).

O entendimento da ciclagem de nutrientes nos ecossistemas florestais é um pré-requisito essencial para a compreensão e a predição dos efeitos da nutrição no crescimento da floresta (LANDSBERG, 1986).

Do mesmo modo, o conhecimento da distribuição da biomassa e dos nutrientes nos diferentes compartimentos e fases de desenvolvimento dos povoamentos florestais é indispensável para definição do manejo mais adequado, principalmente no que diz respeito a práticas que visam à manutenção da produtividade, tais como: definição da idade e intensidade de colheita, manejo dos resíduos florestais, adubação de reposição, preparo de solo, entre outras.

Portanto, o presente trabalho teve como objetivo geral obter informações para subsidiar o manejo nutricional sustentado para o *Pinus taeda*, e os seguintes objetivos específicos:

- Estimar a biomassa fracionada nos seguintes componentes: acículas, galho vivo, galho seco, casca do tronco, madeira do tronco, raiz e na serapilheira acumulada;
- Estimar o estoque de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn) nos componentes das árvores e na serapilheira acumulada;
- Estudar a variação de nutrientes na casca e na madeira ao longo do tronco, e determinar um ponto de amostragem para estimar o estoque de nutrientes;
- Estimar o estoque de nutrientes disponíveis no solo até 60 cm de profundidade;
- Avaliar a exportação de nutrientes em função da intensidade de colheita da biomassa;
- Estabelecer o balanço nutricional, considerando a entrada via precipitação atmosférica e a exportação pela colheita da biomassa;
- Estimar o número potencial de rotações de 17 anos, com base no estoque de nutrientes disponíveis no sistema e nas entradas via precipitação atmosférica, de acordo com a intensidade de colheita da biomassa;
- Definir quais nutrientes oferecem maior risco à manutenção da produtividade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Biomassa florestal

O saldo no balanço de carbono promove o crescimento vegetal, mas a prioridade de alocação de fotoassimilados é condicionada pelo padrão da espécie (controle genético), idade (estágio de desenvolvimento) e condições de desenvolvimento (p. ex. características edáficas e de competição).

Em povoamentos florestais, segundo Gonçalves et al. (2004), antes do fechamento de copas, a prioridade de alocação é para a expansão da área foliar e desenvolvimento do sistema radicular (principalmente raízes finas), ao passo que, depois que o auto-sombreamento impõe uma área foliar máxima, o acúmulo de nutrientes ocorre com mais intensidade no tronco. Segundo o mesmo autor, é nessa fase que o acúmulo de resíduos na serapilheira atinge o máximo.

Entre espécies, é possível encontrar grande variação na alocação de biomassa, em especial, para alguns componentes. Em um povoamento, de 27 anos de idade, de *Araucaria angustifolia*, uma gimnosperma nativa, Schumacher et al. (2002b) encontraram a seguinte distribuição de biomassa: madeira do tronco 53%, casca do tronco 14%, raiz 12%, galho vivo 12%, grimpá 8% e galho seco 1%. Também para *Araucaria angustifolia*, aos 17 anos, com um fracionamento da biomassa um pouco distinto, Krapfenbauer & Andrae (1983) estimaram a seguinte seqüência de acúmulo: 50,5% de madeira do tronco, 12,9% de casca do tronco, 16,4% de grimpá (viva e seca) e 12,4% de raiz. Já para eucalipto, na região litorânea do Espírito Santo, Neves (2000) obteve os seguintes valores médios de biomassa, para 8 plantios clonais, aos 9 anos de idade (híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*), respectivamente, para madeira do tronco, raiz, casca do tronco, galho e folha: 73,7%; 10,8%; 6,8%; 2,5% e 0,97%.

Em se tratando de florestas naturais, o padrão de distribuição da biomassa pode ser bem distinto quando comparado com povoamentos florestais (WATZLAWICK et al., 2002; SOCHER et al., 2008). Watzlawick et al., 2002 realizaram um estudo em Floresta Ombrófila Mista Montana em General Carneiro (PR), onde, em valores médios para três estágios de regeneração (inicial, intermediário e avançado) encontraram a seguinte distribuição de biomassa: 43,3%

de madeira, 41,7% de galho vivo, 9,8% de casca, 2,9% de folhas e acículas, 1,5% de galho morto e 0,8% de miscelânea.

Na Tabela 1, encontram-se alguns resultados de trabalhos com *Pinus taeda*, onde é possível verificar que, dependendo do estágio de desenvolvimento, os povoamentos apresentam diferentes condições no que diz respeito à distribuição de biomassa.

Tabela 1 – Distribuição de biomassa nos componentes das árvores em povoamentos de *Pinus taeda* de diferentes idades.

Idade (anos)	Nº de árvores	Acícula	Galho	Casca	Madeira	Raiz	Total
		Mg ha ⁻¹					
2 ¹	1429	1,3 (31,0) ¹	0,6 (14,3)	0,3 (7,1)	2,0 (47,6)	—	4,2
4 ¹	1667	12,5 (20,9)	13,2 (22,1)	6,3 (10,6)	27,7(46,4)	—	59,7
6 ¹	1667	11,6 (16,8)	14,5 (21,0)	5,1(7,4)	37,9 (54,8)	—	69,1
4 ²	1028	4,6 (24,2)	1,6 (8,4)	3,8 (20,0)	9,0 (47,4)	—	19,0
8 ²	1141	15,2 (15,8)	10,2 (10,6)	12,2 (12,7)	59,3 (61,8)	—	96,0
7 ³	2062	9,4 (12,9)	16,7 (23,0)	5,4 (7,4)	41,2 (56,7)	—	72,7
10 ³	1240	9,7 (6,6)	23,6 (16,2)	10,7 (7,3)	102,0 (69,9)	—	145,9
14 ³	731	9,3 (5,1)	28,0 (15,2)	11,5 (6,3)	135,0 (73,4)	—	183,8
18 ⁴	289	8,5 (5,6)	27,0 (17,8)	10,7 (7,7)	105,3 (69,5)	—	151,5
19 ⁵	450	6,8 (2,7)	24,3 (9,6)	14,5 (5,7)	159,3 (62,9)	48,2 (19,0)	253,1
25 ⁵	1300	8,9 (2,7)	28,5 (8,5)	20,4 (6,1)	207,3 (62,1)	68,5 (20,5)	333,6
25 ⁵	900	7,8 (2,2)	28,0 (7,9)	21,8 (6,2)	230,8 (65,4)	64,6 (18,3)	353,0
25 ⁵	850	7,7 (2,2)	28,9 (8,1)	22,0 (6,1)	235,7 (65,8)	63,8 (17,8)	358,1
25 ⁵	125	5,2 (2,8)	22,2 (11,8)	9,7 (5,2)	119,0 (63,2)	32,1 (17,0)	188,2
27 ⁵	163	4,8 (2,4)	20,7 (10,2)	11,0 (5,4)	132,8 (65,5)	33,5 (16,5)	202,8
28 ⁵	288	4,7 (3,8)	14,4 (11,6)	6,6 (5,3)	71,2 (57,2)	27,5 (22,1)	124,4
29 ⁵	375	7,6 (3,0)	26,8 (10,6)	13,9 (5,5)	155,2 (61,5)	48,9 (19,4)	252,4
25 ⁶	—	21,6 (6,0)	58,5 (16,4)	11,1 (3,10)	266,5 (74,5)	—	357,7
27 ⁷	243	9,0 (3,4)	55,4 (20,9)	17,8 (6,7)	183,8 (69,1)	—	266,1

(1) Valores entre parênteses referem-se à biomassa relativa.

Fontes: (1) BARROS FILHO (2003); (2) VOIGTLAENDER (2007); (3) VALERI (1988); (4) SCHUMACHER et al. (2002a); (5) BIZON (2005); (6) OKI (2002); (7) SCHUMACHER & WITSCHORECK (2008).

Para exemplificar, Valeri et al. (1988), ao avaliar a exportação de biomassa de povoamentos de *Pinus taeda*, por ocasião dos desbastes aos 7, 10 e 14 anos, verificaram uma redução na alocação de biomassa para acícula, galho e casca, respectivamente, de 13% para 5,1%, 23% para 15,3% e 7,4% para 6,2%; enquanto a biomassa de madeira passou de 56,6% para 73,4% (Tabela 1).

Da mesma forma, Pereira et al. (1984) para *Eucalyptus grandis* e Zhang et al. (2004) e Martin et al. (2004) para *Pinus taeda*, verificaram, ao estudar povoamentos de diferentes idades, que a biomassa relativa de madeira do tronco apresenta tendência crescente com a idade, enquanto folha, galho e casca decrescem.

A Figura 1 traz o padrão de distribuição de biomassa obtido por Schumacher et al. (2003) ao estudarem povoamentos de *Eucalyptus* spp. com diferentes idades.

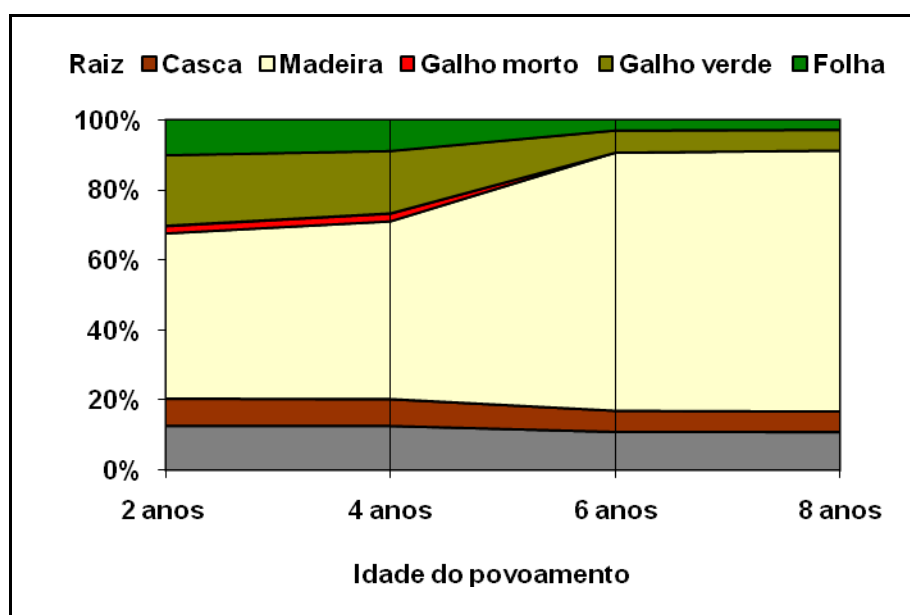


Figura 1 – Partição de biomassa em povoamentos de *Eucalyptus* spp. em função da idade (SCHUMACHER et al., 2003).

Segundo Ladeira et al. (2001) e Leite et al. (1997), à medida que aumenta a densidade populacional, a biomassa total por unidade de área aumenta (limitada pela capacidade máxima de produção do sítio e com tendência decrescente com a idade do povoamento), ao passo que a produção de biomassa total por indivíduo diminui, mas, com elevação da alocação de fotoassimilados no tronco.

Baldwin Jr. et al. (2000), ao estudarem o efeito do espaçamento e dos desbastes em *Pinus taeda*, aos 38 anos de idade, verificaram que os povoamentos mais intensamente desbastados apresentaram alteração no padrão de distribuição de biomassa, principalmente, alocando mais biomassa para galhos e folhas.

Leles et al. (1998); Ladeira et al. (2001) encontraram diferença na produção e distribuição de biomassa acima do solo e do sistema radicular, entre espécies de eucalipto, em função do espaçamento de plantio.

A qualidade do sítio, em termos de produtividade, pode provocar alteração na distribuição de biomassa entre os componentes da árvore em função do aumento da alocação de carbono para o sistema radicular (REIS et al., 1985; REIS et al., 1987).

Reis et al. (1985), em uma seqüência de idade de *Eucalyptus grandis*, estimaram a biomassa relativa do sistema radicular, em duas áreas com diferentes níveis de produtividade, em 13,2 % e 32%, respectivamente, para a área de maior e de menor produtividade; enquanto a biomassa de raízes com diâmetro menor do que 3 mm era 2,6 vezes maior no sítio menos produtivo. Quando estudou 8 povoamentos de *Pinus taeda*, Bizon (2005) atribuiu aos diferentes níveis de produtividade, a diferença na alocação de biomassa para o componente raiz (Tabela 1).

Práticas intensivas de manejo em povoamentos de *Pinus taeda*, tais como controle de plantas invasoras, irrigação, fertilização, dependendo dos níveis de fertilidade e déficit hídrico do sítio, podem provocar alterações na alocação de biomassa nos diferentes componentes das árvores (Albaugh et al., 2004; Martin et al., 2004).

Albaugh et al. (2004), quando analisaram, 9 anos após a aplicação de tratamentos, envolvendo controle de plantas invasoras, irrigação e fertilização, um povoamento de *Pinus taeda* de 8 anos de idade, constataram alteração no padrão de distribuição da biomassa em função da idade e a seguinte partição de biomassa quando comparados o tratamento que recebeu apenas controle de plantas invasoras e o que recebeu todas as práticas, respectivamente, madeira do tronco, 58 e 66; casca do tronco, 9 e 9; folha, 5 e 5; e galho, 27 e 20. No mesmo estudo, para os mesmos dois tratamentos, a partição de biomassa abaixo do solo foi a seguinte: raiz pivotante, 77 e 86; raiz grossa, 13 e 10; e raiz fina, 10 e 4.

Martin et al. (2004), ao compararem a produção de biomassa de *Pinus taeda*, aos 13 anos de idade, entre diferentes tratamentos combinando controle de plantas invasoras e fertilização, verificaram diferença estatística na distribuição de biomassa quando comparado o controle com a média dos demais tratamentos, respectivamente: madeira do tronco, 63,0% versus 66,0%; casca, 10,3% versus 8,6%; galho vivo, 17,7% versus 18,8% e folha, 8,8% versus 7,0.

Por outro lado, Samuelson et al. (2004) estudaram técnicas intensivas de manejo em *Pinus taeda* (controle de plantas, irrigação, fertirrigação e controle de pragas) e apesar de verificarem um acréscimo na produtividade de quase 100%, se comparado o controle com o tratamento com manejo mais intensivo, aos 6 anos de idade, constataram apenas um leve decréscimo na alocação de biomassa para o sistema radicular em detrimento do tronco e galhos.

Um dos aspectos mais característicos dos ecossistemas florestais é o desenvolvimento de uma espessa camada de resíduos sobre o solo, proveniente do descarte periódico de folhas, galhos, cascas, flores, frutos e outros resíduos orgânicos (PRITCHETT, 1990).

A manta florestal ou serapilheira acumulada é o resultado do equilíbrio das taxas de deposição e de decomposição dos resíduos, e que está relacionado com a espécie florestal, idade, condições climáticas, qualidade do sítio, entre outros fatores (REIS & BARROS, 1990).

Poggiani (1985) estudou em duas áreas disjuntas de São Paulo, um povoamento de *Eucalyptus saligna* com 11 anos de idade e um de *Pinus caribaea* com 14 anos de idade, onde verificou, respectivamente, uma deposição média de serapilheira, de 4,49 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, com predomínio durante o verão; e 8,37 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, concentrada nos períodos secos durante a primavera e o outono. No mesmo trabalho, a serapilheira acumulada sobre o solo, foi estimada em 7,94 Mg ha⁻¹ no *Eucalyptus saligna* e 20,24 Mg ha⁻¹ no povoamento de *Pinus caribaea*.

Na região de Cambará do Sul (RS), Schumacher et al. (2007) estimaram uma deposição de serapilheira, em povoamento de *Pinus taeda*, respectivamente, para o 5º, 6º e 7º anos, em Mg ha⁻¹, de 3,99; 4,72 e 4,84. Já em termos de serapilheira acumulada, Schumacher et al. (2002a) obtiveram para *Pinus taeda*, aos 18 anos de idade, uma biomassa de 16 Mg ha⁻¹.

2.2 Nutrientes em ecossistemas florestais

Quando utilizadas técnicas suficientemente sensíveis para analisar os tecidos vegetais, é possível detectar a maioria dos elementos químicos da tabela periódica, porém, somente alguns são reconhecidamente essenciais (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Cl e Ni) para o desenvolvimento da maioria das espécies vegetais (EPSTEIN & BLOOM, 2006; PALLARDY, 2008).

Segundo Pallardy (2008), a quantidade de nutrientes nas plantas varia bastante em função da espécie e genótipo, idade da planta, sítio, época do ano e da parte da planta analisada.

Como é possível observar na Tabela 2, existe grande variação na concentração de nutrientes entre os diferentes componentes da biomassa de *Pinus taeda*, e para o mesmo componente, em função da idade do povoamento.

Tabela 2 – Concentrações de macro e micronutrientes nos diferentes componentes da biomassa de *Pinus taeda*, em duas idades, obtidas em dois estudos na região de Cambará do Sul (RS).

Componente (idade)	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹				
(9 anos) ¹											
Acícula	13,70	1,09	3,31	4,71	1,05	1,40	19,92	4,08	140,73	704,59	23,50
Galho vivo	3,14	0,42	1,11	3,73	0,71	0,27	11,12	3,82	102,11	210,47	16,05
Galho seco	2,23	0,22	0,38	4,06	0,46	0,28	12,13	2,81	123,93	222,83	15,21
Madeira	1,52	0,17	0,48	0,87	0,23	0,33	7,22	2,33	24,10	108,44	8,30
Casca	3,21	0,35	1,02	1,59	0,42	0,57	15,36	4,15	142,77	106,41	13,49
(27 anos) ²											
Acícula	11,69	0,96	3,33	2,65	1,02	0,75	22,36	4,19	112,86	443,36	24,30
Galho vivo	1,74	0,18	0,75	1,49	0,50	0,39	11,67	2,43	62,28	146,42	17,62
Galho seco	1,45	0,08	0,11	1,88	0,33	0,37	9,87	1,96	58,12	172,48	15,71
Madeira	0,89	0,08	0,33	0,64	0,25	0,32	7,20	1,50	50,25	94,12	11,78
Casca	2,18	0,16	0,57	1,42	0,34	0,37	11,26	2,97	63,28	43,01	16,04

Fontes: (1) SCHUMACHER et al. (2006); (2) SCHUMACHER & WITSCHORECK (2008).

A concentração de nutrientes nos ecossistemas florestais segundo Marion, (1979) apud Pallardy, (2008), decresce de acordo com a seguinte ordem: tropical > boreal > temperada latifoliada > temperada de conífera, enquanto o conteúdo de nutrientes: tropical > temperada latifoliada > temperada de conífera > boreal.

Em contraste, tanto a massa como o conteúdo de nutrientes no piso florestal (serapilheira) aumenta das florestas tropicais para as florestas boreais, como resultado da lenta decomposição em condições de baixa temperatura em latitudes elevadas (SCHLESINGER, 1977 apud WARING & SCHLESINGER, 1985).

O estoque de nutrientes na biomassa florestal tende a apresentar um comportamento assintótico em idades avançadas, alcançando um estado de equilíbrio, onde o incremento através do crescimento das árvores é contrabalançado com a morte de indivíduos (WARING & SCHLESINGER, 1985) e pela ciclagem de nutrientes.

A Tabela 3 traz o estoque total de nutrientes na biomassa acima do solo de alguns estudos realizados em povoamentos de *Pinus taeda* de diferentes idades.

Tabela 3 – Estoque de macro e micronutrientes na biomassa de *Pinus taeda* com diferentes idades.

Biomassa (Mg ha ⁻¹) ¹	Idade (anos)	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		kg ha ⁻¹										
4,2	2 ²	27,2	2,5	16,9	5,2	1,9	—	—	—	—	—	—
59,7	4 ²	274,7	23,1	128,5	89,1	25,7	—	—	—	—	—	—
19,0	4 ³	137,5	16,9	42,1	34,4	6,9	—	—	—	—	—	—
96,9	8 ³	437,2	45,9	128,5	86,8	31,1	—	—	—	—	—	—
72,7	7 ⁴	355,0	21,3	114,9	88,7	24,1	—	0,8	0,4	4,5	7,0	0,6
145,9	10 ⁴	417,2	32,2	144,0	152,2	37,7	—	1,3	0,6	8,9	7,9	0,9
183,8	14 ⁴	422,5	26,5	120,7	190,9	45,2	—	1,5	0,7	9,1	10,0	1,0
151,5	18 ⁵	426,9	25,6	—	147,7	71,8	63,1	1,0	1,3	3,6	18,8	1,8
266,08	27 ⁶	512,0	44,4	174,3	310,8	103,8	115,4	2,9	0,6	17,3	36,7	4,5

(1) Biomassa de acícula, galhos, casca do tronco e madeira do tronco.

Fontes: (2) BARROS FILHO; (3) VOIGTLAENDER (2007); (4) VALERI et al. (1988); (5) SCHUMACHER et al. (2002a); (6) SCHUMACHER & WITSCHORECK (2008).

De acordo com Landsberg (1986), as reservas de nutrientes nas florestas estão presentes nos vários componentes das árvores, no solo e na vegetação de sub-bosque, sendo que, do montante, somente uma pequena fração está em fluxo entre os vários compartimentos do sistema.

Segundo Pritchett (1990), o acúmulo líquido de nutrientes na biomassa arbórea pode ser estimado através da diferença entre absorção total de nutrientes e o retorno para o solo pela morte de raízes, deposição de serapilheira e lixiviação das copas.

As florestas naturais e povoamentos florestais são sistemas biológicos abertos, sujeitos a uma série de entradas e saídas dos mais diversos elementos químicos e substâncias inorgânicas.

A ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais foi dividida em dois ciclos principais, segundo Ramezov (1959): o geoquímico, que envolve os processos de entrada e saída de nutrientes no ecossistema e o biológico, que trata das transferências no interior do ecossistema. Para o último, Switzer e Nelson (1972) propuseram uma divisão em ciclo biogeoquímico, para transferências entre o solo e a planta, e bioquímico, para o processo de translocação dentro da planta.

Odum (1988), ainda, faz uma divisão dos ciclos biogeoquímicos em dois grupos básicos: os tipos gasosos, nos quais o reservatório está situado na atmosfera ou na hidrosfera, e os tipos sedimentares, nos quais o reservatório está na crosta terrestre, sendo que, cada ciclo tem dois compartimentos: o reservatório, componente de movimento lento geralmente não-biológico, e o lábil ou de ciclagem, uma parcela menor, porém, mais ativa que se permuta rapidamente entre os organismos e o ambiente.

As entradas de nutrientes podem ser através das deposições atmosféricas, secas e úmidas, intemperismo geológico, fixação biológica de nitrogênio e fertilização, enquanto as saídas incluem a volatilização pelas queimadas ou pela desnitrificação, lixiviação e erosão hídrica, assim como, pela colheita da biomassa (PRITCHETT, 1990).

De modo geral, nas regiões tropicais, a entrada de nutrientes via mineralização das rochas é tida como pouco expressiva, devido ao alto grau de intemperismo desses solos (REIS & BARROS, 1990).

A entrada de nutriente via atmosfera é especialmente importante para o nitrogênio e o enxofre e depende de fatores naturais e antrópicos (WARING &

SCHLESINGER, 1985), com grande variação de acordo com a localização geográfica, estação do ano e proximidade a grandes centros urbanos, industriais e agrícolas (PRINTCHETT, 1990). Nos ambientes tropicais, em função da maior intensidade de descargas elétricas na atmosfera, há uma entrada maior de nitrogênio. Os relâmpagos contêm a energia necessária para quebrar a ligação tripla covalente, extremamente estável do nitrogênio, presente em 78% em volume da atmosfera (EPSTEIN & BLOOM, 2006). Segundo Epstein & Bloom (2006), da fixação natural de nitrogênio (atmosférica mais biológica), 8% são devidas a descargas elétricas na atmosfera, 2% são da fixação natural da reação fotoquímica entre o óxido nítrico gasoso e o ozônio, que produz ácido nítrico, e os 90% restantes, são devidas à fixação biológica por bactérias, que convertem o nitrogênio molecular em amônia.

Em áreas inundadas e solos encharcados, a atividade de bactérias libera formas reduzidas de nitrogênio e enxofre para a atmosfera, onde são oxidadas e retornam para o solo (WARNING & SCHLESINGER, 1985). A atividade industrial e as queimadas também podem contribuir para as adições atmosféricas, sobretudo, de óxidos de nitrogênio e enxofre (WARNING & SCHLESINGER, 1985; REIS & BARROS, 1990).

Uma das principais vias de exportação de nutrientes, se não a mais importante, principalmente em povoamentos florestais, é a colheita da biomassa (PRINTCHETT, 1990; LANDSBERG, 1986). Como é possível verificar na Tabela 3, dependendo da intensidade de utilização da biomassa, o impacto nutricional pode ser elevado.

As perdas de nutrientes pela lixiviação estão fortemente relacionadas com o tipo de manejo utilizado (REIS & BARROS, 1990). O grau e o período de exposição do solo, sem a proteção da vegetação e dos resíduos orgânicos, ou o uso da queima para eliminação de resíduos de colheita, podem aumentar as perdas por lixiviação e erosão principalmente se coincidirem com períodos com altos índices pluviométricos e condições topográficas desfavoráveis.

Maluf (1991) apud Gonçalves et al. (2004), em *Eucalyptus camaldulensis* na região dos cerrados, verificou que a queima dos resíduos florestais resultou em perda de 88% do N, 33% do P, 30% do K, 47% do Ca e 43% do Mg contidos nos resíduos.

Quanto aos ciclos bioquímicos, a retranslocação dos nutrientes de tecidos em senescência para regiões na planta com maior atividade metabólica, é uma importante estratégia para aumentar a eficiência de utilização dos nutrientes com alta mobilidade no tecido vegetal, e reduzir as perdas no processo de deposição de serapilheira (POGGIANI & SCHUMACHER, 2004).

Ao estudar povoamentos de *Eucalyptus saligna*, Gonçalves et al. (1997) apud Gonçalves et al. (2004), puderam constatar uma retranslocação média de nutrientes, das folhas decíduas para outros drenos das árvores, entre o oitavo e o nono ano de idade, da seguinte ordem: 79% do N, 67% do P, 81% do K, 51% do Mg, 18% do B, 79% do Zn, 37% do Cu, 28% do Fe e 14% do Mn, e para os galhos decíduos: 67% do N, 66% do P, 87% do K, 48% do Mg, 38% do B, 66% do Zn, 17% do Cu, 30% do Fe e 52% do Mn. A partir disso, esses pesquisadores concluíram que, em povoamentos adultos, grande parte da demanda anual de nutrientes é suprida pela ciclagem de nutrientes.

Segundo Reis & Barros (1990), o retorno de nutrientes via deposição de serapilheira representa a via mais importante do ciclo biogeoquímico, principalmente em áreas com solo altamente intemperizado onde a biomassa representa o maior estoque de nutrientes.

Para uma deposição média de serapilheira de $4,52 \text{ Mg ha}^{-1}$, entre o 5º e o 7º anos, em um povoamento de *Pinus taeda*, em Cambará do Sul (RS), Schumacher et al. (2007) estimaram o seguinte aporte de macronutrientes ao solo (em $\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$): 29,8 de N; 2,0 de P; 5,0 de K; 30,6 de Ca; 5,2 de Mg e 2,6 de S, e de micronutrientes (em $\text{g ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$): 66,6 de B; 18,2 de Cu; 1286,08 de Fe; 7225,6 de Mn e 160,6 de Zn.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado em um povoamento de *Pinus taeda* da empresa Cambará S.A., no município de Cambará do Sul, região fisiográfica dos Campos de Cima da Serra, nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, localizado na latitude 29° 00' 07" sul, longitude 50° 04' 57" oeste e a uma altitude de 1.057 m.

O clima da região é o temperado, CfbI segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 15,5°C, sendo 20,9°C para as máximas, 10,9°C para as mínimas, um extremo para as mínimas absolutas de -7,2°C, observados na estação meteorológica de Cambará do Sul, no período de 1997-2007 (INMET, 2008).

Para o mesmo período, foi registrada uma precipitação média de 159 mm mensais ou 1.906 mm anuais (Figura 2). Como em uma superfície de água livre como o tanque Classe A, a perda de água é maior do que em uma área vegetada, é possível afirmar que a região de estudo não apresenta tendência a déficit hídrico.

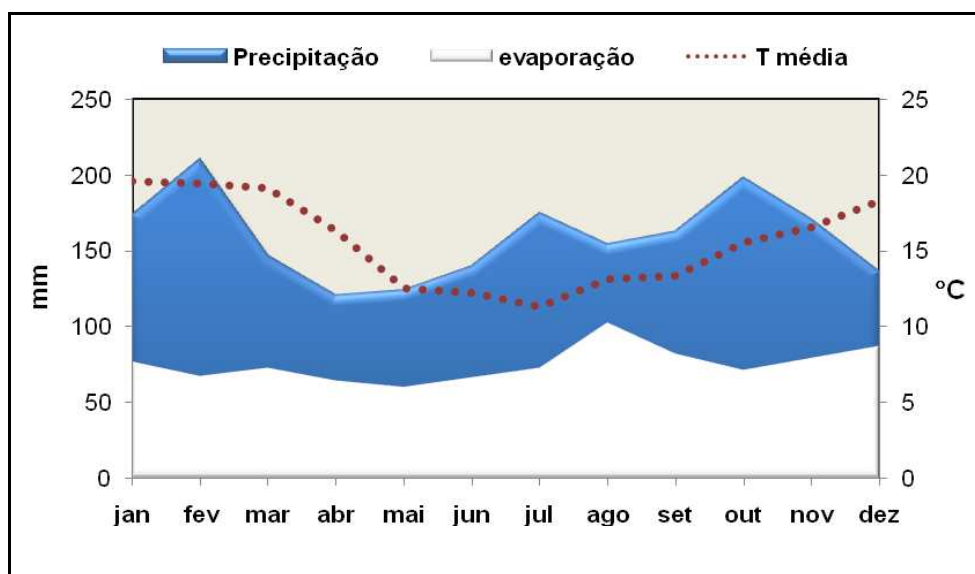


Figura 2 – Diagrama climático da região do estudo (Fonte: INMET, 2008).

O solo da área de estudo é um Cambissolo Húmico alumínico típico, pertencente à unidade de mapeamento Bom Jesus, que tem como principais características o elevado acúmulo de matéria orgânica no horizonte superficial, o que lhe confere cor escura, baixa saturação de bases, alta acidez, teores trocáveis de $Al \geq 4 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ e saturação de $Al \geq 50\%$ (STRECK et al. 2002).

3.2 Histórico da área do estudo

O projeto Cambará 21, localizado na Fazenda Tambo, foi implantado no inverno de 1986, em área de campo nativo e lavoura, com mudas produzidas em embalagens plásticas e sementes de APS da empresa Rigesa (Três Barras – SC).

O plantio foi realizado sem adubação, em espaçamento de 2,5 m x 1,6 m, após coveamento e coroamento manual. Como manutenção, foram realizadas roçada e combate à formiga. Em 1992, foi feito desrama das árvores em 2 a cada 3 linhas de plantio, até a altura de 2 metros. Foram feitos dois desbastes, o primeiro, em 1995, com retirada de $120 \text{ m}^{\text{st}} \text{ ha}^{-1}$ e o segundo, em 1998 com retirada de $130 \text{ m}^{\text{st}} \text{ ha}^{-1}$.

A coleta de dados foi realizada no mês de outubro de 2003, portanto, quando o povoamento tinha 17 anos de idade.

3.3 Amostragem e determinação de biomassa

Inicialmente, foi realizado um inventário florestal com o objetivo de caracterizar o povoamento quanto às variáveis dendrométricas diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total. Foram demarcadas 9 parcelas de 20 m por 16 m (320 m^2), distribuídas aleatoriamente na área de estudo, onde foram medidos todos os diâmetros, com fita diamétrica e todas as alturas, com hipsômetro Forestor Vertex[®].

A partir das informações do inventário, a amplitude diamétrica do povoamento foi dividida em 6 classes de diâmetro, com amostragem de três árvores distribuídas

em cada classe (terço inferior, terzo médio e terzo superior da classe), totalizando 18 árvores.

As árvores selecionadas foram seccionadas ao nível do solo e fracionadas nos seguintes componentes: acícula, galho verde, galho seco, casca do tronco, madeira do tronco e raiz. A biomassa de cada componente foi determinada através da pesagem com balança de gancho.

Cada árvore amostrada foi cubada de acordo com a metodologia de Smalian, com avaliação do diâmetro com e sem casca, nas seguintes posições: 0,1; 0,3; 1,3; 2,3; 3,3; e assim, sucessivamente, a intervalos de 1 metro, até o ápice da árvore.

Com o objetivo de estimar diferentes intensidades de colheita do tronco, foi determinada a biomassa de casca e madeira nos seguintes segmentos: base da árvore até o ponto em que o diâmetro com casca era de 20 cm, de 20 – 16 cm, de 16 – 12 cm, de 12 – 8 cm e de 8 cm até o final do fuste.

O sistema radicular (toco e raízes grossas) das árvores foi extraído por escavação manual e retroescavadeira e com retirada manual do solo aderido às raízes.

Foi coletada uma amostra representativa de cada componente da biomassa das árvores-amostra, com exceção da casca e da madeira do tronco, onde para detectar possíveis variações na concentração de nutrientes ao longo do fuste, foram feitas coletas de casca e madeira nas seguintes alturas relativas (por cento da altura total): $h_{0,1}$ (10%), $h_{0,3}$ (30%), $h_{0,5}$ (50%), $h_{0,7}$ (70%) e $h_{0,9}$ (90%).

Para avaliar a serapilheira acumulada sobre o solo, foram coletadas 6 amostras com moldura de ferro de 25 cm x 25 cm em cada uma das parcelas do inventário, perfazendo 54 amostras.

Todas as amostras de biomassa foram pesadas no campo com balança de precisão e acondicionadas em sacos de papel. No Laboratório de Ecologia Florestal do Departamento de Ciências Florestais/UFSM, as amostras foram secas a 70°C, em estufa de circulação e renovação de ar, até a estabilização do peso e pesadas novamente para determinação do teor de umidade.

A determinação da biomassa seca das árvores foi realizada indiretamente através do teor de umidade das amostras de cada componente. No caso da casca e da madeira do tronco, foi utilizado o teor de umidade no ponto médio de cada um dos segmentos de 20% da altura total. Já a serapilheira, em função da pequena quantidade de biomassa das unidades amostrais, em relação aos outros

compartimentos, a determinação foi feita diretamente através da secagem e pesagem de cada amostra.

3.4 Estimativa de biomassa

Após a determinação da biomassa seca, foram ajustadas equações de regressão, tendo como variáveis dependentes a biomassa de cada componente (acícula, galho verde, galho seco e raiz) ou compartimento (biomassa acima do solo e biomassa total), por árvore, em kg, e as seguintes variáveis independentes: d (diâmetro à altura do peito), h (altura total), d^2 , h^2 , d^3 , h^3 , $d.h$, $d^2.h$, $d^3.h$, $d.h^2$, $d.h^3$, $(d.h)^2$, $(d.h)^3$, d^{-1} , h^{-1} , $(d^2)^{-1}$, $(h^2)^{-1}$, $(d^3)^{-1}$, $(h^3)^{-1}$, $(d.h)^{-1}$, $(d^2.h)^{-1}$, $(d^3.h)^{-1}$, $(d.h^2)^{-1}$, $(d.h^3)^{-1}$, $((d.h)^2)^{-1}$, $((d.h)^3)^{-1}$, $d.h^{-1}$, $d^2.h^{-1}$, $d^3.h^{-1}$, $d^{-1}.h$, $d^{-1}.h^2$, $d^{-1}.h^3$, $1/d^2.h^{-1}$, $1/d^3.h^{-1}$, $1/d^{-1}.h^2$, $1/d^{-1}.h^3$, bem como, variantes logarítmicas (logaritmo natural) das variáveis dependentes e independentes.

Para estimar a biomassa de casca e madeira do tronco em função de diferentes diâmetros mínimos de colheita, foi introduzida a variável “ d_i ” com os valores 20, 16, 12, 8 e 0, que representam, respectivamente: 20, 16, 12 e 8 cm de diâmetro com casca na parte terminal do fuste e 0, para biomassa total de casca ou de madeira do tronco. A variável d_i também sofreu transformações tais como: d_i^2 , d_i^3 , $d.d_i$, $d^2.d_i$, $d^3.d_i$, $d.d_i^2$, $d.d_i^3$, $(d.d_i)^2$, $(d.d_i)^3$, d_i^{-1} , $(d_i^2)^{-1}$, $(d_i^3)^{-1}$, $(d.d_i)^{-1}$, $(d^2.d_i)^{-1}$, $(d^3.d_i)^{-1}$, $(d.d_i^2)^{-1}$, $(d.d_i^3)^{-1}$, $((d.d_i)^2)^{-1}$, $((d.d_i)^3)^{-1}$, $d.d_i^{-1}$, $d^2.d_i^{-1}$, $d^3.d_i^{-1}$, $d^{-1}.d_i$, $d^{-1}.d_i^2$, $d^{-1}.d_i^3$, $1/(d^2.d_i^{-1})$, $1/(d^3.d_i^{-1})$, $1/(d^{-1}.d_i^2)$, $1/(d^{-1}.d_i^3)$, além de transformações logarítmicas dessas variáveis.

A modelagem de regressão seguiu o procedimento “forward” (proc stepwise e opção forward) do pacote SAS (1993), com verificação da normalidade da distribuição dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk, homogeneidade da variância pelo teste de White e independência dos resíduos pela estatística de Durbin-Watson.

As estatísticas utilizadas para verificar a qualidade do ajuste das equações de regressão foram: o coeficiente de determinação (R^2), erro padrão da estimativa absoluto (Sy_x), erro padrão da estimativa relativo ($Sy_x\%$), além da análise gráfica da distribuição dos resíduos.

A estimativa da biomassa de *Pinus taeda* por hectare foi realizada com aplicação das equações de regressão aos dados do inventário florestal e extrapolação com base na área da unidade amostral.

Da mesma forma, a serapilheira foi estimada em função da área e da biomassa média das unidades amostrais.

3.5 Estimativa do estoque de nutrientes na biomassa

Após a secagem, as amostras foram moídas em moinho de lâminas do tipo Wiley com peneira de 20 mesh.

As determinações analíticas dos macronutrientes: N, P, K, Ca, Mg e S, e dos micronutrientes: B, Cu, Fe, Mn e Zn, foram realizadas no Laboratório de Ecologia Florestal do Departamento de Ciências Florestais/UFSM, segundo a metodologia sugerida por Tedesco et al. (1995) e Miyazawa et al. (1999), de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Descrição dos procedimentos analíticos utilizados na determinação dos nutrientes, em amostras de tecido vegetal.

Nutriente	Digestão	Método	Comprimento de onda (nm)
N	Sulfúrica (H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂)	Kjeldahl	—
Ca	Nítrica-perclórica (HNO ₃ + HClO ₄) [3:1]	Espectrofotometria de absorção atômica	422,67
Mg			285,21
Cu			324,75
Fe			248,33
Mn			279,48
Zn			213,86
K		Fotometria de chama	—
P		Espectrofotometria	660,00
S		Turbidimetria	420,00
B	Seca	Espectrofotometria	460,00

A massa de nutriente em cada uma das árvores (acícula, galho verde, galho seco e raiz) e na serapilheira, foi obtida através do produto entre a biomassa seca e as concentrações de nutrientes em cada um dos referidos componentes.

No caso do tronco (casca e madeira) para obter o conteúdo de nutrientes foi utilizada a biomassa seca de cada um dos segmentos pelas concentrações dos nutrientes no ponto médio de cada secção.

Após a obtenção da massa de nutrientes, foram ajustadas equações de regressão, tendo como variáveis dependentes a massa de nutrientes de cada componente (acícula, galho verde, galho seco) ou compartimento (biomassa acima do solo e biomassa total), por árvore, em grama para os macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e em miligrama para os micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn), e as seguintes variáveis independentes: d (diâmetro à altura do peito), h (altura total), d^2 , h^2 , d^3 , h^3 , $d.h$, $d^2.h$, $d^3.h$, $d.h^2$, $d.h^3$, $(d.h)^2$, $(d.h)^3$, d^{-1} , h^{-1} , $(d^2)^{-1}$, $(h^2)^{-1}$, $(d^3)^{-1}$, $(h^3)^{-1}$, $(d.h)^{-1}$, $(d^2.h)^{-1}$, $(d^3.h)^{-1}$, $(d.h^2)^{-1}$, $(d.h^3)^{-1}$, $((d.h)^2)^{-1}$, $((d.h)^3)^{-1}$, $d.h^{-1}$, $d^2.h^{-1}$, $d^3.h^{-1}$, $d^{-1}.h$, $d^{-1}.h^2$, $d^{-1}.h^3$, $1/d^2.h^{-1}$, $1/d^3.h^{-1}$, $1/d^{-1}.h^2$, $1/d^{-1}.h^3$, bem como, variantes logarítmicas (logaritmo natural) das variáveis dependentes e independentes.

Assim como para biomassa do tronco, para estimar o conteúdo de nutrientes na casca e na madeira, foi adicionado ao modelo de regressão a variável independente “ di ” com valores (20, 16, 12, 8 e 0), que correspondem à intensidade de utilização da biomassa de casca e de madeira do tronco, e às seguintes transformações: di^2 , di^3 , $d.di$, $d^2.di$, $d^3.di$, $d.di^2$, $d.di^3$, $(d.di)^2$, $(d.di)^3$, di^{-1} , $(di^2)^{-1}$, $(di^3)^{-1}$, $(d.di)^{-1}$, $(d^2.di)^{-1}$, $(d^3.di)^{-1}$, $(d.di^2)^{-1}$, $(d.di^3)^{-1}$, $((d.di)^2)^{-1}$, $((d.di)^3)^{-1}$, $d.di^{-1}$, $d^2.di^{-1}$, $d^3.di^{-1}$, $d^{-1}.di$, $d^{-1}.di^2$, $d^{-1}.di^3$, $1/(d^2.di^{-1})$, $1/(d^3.di^{-1})$, $1/(d^{-1}.di^2)$, $1/(d^{-1}.di^3)$, além de transformações logarítmicas dessas variáveis.

A modelagem de regressão seguiu o procedimento “forward” (proc stepwise e opção forward) do pacote SAS (1993), com verificação da normalidade da distribuição dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk, homogeneidade da variância pelo teste de White e independência dos resíduos pela estatística de Durbin-Watson.

As estatísticas utilizadas para verificação da qualidade de ajuste das equações de regressão foram: o coeficiente de determinação (R^2), erro padrão da estimativa absoluto (Syx), erro padrão da estimativa relativo (Syx%), além da análise gráfica da distribuição dos resíduos.

A estimativa do estoque de nutrientes na biomassa de *Pinus taeda*, por hectare, foi realizada com aplicação das equações de regressão selecionadas, para

cada componente ou compartimento, aos dados do inventário florestal e extrapolação com base na área da unidade amostral.

E o estoque de nutriente na serapilheira, por hectare, foi estimado por extrapolação, com base na área e na massa média de nutriente da unidade amostral.

3.6 Estimativa do estoque de nutrientes disponíveis no solo

Para estimar o estoque de nutrientes até 60 cm de profundidade no solo, foram abertas 4 trincheiras com coleta de amostras a 5, 15, 25, 35, 45 e 55 cm. Durante a coleta de solo para a análise química, também foram coletados, nos mesmos pontos amostrais, anéis volumétricos para avaliação da densidade do solo.

As análises químicas de P, K, Ca, Mg e S foram realizadas no Laboratório de Ecologia Florestal do Departamento de Engenharia Florestal/UFSM, segundo descrição na Tabela 5, seguindo a metodologia de Tedesco et al. (1995), preconizada pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS / SC (2004). E as análises de nitrogênio total foram realizadas no Laboratório de Análises Elementares do Departamento de Solos/UFSM, em auto-analisador CHNS (Modelo Flashea 1112, Thermo Finningan, Milan, Itália).

Tabela 5 - Descrição dos procedimentos analíticos utilizados nas amostras de solo.

Parâmetro	Extração	Método	Comprimento de onda (nm)
N total	Combustão seca		—
P disponível	Mehlich-1 (HCl + H ₂ SO ₄)	Espectrofotometria	660,0
K trocável		Fotometria de chama	—
Ca trocável	KCl (1mol L ⁻¹)	Espectrofotometria de absorção atômica	422,7
Mg trocável			285,2
S disponível	Ca(H ₂ PO ₄) ₂	Turbidimetria	440,0

A determinação da densidade do solo foi realizada no Laboratório de Ecologia Florestal do Departamento de Ciências Florestais/UFSM, segundo a metodologia de Kopeck (EMBRAPA, 1997).

A estimativa do estoque de nutrientes nas camadas de 0 – 10, 10 – 20, 20 – 30, 30 – 40, 40 – 50 e 50 – 60 cm de profundidade no solo, foi realizada através do produto entre o volume de solo, a concentração de nutrientes e a densidade de solo obtidos no ponto médio de cada camada.

No caso do nitrogênio, como a maioria do N total está contida em formas pouco ou não-disponíveis (frações húmicas muito estáveis), para efeito de cálculo, foi considerado apenas 10% como disponível para as plantas (GONÇALVES; MENDES; SASAKI, 2001).

3.7 Determinação do ponto de amostragem de casca e madeira do tronco

A massa de nutrientes em uma determinada quantidade de biomassa é obtida através do produto dessa biomassa pelo seu teor de nutrientes, de acordo com a fórmula 1. Portanto, o teor de nutriente é a razão entre o conteúdo de nutriente e a biomassa, como demonstrado na fórmula 2; funcionando como um índice de conversão de biomassa em nutriente.

Baseada nessa relação, foi determinada a biomassa total de casca e de madeira do tronco, através do somatório da biomassa seca individual de cada secção, segundo a fórmula 3 (Figura 3).

A massa total de nutrientes foi obtida através do somatório do conteúdo individual de cada segmento, determinado, por sua vez, por meio do produto da biomassa da respectiva secção “bi” pela concentração de nutrientes “ti”, como demonstrado na fórmula 4 (Figura 3).

Em função da variação dos teores de nutrientes ao longo do fuste, o teor representativo de cada nutriente foi obtido através do cociente entre a massa total de cada nutriente e a biomassa total (fórmula 2), para casca e para madeira, o que vem a ser o teor médio ponderado em função da biomassa de cada secção do tronco.

$$N = B \times T \quad (1)$$

$$T = \frac{N}{B} \quad (2)$$

$$B = \sum_{i=1}^n bi \quad (3)$$

$$N = \sum_{i=1}^n (bi \times ti) \quad (4)$$

Onde: N = massa de nutrientes;

B = biomassa;

T = teor de nutrientes;

bi = biomassa de madeira ou de casca de cada secção do tronco;

ti = teor de nutrientes na madeira ou na casca de cada secção do tronco.

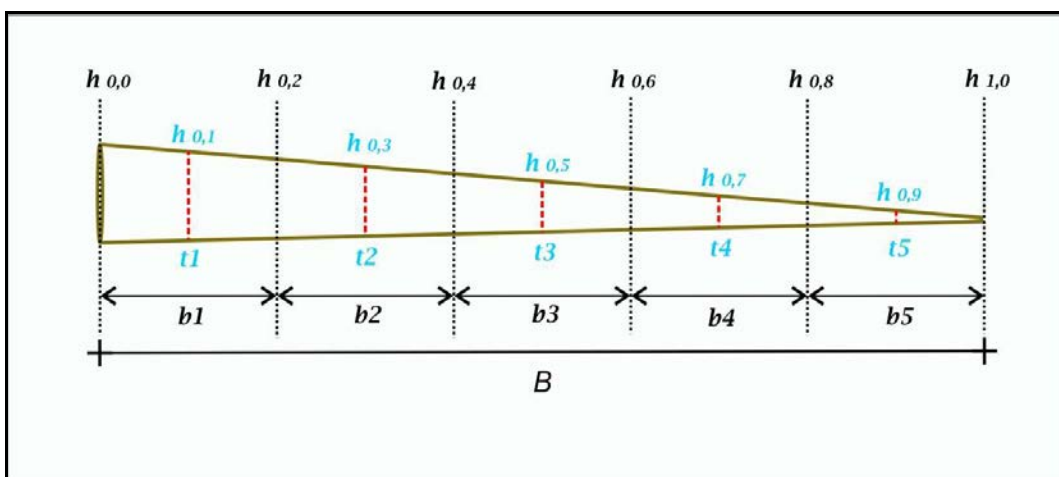


Figura 3 – Desenho esquemático da coleta de amostras de casca e de madeira ao longo do tronco das árvores-amostra de *Pinus taeda* de 17 anos de idade.

A estimativa do ponto de coleta de amostras, por intervalo de confiança, para cada nutriente, na casca e na madeira do tronco, foi realizada por predição estatística, utilizando equações de regressão, correlacionando altura de coleta e teor de nutrientes.

No ajuste das equações, foi usada como variável dependente a altura relativa “hi”, dos pontos de coleta de amostras: 10%, 30%, 50%, 70% e 90% da altura total, e os teores de nutrientes como variáveis independentes: t_i , t_i^2 , t_i^3 , t_i^4 , t_i^{-1} , $(t_i^2)^{-1}$, $(t_i^3)^{-1}$, $(t_i^4)^{-1}$, bem como, raiz quadrada e transformações logarítmicas das variáveis.

A modelagem de regressão seguiu o procedimento “forward” (proc stepwise e opção forward) do pacote SAS (1993), com verificação da normalidade da distribuição dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk, homogeneidade da variância pelo teste de White e independência dos resíduos pela estatística de Durbin-Watson.

As estatísticas utilizadas para verificação da qualidade de ajuste das equações de regressão foram: o coeficiente de determinação (R^2), erro padrão da estimativa absoluto (Syx), erro padrão da estimativa relativo (Syx%), além da análise gráfica da distribuição dos resíduos.

3.8 Estimativa do número de rotações com base no balanço de nutrientes

A estimativa do balanço nutricional foi obtida pela diferença entre a entrada (input) de nutrientes via deposição atmosférica (úmida e seca) e a saída (output), em decorrência da exportação de nutrientes através da colheita da biomassa, nos desbastes aos 9 e 12 anos e, no corte raso, aos 17 anos de idade.

A determinação da entrada de nutrientes via precipitação atmosférica baseou-se nas informações obtidas por Schumacher & Lopes (2008), para o município de Cambará do Sul (Tabela 6).

Tabela 6 – Entrada de nutrientes via precipitação atmosférica na região de Cambará do Sul – RS.

N	P	K	Ca	Mg	S
kg ha ⁻¹ ano ⁻¹					
7,68	2,16	10,80	5,28	1,68	4,61

Fonte: Schumacher & Lopes (2008).

A exportação de nutrientes nos desbastes foi obtida por ajuste, com base no volume de madeira, a partir de informações disponibilizadas pela empresa para o primeiro desbaste em um povoamento de *Pinus taeda*, aos 9 anos de idade, submetido ao mesmo sistema de manejo (Tabela 7). A razão, entre o volume de madeira com casca dos desbastes no povoamento estudado e as informações fornecidas pela empresa, foi utilizada como um fator de correção na estimativa do estoque de nutrientes no primeiro e no segundo desbastes.

Tabela 7 – Biomassa e nutrientes no desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* de 9 anos de idade, na região de Cambará do Sul – RS.

Compartimento	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	N	P	K	Ca	Mg	S
		kg ha ⁻¹					
Acícula	3,61	49,9	3,9	10,9	15,9	3,6	5,1
Galho vivo	4,63	14,9	2,1	5,4	16,2	3,4	1,2
Galho seco	0,68	1,6	0,2	0,2	2,8	0,3	0,1
Casca (8 cm - ápice)	0,21	1,3	0,2	0,6	0,4	0,2	0,2
Casca (até 8 cm)	4,00	13,5	1,4	4,4	5,9	1,7	2,1
Madeira (8 cm - ápice)	0,94	1,8	0,2	0,7	0,7	0,3	0,5
Madeira (até 8 cm)	21,61	32,7	4,0	10,8	19,2	5,0	7,9

Fonte: SCHUMACHER et al. (2007).

A estimativa do número de rotações (NR) de 17 anos para *Pinus taeda* necessárias para esgotar o estoque de nutrientes do sistema, de acordo com diferentes métodos de colheita da biomassa, considerou os nutrientes no solo até a profundidade de 60 cm (nutrientes disponíveis ou trocáveis); os nutrientes na biomassa arbórea e na serapilheira; e as entradas via precipitação atmosférica, de acordo com a fórmula 5, baseada na metodologia utilizada por Bizon (2005).

$$NR = \frac{\text{estoque no solo} + \text{estoque na biomassa}}{\text{saída pela colheita} - \text{entrada via precipitação}} \quad (5)$$

Onde:

- NR = número de rotações de 17 anos;
- estoque no solo = nutrientes disponíveis ou trocáveis, até 60 cm de profundidade, em kg ha⁻¹;
- estoque na biomassa = nutrientes contidos na biomassa arbórea (acícula, galho vivo, galho seco, casca do tronco, madeira do tronco e raiz) e na serapilheira, no corte raso, em kg ha⁻¹;
- saída pela colheita = nutrientes exportados pela colheita florestal nos desbastes e no corte raso, dependendo do método de colheita, em kg ha⁻¹ rotação⁻¹;
- entrada via precipitação = entrada de nutrientes via precipitação atmosférica, em kg ha⁻¹ rotação⁻¹;

Observa-se que, quando o balanço nutricional for positivo, ou seja, entrada maior de nutrientes via precipitação do que saída através da colheita, o NR será negativo, indicando uma condição de sustentabilidade ou indefinidos ciclos produtivos (rotações), simbolizado por “ + ”.

Para avaliar o impacto de diferentes intensidades de colheita da biomassa, na sustentabilidade nutricional, através da estimativa do balanço de nutrientes e do número de rotações, foram analisados três métodos de colheita florestal, incluindo os desbastes (9 e 12 anos de idade) e o corte raso (17 anos de idade):

- 1) Colheita somente da madeira do tronco até um diâmetro mínimo com casca na extremidade do fuste de 8 cm.
- 2) Colheita da madeira e da casca do tronco até um diâmetro mínimo com casca na extremidade do fuste de 8 cm.
- 3) Colheita de toda a biomassa acima do solo, permanecendo como resíduo apenas a serapilheira e o sistema radicular das árvores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dendrométrica

Na Tabela 8, é possível verificar que os valores para as variáveis dendrométricas e de biomassa individual (kg por árvore), ainda que de um povoamento equiâneo, apresentam grande variabilidade.

No caso da serapilheira, apesar de ter sido coletado um número elevado de amostras, o coeficiente de variação permaneceu alto. É possível que a utilização de unidades amostrais maiores do que 25 cm x 25 cm (625 cm²) possa apresentar melhores resultados do que simplesmente aumentar o número de repetições.

Tabela 8 – Médias, desvios-padrão, coeficientes de variação, valores mínimos e máximos para variáveis dendrométricas e de biomassa individual (kg por árvore), obtidas no povoamento de *Pinus taeda* de 17 anos de idade.

Variável	Média	Desvio padrão	CV (%)	Mínimo	Máximo
Dap (cm)	33,04	6,5191	19,73	18,10	50,80
Altura (m)	20,68	0,9612	4,65	17,70	22,50
Volume com casca (m ³)	0,9401	0,4823	51,30	0,2184	1,7558
Volume sem casca (m ³)	0,7838	0,4102	52,34	0,1765	1,4892
Acícula (kg)	24,44	15,6003	63,84	3,17	50,04
Galho vivo (kg)	57,13	45,2560	79,22	6,76	131,25
Galho seco (kg)	13,64	9,0530	66,37	0,68	29,44
Casca do tronco (kg)	34,53	15,4121	44,63	10,95	58,59
Madeira do tronco (kg)	284,48	140,2427	49,30	67,83	487,88
Raiz (kg)	70,84	43,9842	62,09	10,89	160,16
Biomassa da copa (kg)	95,20	67,93	71,36	10,61	201,59
Biomassa acima do solo (kg)	414,22	221,08	53,37	89,39	733,80
Biomassa arbórea total (kg)	485,06	263,6829	54,36	100,28	879,50
Serapilheira (g)	93,28	32,86	35,22	46,04	172,78

Em alguns casos, sobretudo quando os troncos das árvores são excessivamente grandes, é possível obter indiretamente estimativa de biomassa através da densidade básica. Se utilizarmos a biomassa e o volume médios individuais (Tabela 8) é possível estimar um valor de $339,4 \text{ kg m}^{-3}$ e $364,7 \text{ kg m}^{-3}$, respectivamente, para o tronco (madeira com casca) e para a madeira.

Sette Junior et al. (2006) utilizaram a densidade básica para estimar a biomassa de casca e de madeira do tronco de um povoamento de *Pinus taeda* de 18 anos de idade, com base em um valor de $378,2 \text{ kg m}^{-3}$; e Mendes (1993), para a mesma espécie e idade, obteve uma densidade básica de $357,0 \text{ kg m}^{-3}$.

Portanto, para as condições locais e, principalmente, condições semelhantes de manejo (densidade populacional) e idade, é possível realizar conversões rápidas de volume em biomassa, utilizando os valores obtidos neste estudo.

A Figura 4 apresenta a distribuição diamétrica, na qual se baseou a amostragem de biomassa, e apresenta conformação normal típica de povoamentos equiâneos, com valores relativos e absolutos para um universo de 581 árvores por hectare.

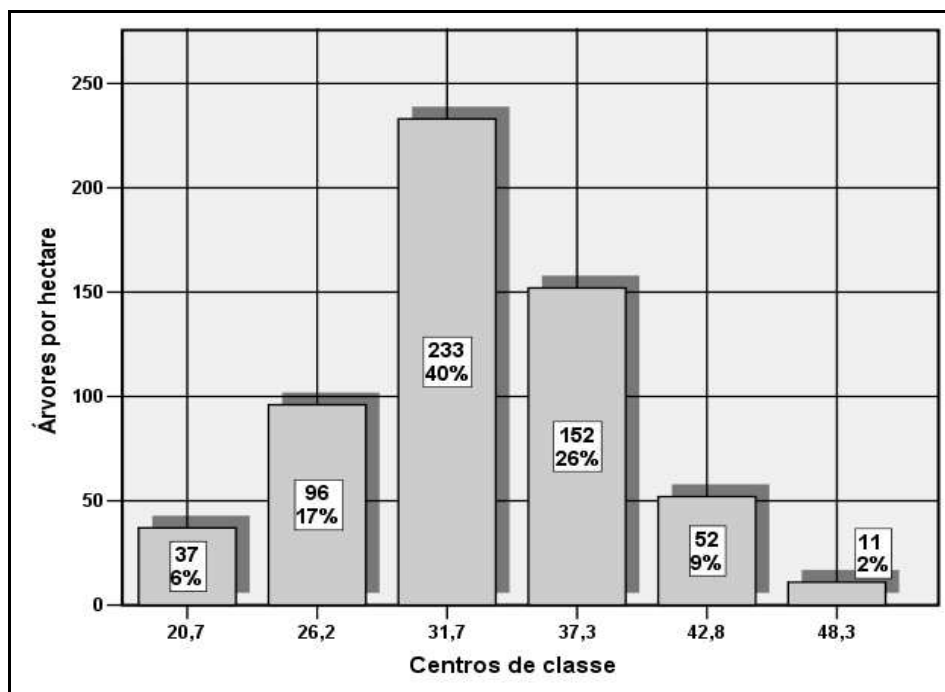


Figura 4 – Distribuição diamétrica do povoamento de *Pinus taeda* de 17 anos de idade.

4.2 Biomassa

A Tabela 9 traz os modelos de regressão utilizados para estimar a biomassa dos diferentes componentes das árvores de *Pinus taeda*.

É possível observar que são equações altamente significativas, estatisticamente, e com alto poder preditivo como é possível verificar pelos altos valores para o coeficiente de determinação ajustado e baixos erros-padrão da estimativa.

Tabela 9 – Parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos de regressão utilizados para estimar a biomassa de *Pinus taeda* com 17 anos de idade.

	Componente	Equação
1	Acícula	$\ln y = b_0 + b_1 \cdot (1/(d^2 \cdot h^{-1}))$
2	Galho vivo	$\ln y = b_0 + b_1 \cdot \ln(d \cdot h^{-1})$
3	Galho seco	$\ln y = b_0 + b_1 \cdot (1/(d \cdot h^2))$
4	Casca do tronco	$\ln y = b_0 + b_1 \cdot d^{-1} + b_2 \cdot (d^{-1} \cdot d_i^3) + b_3 \cdot d_i^3$
5	Madeira do tronco	$\ln y = b_0 + b_1 \cdot (d^2)^{-1} + b_2 \cdot (d^{-1} \cdot d_i^3) + b_3 \cdot d_i^3$
6	Raiz	$\ln y = b_0 + b_1 \cdot d^{-1}$
7	Biomassa do tronco (madeira + casca)	$\ln y = b_0 + b_1 \cdot (d^2)^{-1} + b_2 \cdot (d^{-1} \cdot d_i^3) + b_3 \cdot d_i^3$
8	Biomassa acima do solo (total – raiz)	$\ln y = b_0 + b_1 \cdot d^{-1}$
9	Biomassa total	$\ln y = b_0 + b_1 \cdot d^{-1}$

Coeficientes e estatísticas de ajuste								
	b_0	b_1	b_2	b_3	Prob.> F	$R^2_{ajust.}$	Syx	Syx (%)
1	4,299362	-64,283442	—	—	0,000	0,938	0,2078	7,09
2	1,941407	3,483811	—	—	0,000	0,921	0,2651	7,20
3	4,259480	-24650,281600	—	—	0,000	0,816	0,4212	18,42
4	4,934301	-47,533214	-0,005011	0,000116	0,000	0,970	0,1134	3,42
5	6,396298	-808,472227	-0,005624	0,000136	0,000	0,972	0,1270	2,35
6	6,334737	-73,401781	—	—	0,000	0,975	0,1177	2,99
7	6,495031	-789,925801	-0,005564	0,000134	0,000	0,974	0,1205	2,18
8	7,854652	-63,900403	—	—	0,000	0,982	0,0871	1,49
9	8,051060	-65,107266	—	—	0,000	0,983	0,0864	1,46

Onde: $\ln$ = logaritmo natural; b_0 , b_1 , b_2 = coeficientes; y = biomassa em kg do respectivo componente; d = dap (diâmetro à altura do peito); h = altura total; d_i = diâmetro mínimo de colheita, com casca, do tronco; Prob.>F = nível de significância para a estatística F; $R^2_{ajust.}$ = coeficiente de determinação ajustado; Syx = erro-padrão da estimativa absoluto; Syx (%) = erro-padrão da estimativa relativo.

Em função da variabilidade e da menor correlação com variáveis dendrométricas como dap e altura, galho seco é o componente que geralmente oferece maiores dificuldades de estimativa através de equações de regressão (SCHUMACHER et al., 2003; SCHUMACHER & WITSCHORECK, 2008).

No caso da casca e da madeira do tronco, as equações de regressão possibilitam a estimativa da biomassa para diferentes diâmetros mínimos de colheita (na extremidade superior do fuste), dentro da amplitude de 0 (biomassa total) a 20 cm com casca, o que permite avaliar a exportação de biomassa em função de diferentes níveis de utilização do tronco (Tabela 9).

Na Tabela 10, é possível verificar a distribuição absoluta e relativa da biomassa nos diferentes compartimentos do povoamento de *Pinus taeda*.

A alocação de biomassa nos componentes das árvores de *Pinus taeda* apresentou a seguinte seqüência de acúmulo: madeira do tronco > raiz > galho vivo > casca do tronco > acícula > galho seco.

Se considerados os mesmos componentes, a distribuição relativa de biomassa foi a mesma encontrada por Bizon (2005), para a média de 8 povoamentos de *Pinus taeda*, com idades entre 19 e 29 anos, no estado do Paraná.

Afora povoamentos extremamente jovens, a madeira do tronco é o componente das árvores que apresenta a maior biomassa relativa (REIS & BARROS, 1990). Além das fases de desenvolvimento do povoamento, algumas características como a densidade populacional, podem influenciar na alocação de biomassa (LADEIRA et al., 2001; LELES et al., 1998; LEITE et al., 1997).

Para exemplificar, Schumacher & Witschoreck (2008) encontraram na mesma região do presente estudo, para um povoamento de *Pinus taeda* com 27 anos de idade e 243 árvores por hectare, uma biomassa de galho vivo de 45,44 Mg ha⁻¹, o que corresponde a 17,1% da biomassa acima do solo de 266,08 Mg ha⁻¹.

Bizon (2005) encontrou uma biomassa relativa de raiz, que na média para 8 povoamentos de *Pinus taeda*, foi de 18%, variando de 16% a 22%, respectivamente, para os sítios de maior e de menor produtividade, sugerindo que a qualidade do sítio (nutriente e água) influencia na alocação de biomassa para o sistema radicular.

Analisando a Tabela 10, mesmo que a colheita florestal inclua apenas o tronco das árvores (casca e madeira), a exportação é da ordem de 69,84% da biomassa arbórea ou 80,81% da biomassa acima do solo.

É possível reduzir a exportação de biomassa com a adoção de diâmetros mínimos de colheitas maiores, o que pode representar em média uma redução de aproximadamente 20%, se considerado um aproveitamento somente até um diâmetro com casca de 20 cm na parte terminal do fuste, ao invés da biomassa total do tronco (Tabela 10 e Figura 5).

Tabela 10 – Produção e partição de biomassa estimada para a serapilheira e para os diferentes compartimentos das árvores de *Pinus taeda*, com 17 anos de idade.

Compartimento	Biomassa (Mg ha ⁻¹)	Biomassa relativa (%)		
		Total	Arbórea	Acima do solo
Acícula	12,23	4,56	4,82	5,58
Galho vivo	22,56	8,40	8,90	10,30
Galho seco	7,26	2,70	2,86	3,31
Copa	42,05	15,66	16,58	19,19
Casca do tronco total	18,78	6,99	7,41	8,57
base da árvore até 20 cm de Ø ¹	14,61	5,44	5,76	6,67
20 cm até 16 cm de Ø	1,82	0,68	0,72	0,83
16 cm até 12 cm de Ø	1,30	0,48	0,51	0,59
12 cm até 8 cm de Ø	0,73	0,27	0,29	0,33
8 cm até o ápice	0,32	0,12	0,13	0,15
Madeira do tronco total	158,30	58,96	62,43	72,24
base da árvore até 20 cm de Ø ¹	127,28	47,41	50,20	58,08
20 cm até 16 cm de Ø	13,58	5,06	5,36	6,20
16 cm até 12 cm de Ø	9,63	3,59	3,80	4,39
12 cm até 8 cm de Ø	5,42	2,02	2,14	2,47
8 cm até o ápice	2,39	0,89	0,94	1,09
Biomassa acima do solo	219,13	81,62	86,42	100,00
Raiz	34,43	12,82	13,58	
Biomassa arbórea	253,56	94,44	100,00	
Serapilheira	14,93	5,56		
Biomassa total	268,49	100,00		

(1) Diferentes secções do tronco, entre a base e o ápice da árvore, definidas em função do diâmetro mínimo de colheita com casca, utilizadas para simular a intensidade de aproveitamento do tronco.

A Figura 5 apresenta o comportamento da biomassa de casca e de madeira em diferentes secções do tronco (definido pelo diâmetro mínimo de colheita), onde fica evidente a tendência decrescente da biomassa relativa dos segmentos superiores com o aumento do diâmetro das árvores.

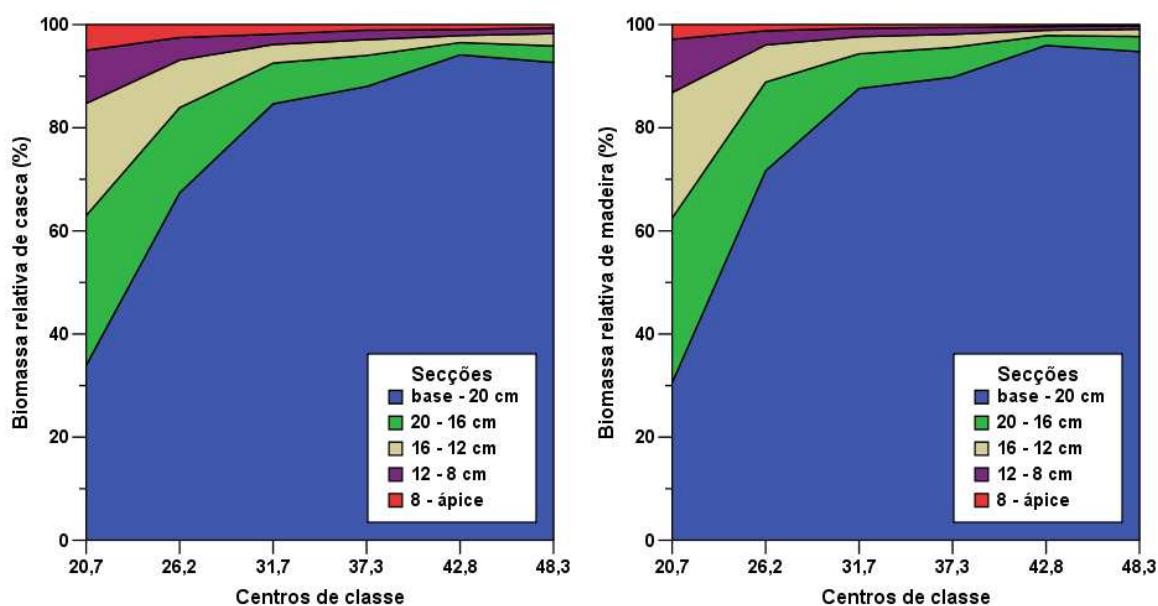


Figura 5 – Variação da biomassa relativa de madeira e casca do tronco de *Pinus taeda* com 17 anos de idade, nas diferentes classes de diâmetro e em função do diâmetro mínimo de colheita.

4.3 Nutrientes

4.3.1 Nutrientes na biomassa

As Tabelas 11 e 12 apresentam as concentrações de macro e micronutrientes, respectivamente, onde é possível verificar grande variação entre os componentes; mas, à exceção do Cu, a acícula apresenta os maiores valores para todos os nutrientes.

A folha (acícula) é o grande centro metabólico da planta, o que fica evidente pela alta concentração de nutrientes. Por outro lado, em componentes que têm função mais estrutural ou de condução, como é o caso da madeira do tronco e dos galhos, os teores são bem inferiores.

A diferença na concentração de nutrientes, entre componentes e dentro de um mesmo componente, tende a se intensificar com a idade, em decorrência da ciclagem interna (ciclagem bioquímica), que desloca nutrientes de tecidos senescentes para regiões com maior atividade metabólica (REIS & BARROS, 1990; PALLARDY, 2008).

O ciclagem bioquímica é importante para a manutenção dos nutrientes de maior mobilidade, como é o caso do N, P, K e Mg, e menos importante para o Ca, S e micronutrientes, pouco móveis (POGGIANI & SCHUMACHER, 2004).

Em especial, no tronco, acontece um importante processo de diferenciação de tecidos que é a transformação de alburno em cerne. Segundo Burger & Richter (1991), o alburno, localizado nas camadas mais periféricas do tronco constitui-se em tecido mais ativo, fisiologicamente, que o cerne, responsável pelo transporte ascendente de líquidos na árvore e constituído por células parenquimáticas vivas que encerram substâncias nutritivas como amido, açúcares, proteínas etc.

Como a proporção de alburno aumenta da base da árvore em direção ao ápice é possível verificar uma elevação na concentração dos nutrientes, na madeira do tronco, na região terminal do tronco, excetuando-se Ca e alguns micronutrientes (Tabela 11 e 12).

Andrae & Krapfenbauer (1983a) atribuíram tal comportamento à maior proporção de tecidos novos na extremidade do tronco, e no caso do Ca, ao acúmulo devido à baixa mobilidade desse elemento.

Esse padrão de distribuição dos nutrientes se reveste de importância uma vez que o tronco perfaz grande parte da biomassa exportada através da colheita florestal. O aproveitamento das partes terminais do tronco, além de matéria-prima de baixa qualidade, acarretará maior exportação de nutrientes por unidade de biomassa colhida.

A diferença na concentração dos nutrientes entre galho vivo e galho seco é outra evidência da ciclagem interna e da diferença de mobilidade dos nutrientes no tecido vegetal.

Tabela 11 – Concentração de macronutrientes nos diferentes compartimentos da biomassa de *Pinus taeda*, com 17 anos de idade.

Compartimento	N	P	K	Ca	Mg	S
	g kg ⁻¹					
Acícula	13,11 (1,84) ¹	1,18 (0,14)	3,94 (0,68)	3,49 (1,03)	1,31 (0,28)	0,74 (0,12)
Galho vivo	2,82 (0,52)	0,26 (0,06)	1,00 (0,18)	1,35 (0,21)	0,56 (0,11)	0,28 (0,03)
Galho seco	1,80 (0,43)	0,11 (0,03)	0,29 (0,11)	1,99 (0,63)	0,41 (0,09)	0,24 (0,04)
Casca do tronco						
base da árvore até 20 cm de Ø ²	2,85 (0,31)	0,25 (0,06)	0,87 (0,20)	1,23 (0,33)	0,47 (0,10)	0,37 (0,05)
20 cm até 16 cm de Ø	3,91 (0,74)	0,40 (0,14)	1,69 (0,70)	0,95 (0,27)	0,66 (0,17)	0,44 (0,08)
16 cm até 12 cm de Ø	4,14 (0,59)	0,45 (0,14)	1,89 (0,66)	1,01 (0,37)	0,74 (0,18)	0,46 (0,07)
12 cm até 8 cm de Ø	5,76 (1,52)	0,72 (0,24)	3,09 (1,14)	1,39 (0,34)	1,10 (0,28)	0,59 (0,13)
8 cm até o ápice	6,57 (0,85)	0,81 (0,18)	3,53 (0,75)	1,54 (0,34)	1,27 (0,10)	0,64 (0,11)
Madeira do tronco						
base da árvore até 20 cm de Ø ²	1,23 (0,19)	0,07 (0,02)	0,55 (0,11)	0,72 (0,11)	0,28 (0,04)	0,33 (0,05)
20 cm até 16 cm de Ø	1,36 (0,23)	0,09 (0,03)	0,63 (0,13)	0,69 (0,12)	0,28 (0,04)	0,33 (0,07)
16 cm até 12 cm de Ø	1,22 (1,15)	0,10 (0,02)	0,65 (0,13)	0,67 (0,12)	0,28 (0,04)	0,35 (0,08)
12 cm até 8 cm de Ø	1,85 (0,48)	0,14 (0,05)	0,84 (0,30)	0,63 (0,12)	0,32 (0,07)	0,41 (0,08)
8 cm até o ápice	2,10 (0,33)	0,16 (0,04)	0,95 (0,26)	0,60 (0,10)	0,35 (0,07)	0,44 (0,07)
Raiz	2,63 (0,40)	0,14 (0,02)	0,70 (0,20)	1,27 (0,20)	0,52 (0,16)	0,54 (0,04)
Serapilheira	10,23 (1,82)	0,52 (0,10)	0,67 (0,05)	3,20 (0,62)	0,86 (0,14)	0,60 (0,07)

(1) Valores entre parênteses referem-se ao desvio-padrão da concentração de nutriente;

(2) diferentes secções do tronco, entre a base e o ápice da árvore, definidas em função do diâmetro mínimo de colheita com casca, utilizadas para simular a intensidade de aproveitamento do tronco.

Tabela 12 – Concentração de micronutrientes nos diferentes compartimentos da biomassa de *Pinus taeda*, com 17 anos de idade.

Compartimento	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg kg ⁻¹				
Acícula	21,90 (4,56) ¹	5,23 (0,53)	215,71 (40,74)	208,58 (48,55)	22,91 (3,87)
Galho vivo	9,69 (1,24)	5,97 (0,86)	115,04 (16,17)	57,54 (14,65)	12,33 (3,31)
Galho seco	9,59 (2,45)	5,54 (1,26)	160,15 (61,72)	67,46 (14,21)	5,12 (1,91)
Casca do tronco					
base da árvore até 20 cm de Ø ²	10,07 (1,70)	4,59 (0,64)	185,79 (9,85)	32,69 (5,96)	10,16 (3,43)
20 cm até 16 cm de Ø	11,88 (2,17)	4,82 (0,68)	200,53 (33,04)	42,30 (6,79)	19,05 (7,36)
16 cm até 12 cm de Ø	12,25 (1,95)	4,79 (0,72)	207,15 (41,54)	46,13 (8,72)	22,51 (8,55)
12 cm até 8 cm de Ø	15,00 (3,64)	5,36 (0,73)	243,69 (40,70)	61,90 (14,56)	31,65 (9,79)
8 cm até o ápice	16,81 (2,64)	5,72 (0,84)	266,99 (39,63)	68,46 (13,76)	35,50 (6,97)
Madeira do tronco					
base da árvore até 20 cm de Ø ²	4,36 (0,79)	1,36 (0,31)	12,77 (2,30)	34,72 (4,60)	3,28 (0,70)
20 cm até 16 cm de Ø	5,00 (1,15)	1,70 (0,50)	13,22 (2,86)	34,50 (6,16)	3,89 (1,24)
16 cm até 12 cm de Ø	5,11 (1,02)	1,84 (0,42)	12,44 (3,00)	32,87 (6,74)	4,19 (1,16)
12 cm até 8 cm de Ø	6,01 (1,64)	2,33 (0,70)	15,68 (5,13)	34,94 (7,40)	6,93 (3,30)
8 cm até o ápice	6,80 (1,66)	2,82 (0,44)	17,62 (5,49)	36,87 (9,65)	8,56 (2,38)
Raiz	10,10 (1,68)	2,29 (0,54)	48,38 (11,39)	18,19 (6,30)	2,96 (0,58)
Serapilheira	13,12 (1,99)	11,15 (2,21)	5698,76 (1361,81)	300,91 (72,41)	27,31 (2,48)

(1) Valores entre parênteses referem-se ao desvio-padrão da concentração de nutriente;

(2) diferentes secções do tronco, entre a base e o ápice da árvore, definidas em função do diâmetro mínimo de colheita com casca, utilizadas para simular a intensidade de aproveitamento do tronco.

No caso da serapilheira, é preciso fazer uma ressalva quanto ao elevado teor de Fe, que é citado na literatura como resultado da contaminação por óxidos de Fe do solo (SCHUMACHER et al., 2002; HOPPE, 2003; SCHUMACHER et al., 2003).

Realizar comparação entre espécies, em condições desiguais de crescimento, idade, solo e clima, requer bastante cautela, no entanto, alguns aspectos são suficientemente distintos para neutralizar tais interferências. Para ficar apenas na biomassa geralmente envolvida na colheita florestal, notadamente casca e madeira, os teores de K, Ca e Mg encontrados para *Pinus taeda* na casca foram, respectivamente, em g kg⁻¹, 0,87; 1,23 e 0,47 (considerando a secção da base – 20 cm), para o mesmo componente; Neves (2000) obteve para 8 plantios clonais (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*), aos 9 anos de idade, na região litorânea do Espírito Santo, em valores médios, 4,36; 36,5 e 2,54. Schumacher et al. (2003), para um povoamento de *Eucalyptus* spp. de 8 anos de idade, em Vera Cruz (RS), determinaram os teores de 4,6; 26,2 e 2,2 g kg⁻¹, respectivamente, para K, Ca e Mg. Por outro lado, para madeira, se comparado com os mesmos trabalhos de Neves, 2000 e Schumacher et. al., 2003, os teores de macronutrientes no *Pinus taeda*, determinados neste estudo, podem ser considerados equivalentes, e até superiores, principalmente para Mg e S, em relação a Neves (2000), na ordem de 2,4 e 4,2 vezes, respectivamente.

Em termos de estoque de nutrientes, as Tabelas 13 e 14 trazem o conteúdo de macro e micronutrientes, respectivamente, nos vários compartimentos do povoamento de *Pinus taeda*.

Considerando-se a biomassa arbórea total, o acúmulo de nutrientes apresenta a seguinte seqüência: N > Ca > K > Mg ~ S > P > Fe > Mn > B ~ Zn > Cu, enquanto que no tronco (madeira e casca) a seqüência é: N > Ca > K > S ~ Mg > P > Mn ~ Fe > B ~ Zn > Cu.

Em função da grande diferença no teor de nutrientes entre os componentes das árvores, a partição de nutrientes não obedece ao padrão de alocação de biomassa. Tendo em vista que em termos médios, os componentes da copa apresentam maior concentração de nutrientes, apesar de acumular somente 16,58% da biomassa arbórea, possui o equivalente a 39,8% do N, 49,3% do P, 35,2% do K, 32,4% do Ca, 30,4% do Mg, 18,0% do S, 30,1% do B, 28,8% do Cu, 46,9 do Fe, 39,6% do Mn e 40,3% do Zn. Ou ainda, de modo mais marcante, as acículas, com apenas 4,82% da biomassa arbórea, acumulam, 26,7% do N, 34,0% do P, 23,0% do

K, 15,8% do Ca, 14,6% do Mg, 9,8% do S, 13,8% do B, 7,6% do Cu, 19,9% do Fe, 22,8% do Mn e 17,5% do Zn.

A despeito da pequena representatividade da biomassa de serapilheira, esse compartimento contém 61,2% do N, 47,2% do P, 9,0% do K, 36,2% do Ca, 25,3% do Mg, 15,5% do S, 22,5% do B, 52,7% do Cu, 1545,5% do Fe, 73,9% do Mn e 53,9% do Zn, destes elementos presentes no tronco (casca e madeira). Ressalve-se, porém, que o estoque de Fe deve estar relacionado à contaminação por óxidos de Fe do solo (SCHUMACHER et al., 2002; HOPPE, 2003; SCHUMACHER et al., 2003).

Tabela 13 – Estoque de macronutrientes nos diferentes componentes da biomassa de *Pinus taeda*, com 17 anos de idade.

Compartimento	N	P	K	Ca	Mg	S
	kg ha ⁻¹					
Acícula	151,85	14,39	47,50	41,22	14,06	9,25
Galho vivo	62,36	5,74	23,30	29,98	12,37	6,16
Galho seco	12,09	0,78	1,97	13,42	2,80	1,55
Copa	226,30	20,91	72,77	84,62	29,23	16,96
Casca do tronco total	58,15	5,72	21,02	21,30	9,57	7,27
base da árvore até 20 cm de Ø ¹	42,00	3,90	13,74	16,74	6,76	5,47
20 cm até 16 cm de Ø	6,93	0,77	3,03	2,01	1,19	0,78
16 cm até 12 cm de Ø	5,05	0,57	2,30	1,41	0,88	0,56
12 cm até 8 cm de Ø	2,89	0,33	1,35	0,79	0,51	0,32
8 cm até o ápice	1,28	0,15	0,60	0,35	0,23	0,14
Madeira do tronco total	191,62	10,80	90,16	110,65	41,20	50,57
base da árvore até 20 cm de Ø ¹	150,12	8,29	69,71	88,17	32,79	39,45
20 cm até 16 cm de Ø	17,79	1,07	8,79	9,80	3,66	4,76
16 cm até 12 cm de Ø	12,98	0,79	6,39	6,99	2,62	3,48
12 cm até 8 cm de Ø	7,43	0,45	3,65	3,95	1,48	1,99
8 cm até o ápice	3,30	0,20	1,62	1,74	0,65	0,89
Biomassa acima do solo	476,07	37,43	183,95	216,57	80,00	74,80
Raiz	91,82	4,94	22,71	44,62	16,03	19,07
Biomassa arbórea	567,89	42,37	206,66	261,19	96,03	93,87
Serapilheira	152,73	7,79	10,05	47,78	12,87	8,94
Biomassa total	720,62	50,16	216,71	308,97	108,9	102,81

(1) Diferentes secções do tronco, entre a base e o ápice da árvore, definidas em função do diâmetro mínimo de colheita com casca, utilizadas para simular a intensidade de aproveitamento do tronco.

Devido, principalmente, à inerente dificuldade de amostragem da biomassa abaixo do solo, alguns estudos não consideram esse compartimento; porém, é bom destacar a representatividade das raízes em termos de estoque de nutrientes.

Reis & Barros (1990) salientaram a importância de se considerar o sistema radicular nos estudos que avaliam a demanda de nutrientes para o crescimento da planta, bem como, quando o objetivo for analisar diferentes métodos de manejo sobre a produtividade das rotações subsequentes, especialmente no que se refere a espécies que regeneram por brotação.

Tabela 14 – Estoque de micronutrientes nos diferentes componentes da biomassa de *Pinus taeda*, com 17 anos de idade.

Compartimento	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g ha ⁻¹				
Acícula	239,11	63,94	2655,49	2531,03	249,80
Galho vivo	216,76	139,67	2544,99	1370,71	293,69
Galho seco	65,35	38,30	1060,16	486,14	32,84
Copa	521,22	241,91	6260,64	4387,88	576,33
Casca do tronco total	193,48	84,91	3582,79	647,73	237,37
base da árvore até 20 cm de Ø ¹	144,68	65,32	2735,00	463,11	154,52
20 cm até 16 cm de Ø	21,07	8,54	367,24	78,61	34,15
16 cm até 12 cm de Ø	15,22	6,09	264,13	57,84	26,21
12 cm até 8 cm de Ø	8,67	3,44	150,03	33,32	15,49
8 cm até o ápice	3,84	1,52	66,39	14,85	7,00
Madeira do tronco total	678,63	231,01	1920,40	5431,69	518,52
base da árvore até 20 cm de Ø ¹	529,66	177,12	1534,41	4331,18	403,01
20 cm até 16 cm de Ø	64,08	23,23	168,20	481,01	49,82
16 cm até 12 cm de Ø	46,53	16,82	120,03	341,86	36,05
12 cm até 8 cm de Ø	26,57	9,59	67,83	192,70	20,54
8 cm até o ápice	11,79	4,25	29,93	84,94	9,10
Biomassa acima do solo	1393,33	557,83	11763,83	10467,30	1332,22
Raiz	338,28	74,37	1591,46	618,88	96,44
Biomassa arbórea	1731,61	839,20	13355,29	11086,18	1428,66
Serapilheira	195,85	166,46	85053,98	4491,07	407,62
Biomassa total	1927,46	798,66	98409,27	15577,25	1836,28

(1) Diferentes secções do tronco, entre a base e o ápice da árvore, definidas em função do diâmetro mínimo de colheita com casca, utilizadas para simular a intensidade de aproveitamento do tronco.

Mesmo que a madeira do tronco em termos médios apresente os menores teores de nutrientes, em decorrência da grande alocação de biomassa, esse componente possui os maiores estoques, para a maioria dos nutrientes, como é possível verificar na Figura 6.

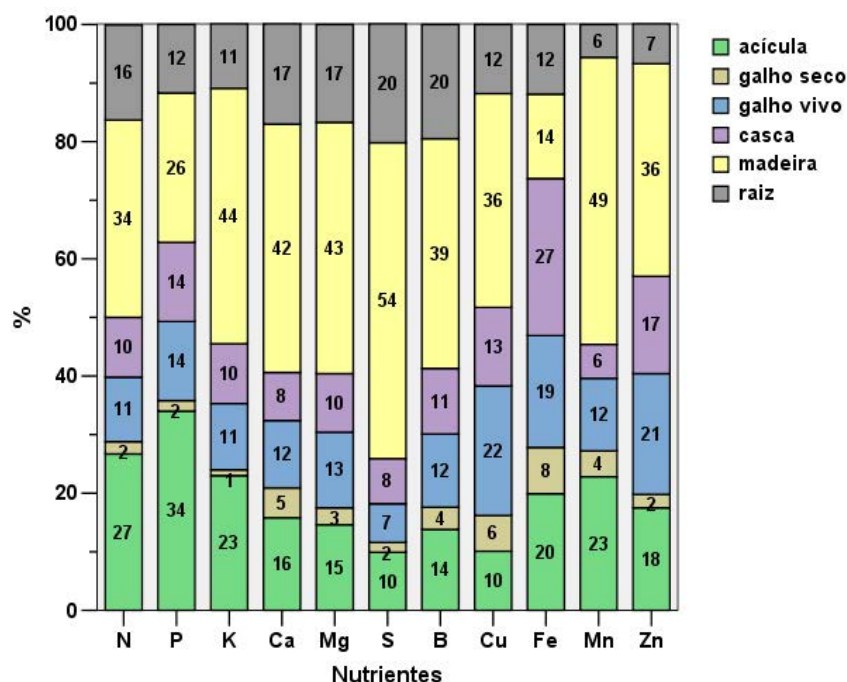


Figura 6 – Distribuição relativa dos nutrientes nos diferentes componentes da biomassa de *Pinus taeda* de 17 anos de idade.

4.3.2 Nutrientes no solo

O estoque de nutrientes no solo é incrementado, principalmente, através das entradas via precipitação atmosférica, mineralização das rochas e minerais, decomposição de resíduos orgânicos e das raízes, e de exsudações das raízes; e é reduzido, pela lixiviação através da água de drenagem, absorção pelas plantas e colheita florestal, além de alguma perda, por volatilização de N (PALLARDY, 2008).

Não obstante, no que se refere à depleção dos nutrientes do solo, uma prática bastante nociva é a queima, utilizada, muitas vezes, para eliminar resíduos de cultura e que, apesar de num primeiro momento elevar a fertilidade na camada superficial de solo, em termos de estoque de nutrientes podem ocorrer grandes perdas (GONÇALVES et al., 2004).

De modo geral, nas regiões tropicais, a entrada de nutrientes via mineralização das rochas é tida como pouco expressiva, ou inexistente, dado o elevado grau de intemperismo dos solos (REIS & BARROS, 1990). Na região de estudo, em função do tipo de solo, os teores de minerais primários potencialmente mineralizáveis podem ser elevados, contudo, as condições climáticas, sobretudo, baixas temperaturas e altos índices pluviométricos condicionam um ambiente de baixa mineralização e elevada lixiviação, o que geralmente está associado a solos de baixa fertilidade.

Do mesmo modo, essas condições climáticas potencializam o acúmulo de matéria orgânica o que é possível verificar pelos elevados teores de nitrogênio total do solo (Tabela 15).

Tabela 15 – Densidade do solo e teor de nutrientes em diferentes profundidades do solo, no povoamento de *Pinus taeda* de 17 anos de idade.

Parâmetro	Profundidade de solo (cm)					
	0 – 10	10 – 20	20 – 30	30 – 40	40 – 50	50 – 60
Densidade do solo (g cm^{-3})	0,85	0,87	0,91	1,14	1,12	1,15
N total (g kg^{-1})	3,8	2,5	2,6	1,6	1,2	1,0
P disponível (mg dm^{-3})	6,4	3,9	2,2	1,5	1,1	1,5
K trocável (mg dm^{-3})	73,5	48,5	31,5	24,0	21,0	22,0
Ca trocável ($\text{cmol}_c/\text{dm}^{-3}$)	5,2	2,5	1,0	0,7	0,4	0,4
Mg trocável ($\text{cmol}_c/\text{dm}^{-3}$)	1,9	1,0	0,4	0,3	0,2	0,2
S disponível (mg dm^{-3})	40,3	36,1	30,2	27,8	19,2	14,9

Onde: N total determinado por combustão seca; extração do solo: P e K, solução Mehlich – 1; Ca e Mg, por solução de KCl (1mol L^{-1}); S, por solução de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ a $500\text{ mg de P L}^{-1}$.

Como a maioria dos processos que representam entrada de nutrientes se dá de forma mais intensa nas camadas superficiais de solo, a maioria dos solos, como é apresentado na Tabela 15, apresenta um padrão de distribuição dos nutrientes decrescente com o aumento da profundidade.

Já a densidade do solo, por sua vez, apresentou tendência contrária, ou seja, aumento dos valores com a profundidade, o que está relacionado, principalmente, com a redução do teor de matéria orgânica em profundidade. Os valores de densidade de solo são inferiores $1,4 \text{ g cm}^3$ indicado por Troeh & Thompson (2007) como de risco para o crescimento radicular e a infiltração de água.

A Tabela 16 traz o conteúdo de nutrientes disponíveis até a profundidade de 60 cm, onde é possível verificar tendência decrescente com a profundidade e grande variação do estoque entre nutrientes.

Tabela 16 – Estoque de nutrientes disponíveis em diferentes profundidades do solo, no povoamento de *Pinus taeda* de 17 anos de idade.

Profundidade (cm)	N	P	K	Ca	Mg	S
	kg ha ⁻¹					
0 – 10	328,5	5,5	62,6	882,2	199,4	34,3
10 – 20	214,2	3,3	42,0	428,3	102,5	31,2
20 – 30	236,8	2,0	28,6	172,3	44,1	27,4
30 – 40	177,1	1,7	27,4	159,7	45,0	31,7
40 – 50	137,2	1,2	23,6	95,5	30,7	21,5
50 – 60	112,1	1,7	25,4	100,0	28,0	17,2
Total	1205,8	15,5	209,5	1838,0	449,7	163,3

Onde: N = fração disponível considerando 10% do nitrogênio total determinado por combustão seca; P e K, extraído com solução Mehlich – 1; Ca e Mg, extraído por solução de KCl (1 mol L^{-1}); S, extraído por solução de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ a $500 \text{ mg de P L}^{-1}$.

4.4 Determinação do ponto de amostragem para casca e madeira do tronco

Dada a dimensão e a grande representatividade da biomassa do tronco, a coleta de amostras, de casca e de madeira, sem critério pode resultar em grandes erros de estimativa do conteúdo de nutrientes.

A possibilidade de coletar amostras representativas de casca e de madeira em um único ponto ao longo do tronco, para estimar adequadamente o estoque de nutrientes, traria maior agilidade nas coletas de campo e substancial redução de custo na realização deste tipo de trabalho, principalmente, em função da diminuição do número de análises químicas.

O conhecimento mais detalhado do comportamento dos nutrientes na casca e na madeira do tronco, já motivou vários estudos com esse objetivo (ZEN et al., 1981; ANDRAE & KRAPFENBAUER, 1983a; ANDRAE & KRAPFENBAUER, 1983b; ANDRAE, 1983; SILVA, 1996 apud BELLOTE & SILVA, 2004; HOPPE, 2003; SAIDELLES, 2005; MORO et al., 2007).

A Tabela 17 traz o teor médio de nutrientes, na casca e na madeira, em diferentes alturas relativas das árvores (90%, 70%, 50%, 30% e 10% da altura total), o teor médio desses pontos, o teor médio ponderado pela biomassa relativa de cada secção (TMP) e o intervalo de confiança para a altura relativa onde se encontra o teor médio ponderado.

Na Tabela 17, é possível verificar que o conteúdo de nutrientes determinado a partir do produto entre a biomassa total e a média aritmética dos teores, obtida com a coleta de amostras em diferentes pontos ao longo do fuste, não garante boas estimativas do estoque de nutrientes, principalmente para a casca.

A irregularidade na distribuição da biomassa e a diferença dos teores de nutrientes ao longo do tronco, para casca e para madeira, exigem que se faça uma ponderação dos teores em função da biomassa que cada amostra representa. Ou ainda, é possível obter o teor médio ponderado (TMP) através do cociente entre a massa total de nutrientes (obtida pelo produto do teor de nutrientes e a biomassa de cada secção) e a biomassa total, para casca e para madeira.

Para se ter uma idéia da irregularidade na distribuição da biomassa ao longo do fuste, basta comparar a biomassa média relativa da parte terminal do tronco (ponteiro), compreendida entre 80 e 100% da altura total das árvores, que corresponde a 2% e a 1%, respectivamente, para casca e madeira, enquanto da base até 20% da altura total, estão compreendidos 43% da biomassa total, tanto para casca como para madeira. E, evidentemente, essa tendência aumenta com a conicidade do tronco. Desse modo, o segmento terminal do tronco, geralmente com teor mais elevado de nutrientes, possui menor biomassa relativa, e não deve ter o

mesmo peso no momento de compor a média dos teores, daí a necessidade de ponderação em função da biomassa relativa.

Tabela 17 – Teor médio de nutrientes em função da altura relativa de coleta de amostras de casca e de madeira do tronco, teor médio ponderado e intervalo de confiança para o ponto de amostragem ao longo do fuste das árvores de *Pinus taeda* de 17 anos de idade.

Nutriente	Pontos de amostragem (altura relativa) ¹					Média geral	TMP	I.C. (%)	
	h0,9	h0,7	h0,5	h0,3	h0,1				
Madeira									
N	(g kg ⁻¹)	2,10a ²	1,45b	1,31bc	1,30bc	1,15c	1,47	1,28	29,3 – 38,9
P		0,16a	0,10b	0,08bc	0,07bc	0,06c	0,10	0,07	26,1 – 35,3
K		0,84a	0,64b	0,60bc	0,55bc	0,51c	0,64	0,54	26,7 – 36,1
Ca		0,60b	0,67ab	0,68ab	0,68ab	0,75a	0,68	0,71	11,5 – 24,4
Mg		0,36a	0,29b	0,28b	0,27b	0,27b	0,29	0,27	11,1 – 22,9
S		0,43a	0,38ab	0,35b	0,34b	0,37ab	0,37	0,35	23,8 – 37,8
B	(mg kg ⁻¹)	6,88a	5,35ab	5,19b	4,96b	4,42b	5,35	4,70	10,9 – 24,4
Cu		2,72a	1,83b	1,53b	1,42b	1,41b	1,78	1,42	28,6 – 39,4
Fe		16,44a	11,04b	10,39b	11,16b	12,39ab	12,29	11,70	43,2 – 58,3
Mn		36,87a	34,13a	35,67 ^a	32,05a	36,13a	34,90	34,50	n.s.
Zn		8,56a	4,18b	3,28b	3,46b	3,31b	4,57	3,43	28,7 – 40,3
Casca									
N	(g kg ⁻¹)	6,57a	4,37b	3,40c	2,95cd	2,60d	3,98	3,09	28,8 – 34,4
P		0,84a	0,51b	0,35c	0,26cd	0,22d	0,44	0,30	35,7 – 41,6
K		3,62a	2,18b	1,32c	0,90cd	0,71d	1,74	1,10	39,8 – 44,3
Ca		1,60a	0,98b	0,92b	0,92b	1,38a	1,17	1,18	12,6 – 23,4
Mg		1,24a	0,77b	0,59c	0,48cd	0,42d	0,71	0,52	32,6 – 40,4
S		0,66a	0,46b	0,41bc	0,39bc	0,36c	0,46	0,39	25,3 – 34,7
B	(mg kg ⁻¹)	16,80a	12,23b	10,67bc	9,96c	9,64c	11,87	10,44	37,1 – 46,9
Cu		5,78a	5,15b	4,69b	4,64b	4,59b	4,97	4,60	10,7 – 22,2
Fe		262,53a	196,42b	196,35b	199,00b	179,37b	206,73	187,56	17,2 – 34,8
Mn		68,80a	50,31b	39,86c	36,14cd	29,75d	44,97	35,33	27,1 – 34,8
Zn		35,56a	24,94b	15,40c	11,52cd	7,56d	19,00	12,39	31,0 – 37,6

Onde: (1) Os pontos de amostragem h0,9; h0,7; h0,5; h0,3 e h0,1, respectivamente, representam 90, 70, 50, 30 e 10% da altura total; (2) valores seguidos, na horizontal, pela mesma letra, não diferem entre si pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro; TMP = teor médio de nutrientes ponderado em função da biomassa; I.C. = intervalo de confiança a 95% de probabilidade, para a altura média de coleta (percentual da altura total); n.s. = estatisticamente não significativo.

A média aritmética só pode ser usada adequadamente para estimar o estoque de nutrientes em duas situações: quando não existir diferença significativa nos teores de nutrientes ao longo do fuste, ou quando o tronco apresentar forma perfeitamente cilíndrica, de modo que todas as secções apresentem a mesma biomassa.

Da mesma forma que a biomassa arbórea foi separada em diferentes componentes, para obtenção de estimativas mais precisas do conteúdo de nutrientes, em função da distribuição da biomassa e dos nutrientes na casca e na madeira, o tronco também deve receber uma abordagem semelhante, até por que, como já foi comentado, juntos representam mais de 80% da biomassa acima do solo.

A utilização de intervalo de confiança para definir o ponto para a coleta de amostras de casca e de madeira do tronco se mostrou bastante eficiente, indicando, com precisão, o intervalo de altura relativa onde probabilisticamente se encontra o teor médio ponderado (TMP); no entanto, se mostrou bastante rigoroso, se confrontado com o teste de comparação de médias, já que este, geralmente, apresenta um intervalo maior com médias não-distintas (Tabela 17).

É importante salientar que os pontos de amostragem indicados neste trabalho são válidos somente para a estimativa do estoque total de nutrientes do tronco. Quando o objetivo for estimar os nutrientes em secções isoladamente, principalmente na parte superior do tronco (ponteiro), tanto para casca como para madeira, é necessário realizar uma amostragem na respectiva região do tronco.

Com base principalmente na comparação de médias dos teores ao longo do fuste, é possível indicar, no caso da coleta de uma única amostra de casca e de madeira, a altura relativa equivalente a 30% da altura total como o ponto ótimo de amostragem desses componentes.

É possível que esse padrão apresente variação entre espécies e para a mesma espécie em diferentes fases de desenvolvimento, porém, alguns estudos estão indicando com certa consistência que o ponto de amostragem de casca e de madeira do tronco se encontra em torno de 1/3 da altura total da árvore (ANDRAE & KRAPPENBAUER, 1983a; ANDRAE & KRAPPENBAUER, 1983b; ANDRAE, 1983; HOPPE, 2003).

Hoppe (2003), por exemplo, estudou a variação dos teores de nutrientes ao longo do fuste, em *Platanus x acerifolia* com 5,5 anos de idade, onde indicou que as amostras para a estimativa do estoque de nutrientes na casca e na madeira, respectivamente, devem ser coletadas a 27,3% e a 25% da altura total das árvores.

Semelhantemente, Andrae & Krapfenbauer (1983a) e Andrae & Krapfenbauer (1983b), para *Araucaria angustifolia* de 17 anos de idade e *Eucalyptus saligna* de 4 anos de idade, determinaram que o ponto de amostragem no tronco (casca e madeira), deveria ser a 34% e a 23% da altura total das árvores, respectivamente. Esses pesquisadores determinaram o ponto de amostragem com base no centro de gravidade do tronco, numa nítida alusão de que mais importante do que a variação dos teores de nutrientes ao longo do fuste é a distribuição da biomassa.

Nas Figuras 7 e 8, respectivamente, para casca e madeira do tronco, é possível observar o comportamento dos macro e micronutrientes ao longo do fuste de *Pinus taeda*.

Para casca, em maior ou menor grau, o padrão que se verifica ao observar os teores de nutrientes, é de elevação da base em direção ao ápice, com exceção do Ca, que apresenta uma tendência mais curvilínea.

Na madeira, o padrão é mais variável, como tendência crescente da base para o ápice, no caso do N, P, K, Mg, B, Cu e Zn; decrescente para o Ca; comportamento curvilíneo para o S e o Fe; e o Mn, demonstrou teor constante nos diferentes pontos de amostragem.

O comportamento dos teores de nutrientes ao longo do fuste, verificado neste trabalho para o *Pinus taeda*, aproxima-se dos resultados obtidos por Andrae & Krapfenbauer, 1983a; Andrae & Krapfenbauer, 1983b; Andrae, 1983; Hoppe, 2003.

A variação dos teores nas diferentes posições ao longo do fuste está ligada, principalmente, à diferença de mobilidade entre os nutrientes no tecido vegetal.

Assim, enquanto os elementos imóveis ou pouco móveis acumulam-se na base do tronco ou não variam expressivamente ao longo do fuste, os nutrientes com alta mobilidade apresentam os maiores teores na extremidade superior do tronco (ZEN et al., 1981; ANDRAE & KRAPFENBAUER, 1983a; PEREIRA et al., 1984; REIS & BARROS, 1990).

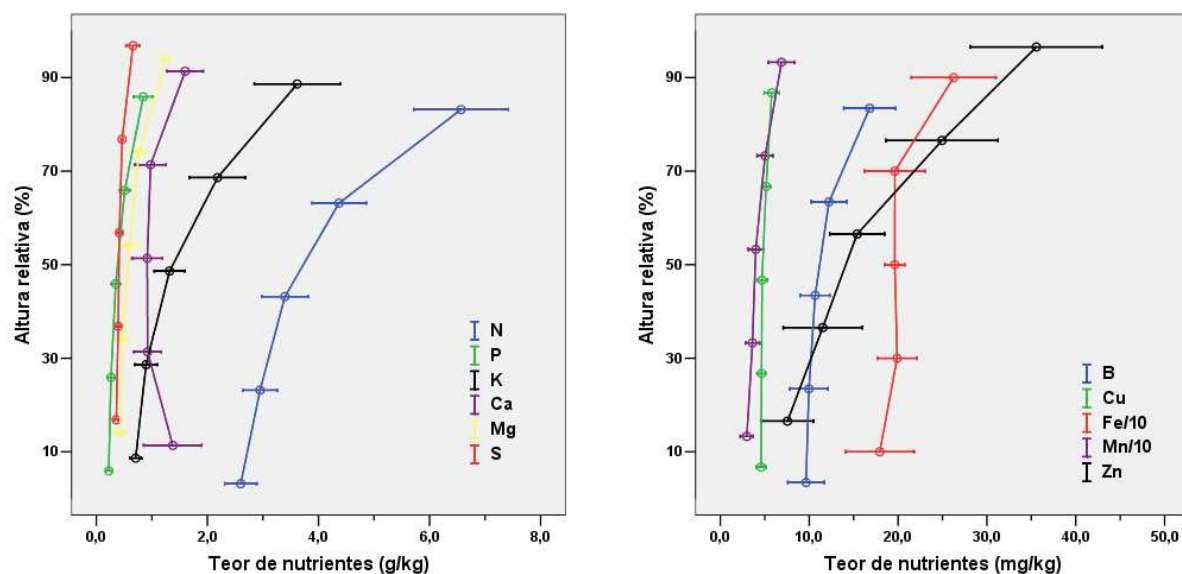


Figura 7 – Variação na concentração de macro e micronutrientes na casca, ao longo do tronco de *Pinus taeda* com 17 anos de idade.

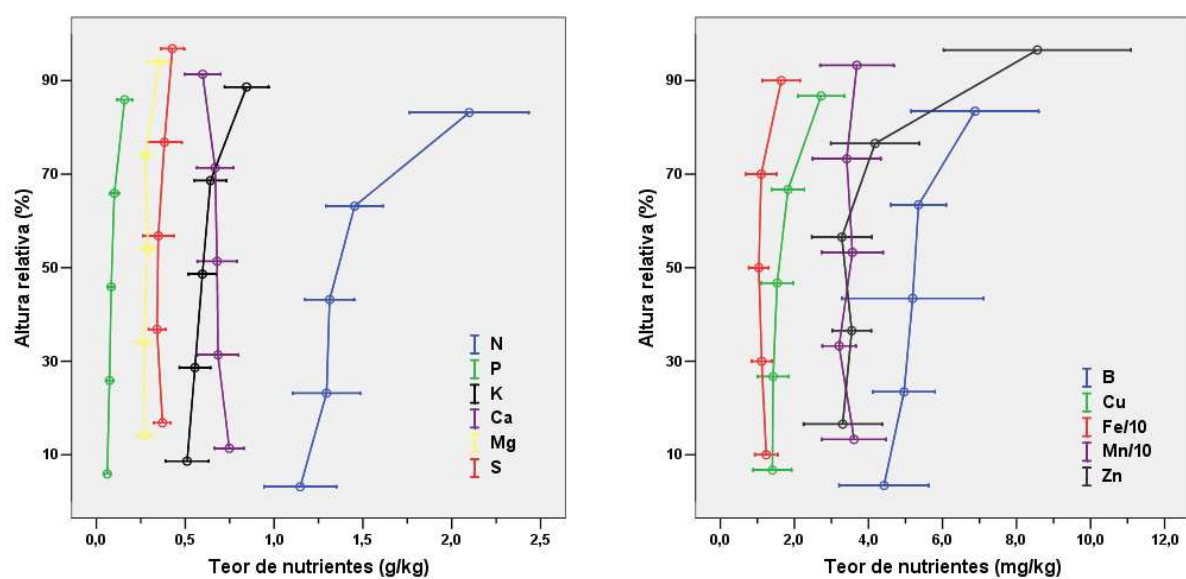


Figura 8 – Variação na concentração de macro e micronutrientes na madeira, ao longo do tronco de *Pinus taeda* com 17 anos de idade.

4.5 Exportação de nutrientes em função da intensidade de colheita da biomassa

Em termos gerais, a colheita de biomassa é responsável pelas maiores remoções de nutrientes do sítio florestal (REIS & BARROS, 1990). Parte desses nutrientes pode ser reposta através da aplicação de fertilizantes, mas, além dos aspectos econômicos e ecológicos da utilização desse tipo de insumo, dificilmente, isso se dá em mesmo nível em termos quantitativos e principalmente qualitativos, restringindo-se, na maior parte dos casos, à tríade de elementos NPK.

A exportação de nutrientes por ocasião da colheita florestal depende da quantidade de biomassa e da concentração de nutrientes. O teor de nutrientes, por sua vez, pode variar em função de vários fatores como: espécie (capacidade de absorção, distribuição e utilização dos nutrientes); componente da biomassa; solo (produtividade); idade da floresta; condições de desenvolvimento, como densidade de plantio e competição, entre outros (PEREIRA et al., 1984; WARING & SCHLESINGER, 1985; BINKLEY, 1986; TEIXEIRA et al., 1989; REIS & BARROS, 1990; PRITCHETT, 1990; PALLARDY, 2008).

Uma forma de expressar conjuntamente esses fatores é o cálculo do coeficiente de utilização biológica (CUB), que corresponde à taxa de conversão de nutrientes em biomassa, obtida através do quociente entre a biomassa e a quantidade de nutriente, ambos com a mesma unidade (BARROS et al., 1986). Esse valor demonstra quantas unidades de biomassa é formada por unidade de nutriente, e quanto maior o valor, mais eficiente é a conversão dos nutrientes em biomassa. Em termos práticos, esse coeficiente deve ser o maior possível, com isso, será exportado menos nutriente por unidade de biomassa (Tabela 18).

No geral, os micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn) têm os maiores valores para o CUB.

Com exceção do Cu, por pequena diferença, a acícula é o componente da biomassa que apresenta os menores CUBs e, conseqüentemente, a menor eficiência de utilização dos nutrientes. Portanto, proporcionalmente, é com a colheita das acículas que ocorre a maior exportação relativa de nutrientes, especialmente de N, K e Ca.

Ainda para a acícula, é possível verificar que existe grande variabilidade do CUB entre os nutrientes, onde, em um extremo é possível formar 191.273,1 unidades de biomassa, a partir de uma unidade de Cu, no outro, N que forma apenas 80,5.

Por outro lado, algo bastante desejável, a madeira, o componente de maior interesse para a silvicultura, apresenta, na média, os maiores valores para o CUB.

Tabela 18 – Coeficiente de utilização biológica para os diferentes componentes da biomassa de *Pinus taeda* de 17 anos de idade.

Nutriente	Acícula	Galho vivo	Galho seco	Casca do tronco	Madeira do tronco	Raiz
N	80,5	361,8	600,5	323,0	826,1	375,0
P	849,9	3930,3	9307,7	3283,2	14657,4	6969,6
K	257,5	968,2	3685,3	893,4	1755,8	1516,1
Ca	296,7	752,5	541,0	881,7	1430,6	771,6
Mg	869,8	1823,8	2592,9	1962,4	3842,2	2147,8
S	1322,2	3662,3	4683,9	2583,2	3130,3	1805,5
B	51148,0	104078,2	111094,1	97064,3	233264,1	101779,6
Cu	191273,1	161523,6	189556,1	221201,41	685251,7	462955,5
Fe	4605,6	8864,5	6848,0	5241,7	82430,7	21634,2
Mn	4832,0	16458,6	14934,0	28993,6	29143,8	55632,8
Zn	48959,2	76815,7	221071,9	79117,0	305292,0	357009,5

Para exemplificar o aumento da exportação de nutrientes com a colheita de outros componentes, além da madeira do tronco, a Tabela 19 apresenta três simulações, quais sejam: madeira, madeira mais casca e remoção de toda biomassa acima do solo.

A colheita somente da madeira do tronco é a modalidade mais conservadora de utilização da biomassa e a condição ideal no que se refere à redução do impacto nutricional dessa atividade (Tabela 19).

Tabela 19 - Exportação de nutrientes (kg ha^{-1}) em função da intensidade de colheita da biomassa de *Pinus taeda*, com 17 anos de idade.

Nutriente	Intensidade de colheita da biomassa		
	Madeira ¹	Madeira + casca ¹	Árvore inteira ²
Biomassa (Mg ha^{-1})	155,91	174,37 (11,8) ³	219,13 (40,5)
N	188,32	245,19 (30,2)	476,07 (152,8)
P	10,60	16,17 (52,5)	37,43 (253,1)
K	88,54	108,96 (23,1)	183,95 (107,8)
Ca	108,91	129,86 (19,2)	216,57 (98,9)
Mg	40,55	49,89 (23,0)	80,00 (97,3)
S	49,68	56,81 (14,0)	74,80 (50,6)
B	0,67	0,86 (28,4)	1,40 (109,0)
Cu	0,23	0,31 (34,8)	0,56 (143,5)
Fe	1,89	5,41 (186,2)	11,76 (522,5)
Mn	5,35	5,98 (11,8)	10,47 (95,7)
Zn	0,51	0,74 (45,1)	1,33 (160,8)

Onde: (1) Colheita da madeira ou madeira mais casca do tronco até um diâmetro mínimo de 8 cm com casca na extremidade superior do fuste; (2) biomassa total acima do solo (acícula, galho vivo, galho seco, madeira do tronco e casca do tronco); (3) valores entre parênteses referem-se ao aumento percentual de biomassa ou nutrientes, em relação à colheita apenas da madeira.

A colheita da casca, além da madeira, reflete um aumento de 11,8% na biomassa, enquanto a exportação de nutrientes acresce entre 11,8% para o Mn e 186,2% para o Fe. E se considerado os outros componentes da árvore, acima do solo, a elevação na exportação de nutrientes é de 50,6% para o S e de 522,5% para o Fe, enquanto a biomassa aumenta apenas 40,5%.

O incremento desproporcional entre biomassa e nutrientes para os métodos de colheita florestal, deve-se à diferença nos teores nutricionais entre a madeira e os demais componentes, já que, via de regra, são bem superiores nesses.

4.6 Estimativa do número de rotações com base no balanço nutricional

A Figura 9 apresenta, de forma absoluta e relativa, a compartimentalização dos nutrientes no povoamento de *Pinus taeda*, onde é possível verificar uma grande variação do estoque entre os nutrientes.

Chama a atenção, em termos relativos, a grande quantidade de nutrientes presentes na biomassa (biomassa arbórea e serapilheira), podendo variar de 14,4% para Ca, até 76,4% para P, sugerindo previamente que esse é um elemento especialmente importante no que se refere à sustentabilidade nutricional. Analisando a distribuição do P na biomassa (biomassa arbórea e serapilheira), é digno de nota o acúmulo de 32% desse nutriente na copa (galho vivo, galho seco e acícula), sendo que, somente a acícula (com 4,6% da biomassa) representa 22%, ao passo que a madeira (com 59% da biomassa) contém 16%. Portanto, métodos de colheita que removem a biomassa da copa são especialmente impactantes para o P, devido ao baixo estoque disponível desse nutriente no solo.

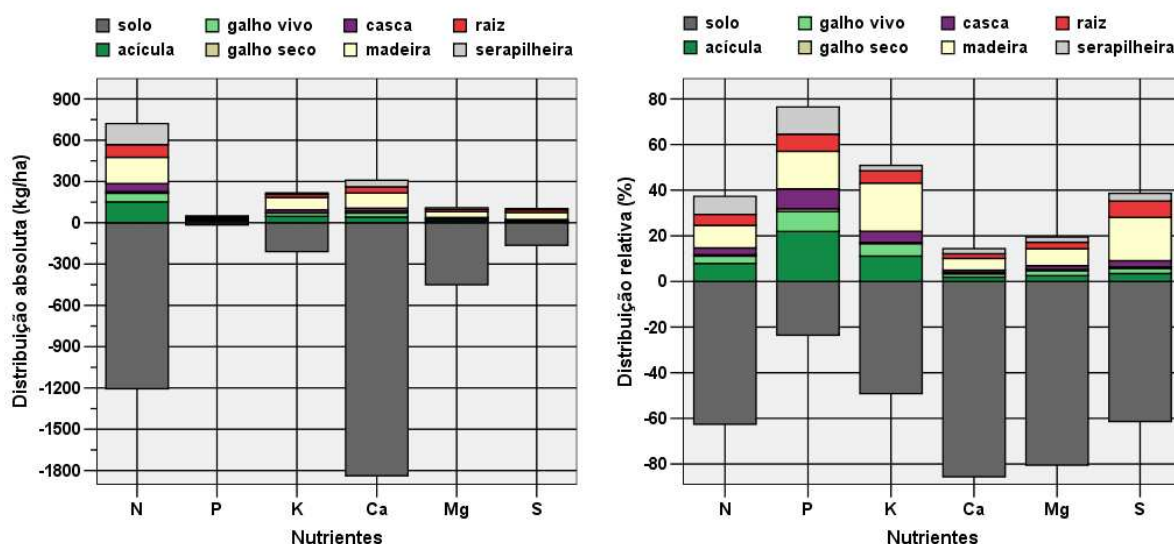


Figura 9 – Distribuição absoluta e relativa dos nutrientes no povoamento de *Pinus taeda* de 17 anos de idade.

Da mesma forma, K, S e N também apresentam equilíbrio delicado, com 50,8%, 38,6% e 37,4%, respectivamente, do estoque de nutrientes do sistema acumulados na biomassa.

Em termos absolutos, os maiores estoques de nutrientes no solo são para Ca e N, porém, são os nutrientes removidos em maiores quantidades através da colheita da biomassa.

Considerando as entradas via precipitação atmosférica, o estoque de nutrientes disponíveis no solo e no resíduo florestal (de acordo com os diferentes métodos de colheita da biomassa), foi possível estabelecer o balanço nutricional e a estimativa do número potencial de rotações de 17 anos, para o *Pinus taeda* (Tabela 20).

Ao analisar a Tabela 20, verifica-se que, independentemente do sistema de colheita, o balanço nutricional é sempre negativo para N, Ca e Mg, ou seja, para esses nutrientes, as entradas via precipitação atmosférica não compensam a exportação pela colheita da biomassa.

Nessas condições, o que mantém um número razoável de rotações para N, Ca e Mg, pelo menos para métodos menos intensivos de colheita da biomassa, são os grandes estoques desses elementos no solo.

Já o P, K e S, deixam uma situação de sustentabilidade (indefinidos rotações) nos sistemas de colheita mais conservadores, para uma condição de balanço negativo no sistema de colheita total da biomassa acima do solo.

O comportamento do balanço nutricional em função do método de colheita está relacionado ao impacto relativo diferenciado, em relação à intensidade de colheita da biomassa, para cada nutriente. Se compararmos o aumento relativo da exportação de nutriente entre a colheita somente da madeira e da biomassa total, o incremento é de 176% para N, 231% para P, 125% para K, 127% para Ca, 113% para Mg e 65% para S.

Outro indicativo do comportamento distinto dos nutrientes quanto ao método de colheita da biomassa, é o número de rotações potencial até o esgotamento dos nutrientes disponíveis do sistema (Tabela 20).

Na prática, o esgotamento absoluto dos nutrientes não acontece, o número de rotações é uma ferramenta de manejo e indica uma transição para um nível de produtividade inferior. Assim, se considerarmos o P em três rotações sucessivas, com colheita total da biomassa, provavelmente, no quarto ciclo produtivo será verificado uma redução da produtividade, em decorrência da limitação por esse nutriente.

Cabe ressaltar, contudo, que essa é uma análise estanque que, não prevê possíveis reações por parte da espécie às restrições das condições nutricionais do meio o que, geralmente provoca redução do conteúdo de nutrientes na biomassa (menor exportação pela colheita), seja por redução do teor no tecido vegetal (aumento da eficiência nutricional) e/ou, através da diminuição da produtividade.

Tabela 20 – Estimativa do número de rotações para *Pinus taeda*, com base nas entradas via precipitação atmosférica, estoque de nutrientes na biomassa e no solo (disponíveis) e nas saídas via colheita da biomassa nos desbastes e no corte raso.

Colheita de biomassa		N	P	K	Ca	Mg	S
		kg ha ⁻¹					
Madeira ¹ (até 8 cm)	1° desbaste	27,22	3,33	8,99	15,98	4,16	6,58
	2° desbaste	29,49	3,61	9,74	17,32	4,51	7,12
	Corte raso	188,32	10,60	88,54	108,91	40,55	49,68
	Total	245,03	17,54	107,27	142,21	49,22	63,38
	Balanço	- 114,47	19,18	76,33	- 52,45	- 20,66	14,99
	n° de rotações	17	+ ³	+	41	27	+
Madeira + casca do tronco ¹ (até 8 cm)	1° desbaste	38,46	4,50	12,65	20,89	5,58	8,33
	2° desbaste	41,66	4,87	13,71	22,64	6,04	9,01
	Corte raso	245,19	16,17	108,96	129,86	49,89	56,81
	Total	325,31	25,54	135,32	173,39	61,51	74,15
	Balanço	- 194,75	11,18	48,28	- 83,63	- 32,95	4,22
	n° de rotações	10	+	+	26	17	+
Biomassa total ²	1° desbaste	96,40	9,91	27,55	50,86	11,99	14,32
	2° desbaste	104,43	10,73	29,85	55,10	12,99	15,51
	Corte raso	476,07	37,43	183,95	216,57	80,00	74,80
	Total	676,90	58,07	241,36	322,54	104,97	104,63
	Balanço	- 546,34	- 21,35	- 57,76	- 232,78	- 76,41	- 26,26
	n° de rotações	4	3	7	9	7	10

(1) Colheita da madeira e/ou casca do tronco até um diâmetro mínimo de colheita de 8 cm com casca na extremidade do fuste; (2) biomassa total acima do solo: acícula, galhos, madeira e casca do tronco; (3) indefinidas rotações (sustentabilidade).

Nesse sentido, Bizon (2005) ao considerar a relação existente entre produtividade e sustentabilidade, em oito povoamentos de *Pinus taeda* entre 19 e 29 anos de idade, encontrou correlação negativa entre o número de ciclos de 25 anos

para N e o incremento médio anual. Portanto, os sítios mais produtivos, por extraírem maiores quantidades de nutrientes a cada rotação, tendem a atingir a exaustão mais rapidamente, o que indica que a manutenção de níveis elevados de produtividade dependerá do uso de fertilizantes, baixa intensidade de colheita da biomassa e princípios conservacionistas (BIZON, 2005).

Quanto ao estoque de nutrientes no solo, pode parecer excessivamente conservadora a abordagem, ao considerarmos apenas 10% do N total e formas disponíveis ou trocáveis para os demais elementos, como fizeram Gonçalves et al. (2002), Bizon (2005) e Voigtlaender (2007), no entanto, como a estimativa do número de rotações tem como principal objetivo a prognose do efeito das práticas de manejo em relação à sustentabilidade nutricional, a ponderação em termos de nutrientes disponíveis parece ser a mais indicada.

Por fim, com base no que foi analisado, é possível definir uma sequência de nutrientes, quanto ao risco de limitação da produtividade, quando se consideram, principalmente níveis mais intensos de utilização da biomassa: $P > N > K = Mg > Ca > S$. No entanto, como foi possível verificar, em função da diferença de sensibilidade ao método de colheita por parte dos nutrientes, esse cenário pode ser alterado através da redução da intensidade de colheita da biomassa.

Em termos médios, para oito povoamentos de *Pinus taeda*, Bizon (2005) estabeleceu a seguinte sequência provável de limitação nutricional: $N > P > Mg > Ca, K$; no entanto, quanto à sensibilidade ao sistema de manejo a ordem foi a seguinte: $P > N > K > Mg > Ca$.

5 CONCLUSÕES

A biomassa dos diferentes componentes das árvores de *Pinus taeda*, aos 17 anos de idade, apresentou a seguinte seqüência de acúmulo, em Mg ha^{-1} : madeira do tronco, 158,30; raiz, 34,43; galho vivo 22,56; casca, 18,78; acícula, 12,23 e galho seco, 7,26.

Em termos totais (acícula, galho vivo, galho seco, madeira do tronco, casca do tronco e raiz), a biomassa de *Pinus taeda* aos 17 anos de idade apresentou o seguinte estoque de nutrientes (em kg ha^{-1}): 567,89 de N; 42,37 de P; 206,66 de K; 261,19 de Ca; 96,03 de Mg; 93,87 de S; 1,73 de B; 0,84 de Cu; 13,36 de Fe; 11,09 de Mn e 1,43 de Zn. Sendo que a biomassa do tronco (madeira e casca) contém 44,0% do N, 39,0% do P, 53,8% do K, 50,5% do Ca, 52,9% do Mg, 61,6% do S, 50,4% do B, 37,6% do Cu, 41, 2% do Fe, 54,8% do Mn e 52,9% do Zn.

A biomassa de serapilheira acumulada foi de $14,93 \text{ Mg ha}^{-1}$, com um estoque de nutriente, em kg ha^{-1} , de 152,73 de N; 7,79 de P; 10,05 de K; 47,78 de Ca; 12,87 de Mg; 8,94; 0,20 de B; 0,17 de Cu; 85,05 de Fe; 4,49 de Mn e 0,41 de Zn.

O estoque de nutrientes disponíveis no solo até 60 cm de profundidade, em kg ha^{-1} , é de 1.838,0 para Ca; 1.205,8 para N; 449,7 para Mg; 209,5 para K; 163,3 para S e 15,5 para P.

Os teores de nutrientes na casca e na madeira apresentaram grande variação ao longo do fuste, com predomínio de tendência crescente da base do tronco em direção ao ápice.

A coleta de amostras de casca e de madeira do tronco, com o objetivo de estimar o estoque de nutrientes, é mais indicada a 30% da altura total da árvore.

Independentemente da intensidade de colheita da biomassa (madeira; madeira e casca ou biomassa arbórea total acima do solo) o balanço nutricional para o N, Ca e Mg é sempre negativo.

Quanto ao método de colheita florestal, para a remoção total da biomassa arbórea acima do solo, o balanço nutricional é negativo para todos os nutrientes.

Um nutriente será mais ou menos suscetível à limitação de produção, dependendo do estoque no solo, do nível com que é realimentado pelas precipitações atmosféricas e da intensidade com que é exportado através da colheita florestal.

Com base na exportação de nutrientes nas diferentes intensidades de colheita da biomassa, balanço nutricional e número potencial de rotações, foi possível estabelecer a seguinte seqüência quanto ao risco de limitação da produtividade, quando se considera principalmente níveis mais intensos de utilização da biomassa: $P > N > K = Mg > Ca > S$.

A manutenção dos resíduos distribuídos uniformemente na superfície do solo é uma medida efetiva na redução do impacto nutricional da colheita florestal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBAUGH, T. J.; ALLEN, H. L.; DOUGHERTY, P. M.; JOHNSON, K. H. Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability. **Forest Ecology and Management**, v.192, p.3 – 19, 2004.

ANDRAE, F. Segundo inventário de biomassa e nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus saligna* Smith no sul do Brasil. In: ANDRAE, F.; KRAPPENBAUER, A. **Pesquisa austriaco-brasileira (1973-1982)**. Santa Maria, 1983. p. 86-112.

ANDRAE, F.; KRAPPENBAUER, A. Inventário de um reflorestamento de araucária de 17 anos em Passo Fundo – RS: inventário de nutrientes. In: _____. **Pesquisa austriaco-brasileira (1973-1982)**. Santa Maria, 1983a. p. 30-55.

ANDRAE, F.; KRAPPENBAUER, A. Estudos da situação da biomassa e nutrientes de um reflorestamento de quatro anos com *Eucalyptus saligna* Smith em Santa Maria – RS. In: _____. **Pesquisa austriaco-brasileira (1973-1982)**. Santa Maria, 1983b. p. 68-85.

BALDWIN Jr. et al. The effects of spacing and thinning on stand and tree characteristics of 38-year-old Loblolly Pine. **Forest Ecology and Management**, v.137, p.91 – 102, 2000.

BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; CARMO, D.; NEVES, J. C. L. Classificação nutricional de sítios florestais – descrição de uma metodologia. **Revista Árvore**, v.10, n.1, p.112–120, 1986.

BARROS FILHO, N. F. **Produção e partição de biomassa e de nutrientes e recomendação de fertilizantes para o *Pinus taeda* L. (NUTRIPINUS)**. 2003. 56f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H.D. Sampling techniques and nutritional evaluations in eucalypt plantations. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (eds.) **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004, cap.5, p.113-139.

BINKLEY, D. **Forest nutrition management**. New York: John Wiley & Sons, 1986. 290p.

BIZON, J. M. C. **Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de *Pinus taeda* L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes.** 2005. 95f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005.

BURGER, L.M.; RICHTER, H.G. **Anatomia da Madeira.** São Paulo: Nobel, 1991. 154p.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** 10.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004. 400p.

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

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas.** Londrina, Editora Planta, 2006. 403p.

GONÇALVES, J. L. M.; MENDES, K. C. F. S.; SASAKI, C. M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo.** Viçosa, v.25, n.3, 2001, p.601-616.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V. A. G.; GAVA, J. L. An evaluation of minimum and intensive soil preparation regarding fertility and tree nutrition. In: GONÇALVES, J.L.M. & BENEDETTI, V. (eds.) **Forest nutrition and fertilization.** Piracicaba: IPEF, 2004. cap.2, p.13-64.

GONÇALVES, J. L. M.; STAPE, J. L.; BENEDETTI, V.; WICHERT, M. C. P.; GAVA, J. L. Manejo de resíduos vegetais e preparo do solo. In: GONÇALVES, J.L.M. & STAPE, J. L. (eds.) **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais.** Piracicaba: IPEF, 2002. cap.3, p.131-204.

HOPPE, J. M. **Biomassa e nutrientes em *Platanus x acerifolia* (Aiton) Willd. estabelecido no município de Dom Feliciano – RS.** 2003,143f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

INMET. Oitavo Distrito de Meteorologia (8º DISME). Seção de observação e meteorologia aplicada – SEMA. Porto Alegre, relatório nº 027/2008, protocolado sob nº 4294, 24/03/2008, 4p.

KRAPFENBAUER, A.; ANDRAE, F. Inventário de um reflorestamento de araucária de 17 anos em Passo Fundo – RS: inventário da biomassa. In: ANDRAE, F.; KRAPFENBAUER, A. **Pesquisa austriaco-brasileira (1973-1982)**. Santa Maria, 1983a. p. 30-55.

LADEIRA, B. C.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; BARROS, N. F. Produção de biomassa de eucalipto sob três espaçamentos em uma seqüência de idade. **Revista Árvore**, v.25, n.1, p.69 – 78, 2001.

LANDSBERG, J. J. **Physiological ecology of forest production**. London: Academic Press, 1986. 198p.

LEITE, F. P.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SANS, L. M.; FABRES, A. S. Crescimento de *Eucalyptus grandis* em diferentes densidades populacionais. **Revista Árvore**, v.21, n.3, p.313 – 321, 1997.

LELES, P. S. S.; REIS, G. G.; REIS, M. G. F.; MORAIS, E. J. Relações hídricas e crescimento de árvores de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado. **Revista Árvore**, v.22, n.1, p.41 – 50, 1998.

MARTIN, T. A.; JOKELA, E. J. Stand development and production dynamics of loblolly pine under a range of cultural treatments in north-central Florida USA. **Forest Ecology and Management**, v.192, p.39 – 58, 2004.

MENDES, C. J. Influência da idade em *Pinus taeda* sobre a qualidade da Madeira para produção de celulose. **IPEF**, v.9, n.27, p.81 – 90, 1993. (Série Técnica).

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MURAOKA, T. et al. Análises químicas de tecido vegetal. In: SILVA, F.C. (Org.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. cap. 4, p.171-224.

MORO, L.; REISSMANN, C. B.; SILVA, H. D. et al. Modelos matemáticos para estimativa de exportação de nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* L. **Floresta**, Curitiba, v.37, n.2, mai./ago., p. 223 – 230, 2007.

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

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988. 434p.

OKI, V. K. **Impactos da colheita de *Pinus taeda* sobre o balanço hídrico, a qualidade da água e a ciclagem de nutrientes em microbacias**. 2002. 71f. Dissertação (Mestre em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

PALLARDY, S. **Physiology of woody plants**. San Diego: Academic Press, 2008. 454p.

PEREIRA, A. R.; BARROS, N. F.; ANDRADE, D. C.; CAMPOS, P. T. A. Concentração e distribuição de nutrientes em *Eucalyptus grandis* em função da idade, cultivado na região do cerrado. **Brasil Florestal**, n.59, p.27 – 37, 1984.

POGGIANI, F. Nutrient cycling in *Eucalyptus* and *Pinus* plantations ecosystems. Silvicultural implications. **IPEF** V.31, p.33 – 40, 1985.

POGGIANI, F.; SCHUMACHER, M.V. Nutrient cycling in native forests. In: GONÇALVES, J.L M.; BENEDETTI, V. (eds.). **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004, cap.5, p.287 – 305.

PRITCHETT, W. L. **Suelos forestales: propiedad, conservación y mejoramiento**. México: Limusa Noriega, 1990. 634p.

RAMEZOV, N.P. The method of studying the biological cycle of elements in forests. **Pochvovedenic**, 1: 71 – 79, 1959.

REIS, M. G. F.; BARROS, N. F.; KIMMINS, J. P. Acúmulo de nutrientes em uma seqüência de idade de *Eucalyptus grandis* W. Hill (ex-Maiden) plantado no cerrado, em duas áreas com diferentes produtividades, em Minas Gerais. **Revista Árvore**, v.11, n.1, p.1 – 15, 1987.

REIS, M.G.F.; BARROS, N.F. Ciclagem de nutrientes em plantios de eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. (eds). **Relação solo eucalipto**. Viçosa: Ed. Folha de Viçosa, 1990. cap.7, p.265-302.

REIS, M. G. F.; KIMMINS, J. P.; REZENDE, G. C.; BARROS, N. F. Acúmulo de biomassa em uma seqüência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, v.9, n.2, p.149 – 162, 1985.

SAIDELLES, F. L. F. **Determinação da biomassa e altura de amostragem para a quantificação de nutrientes em *Acacia mearnsii* De Wild.** 2005. 97f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

SAMUELSON, L. J.; JOHNSEN, K.; STOKES, T. Production, allocation, and stemwood growth efficiency of *Pinus taeda* L. stands in response to 6 years of intensive management . **Forest Ecology and Management**, v.192, p.59 – 70, 2004.

SAS. **Statistical analysis system**: Programa de computador, ambiente VM. Cary, 1993. Versão 6.08.

SCHUMACHER, M. V.; COPETTI, L.; WITSCHORECK, R. **Quantificação da biomassa e nutrientes em um povoamento de *Pinus taeda* aos 18 anos de idade na região de Cambará do Sul – RS.** Santa Maria, RS: UFSM/FATECIENS, Departamento de Ciências Florestais. 2002a. 47p. (Relatório Técnico).

SCHUMACHER, M. V.; HOPPE, J. M.; BARBIERI, S. J.; WITSCHORECK, R. **Quantificação da biomassa e do conteúdo de nutrientes no corte raso de uma floresta de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. na região de Quedas do Iguaçu – PR.** Santa Maria, RS: UFSM/FATECIENS, Departamento de Ciências Florestais. 2002b. 78p. (Relatório Técnico).

SCHUMACHER, M. V.; HOPPE, J. M.; WITSCHORECK, R.; SALVADEGO, M. **Quantificação do carbono e dos nutrientes em florestas de eucalipto de diferentes idades.** Santa Maria, RS: UFSM/FATECIENS, Departamento de Ciências Florestais, 2003. 112p. (Relatório Técnico).

SCHUMACHER, M.V.; VIERA, M.; BONACINA, D.M. **Quantificação dos nutrientes no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. no estado do Rio Grande do Sul.** Santa Maria, RS: UFSM/FATECIENS, Departamento de Ciências Florestais, 2006. 17p. (Relatório Técnico).

SCHUMACHER, M.V.; VIERA, M.; PISSININ, L, Z.; WITSCHORECK, R. **Devolução de serapilheira e nutrientes em área de segunda rotação com *Pinus taeda* L.** Santa Maria, RS: UFSM/FATECIENS, Departamento de Ciências Florestais, 2007. 27p. (Relatório Técnico).

SCHUMACHER, M. V.; LOPES, V. G. **Avaliação das características químicas da água em florestas de pinus no sul do Brasil (2006 – 2016).** Santa Maria, RS: UFSM/FATECIENS, Departamento de Ciências Florestais. 2008. p. (Relatório Técnico).

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R. **Quantificação da biomassa e dos nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. em Cambará do Sul – RS**. Santa Maria, RS: UFSM/FATECIENS, Departamento de Ciências Florestais. 2008. 37p. (Relatório Técnico).

SETTE JUNIOR, C. R.; NAKAJIMA, N. Y.; GEROMINI, M. P. Captura de carbono orgânico em povoamentos de *Pinus taeda* L. na região de Rio Negrinho, SC. **Floresta**, v. 36, n.1, jan./abr., p.33 – 44, 2006.

SOCHER, L. G.; RODERJAN, C. V.; GALVÃO, F. Biomassa aérea de uma floresta Ombrófila Mista Aluvial no município de Aracucária (PR). **Floresta**, v.38, n.2, abr./jun., p.245 – 252, 2008.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, EMATER/RS, 2002. 107p.

SWITZER, G. L.; NELSON, L. E. Nutrient accumulation and cycling in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation ecosystems: the first twenty years. **Soil Science Society of America**, Madison, v.36, p.143-147, 1972.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C. BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).

TEIXEIRA, J. L.; BARROS, N. F.; COSTA, L. M. et al. Biomassa e conteúdo de nutrientes de duas espécies de eucalipto em diferentes ambientes do Médio Rio Doce, MG. **Revista Árvore**, v.13, n.1, p.34-50, 1989.

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. **Solos e fertilidade do solo**. São Paulo: Andrei, 2007. 718 p.

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

VOIGTLAENDER, M. **Caracterização hidrológica e biogeoquímica de microbacias: uma comparação entre Mata Atlântica e *Pinus taeda* L.** 2007. 74f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

WARING, R. H.; SCHLESINGER, W. H. **Forest ecosystems: concepts and management**. San Diego: Academic Press, 1985. 340 p.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R.; SCHUMACHER, M. V. Fixação de carbono em Floresta Ombrófila Mista em diferentes estágios de regeneração. In: SANQUETTA, C. R. et al. (eds.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: 2002, 265p.

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

ZHANG, Y.; BORDERS, B. E. Using a system mixed-effects modeling method to estimate tree compartment biomass for intensively managed loblolly pines an allometric approach. **Forest Ecology and Management**, v.194, p.145-157, 2004.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Fotos da coleta de biomassa no povoamento de *Pinus taeda* de 17 anos de idade, em Cambará do Sul (RS).







APÊNDICE B – Equações de regressão e estatísticas de ajuste das equações utilizadas para estimar o conteúdo de nutrientes nos diferentes compartimentos da biomassa de *Pinus taeda*, com 17 anos de idade.

Equação		$R^2_{\text{ajust.}}$	Syx	Syx(%)
Acícula				
N	$\ln y = 6,748749 - 60,467783.(d^2.h^{-1})^{-1}$	0,895	0,2697	4,94
P	$\ln y = 4,494911 - 66,086001.(d^2.h^{-1})^{-1}$	0,949	0,1933	6,26
K	$\ln y = 6,840986 - 80,715992.d^{-1}$	0,912	0,2517	5,85
Ca	$\ln y = 5,526485 - 64,951934.(d^2.h^{-1})^{-1}$	0,821	0,3805	9,18
Mg	$\ln y = 6,108476 - 4,671358.(d^{-1}.h)$	0,911	0,2412	7,59
S	$\ln y = 4,029473 - 64,818635.(d^2.h^{-1})^{-1}$	0,905	0,2646	9,98
B	$\ln y = 9,287462 - 5,246313.(d^{-1}.h)$	0,926	0,2460	4,10
Cu	$\ln y = 5,978657 - 65,678022.(d^2.h^{-1})^{-1}$	0,953	0,1835	4,00
Fe	$\ln y = 9,794173 - 70,615583.(d^2.h^{-1})^{-1}$	0,919	0,2635	3,18
Mn	$\ln y = 9,733840 - 69,929469.(d^2.h^{-1})^{-1}$	0,886	0,3146	3,81
Zn	$\ln y = 9,163229 - 4,966333.(d^{-1}.h)$	0,911	0,2565	4,24
Galho vivo				
N	$\ln y = 2,969959 + 3,487457.\ln(d.h^{-1})$	0,918	0,2712	5,76
P	$\ln y = 0,523876 - 3,600140.\ln(d^{-1}.h)$	0,904	0,3042	13,10
K	$\ln y = -3,035712 - 1,675044.\ln(d^2.h^{-1})^{-1}$	0,919	0,2787	7,59
Ca	$\ln y = 2,199823 - 3,558118.\ln(d^{-1}.h)$	0,927	0,2586	6,51
Mg	$\ln y = 1,371606 + 3,450984.\ln(d.h^{-1})$	0,912	0,2779	8,98
S	$\ln y = 0,646736 + 3,504029.\ln(d.h^{-1})$	0,919	0,2694	11,25
B	$\ln y = 4,242685 + 3,416637.\ln(d.h^{-1})$	0,925	0,2532	4,26
Cu	$\ln y = -1,254215 - 1,677322.\ln(d^2.h^{-1})^{-1}$	0,930	0,2556	4,68
Fe	$\ln y = 6,710163 - 3,428881.\ln(d^{-1}.h)$	0,925	0,2527	3,00
Mn	$\ln y = 11,528345 - 6,077205.(d^{-1}.h)$	0,937	0,2609	3,38
Zn	$\ln y = 10,059432 - 6,198302.(d^{-1}.h)$	0,911	0,3203	5,19
Galho seco				
N	$\ln y = 3,941761 - 19593,435463.(d^2.h)^{-1}$	0,766	0,4364	15,30
P	$y = -4,125174 + 1,395611.\ln(d^2.h^{-1})$	0,608	0,6209	42,46
K	$\ln y = 3,437673 - 1526,656564.(d.h)^{-1}$	0,858	0,3766	36,96
Ca	$\ln y = 3,900901 - 336307,566848.1/(d.h)^2$	0,795	0,3915	13,32
Mg	$\ln y = 2,539702 - 21028,139926.(d^2.h)^{-1}$	0,807	0,4159	30,34
S	$y = -4,015760 + 4,225160.(d.h^{-1})$	0,744	1,0494	33,17
B	$\ln y = 5,481714 - 335419,121939.1/(d.h)^2$	0,721	0,4767	10,54
Cu	$\ln y = 4,970964 - 336629,645604.1/(d.h)^2$	0,767	0,4379	11,00
Fe	$\ln y = 8,252228 - 327849,447982.1/(d.h)^2$	0,705	0,4837	6,61
Mn	$\ln y = 8,055973 - 387629,369197.1/(d.h^3)$	0,740	0,4873	7,52
Zn	$\ln y = 4,985992 - 20644,100406.1/(d^2.h)$	0,718	0,5203	13,55

APÊNDICE B – Equações de regressão e estatísticas de ajuste das equações utilizadas para estimar o conteúdo de nutrientes nos diferentes compartimentos da biomassa de *Pinus taeda*, com 17 anos de idade.

Equação		$R^2_{ajust.}$	Syx	Syx(%)
Casca				
N	$\ln y = 6,036884 - 46,608922.d^{-1} - 0,005399.(d^{-1}.di^3) + 0,000118.di^3$	0,960	0,1331	3,00
P	$\ln y = 2,964154 - 696,589582.(d^2)^{-1} - 0,005838.(d^{-1}.di^3) + 0,000124.di^3$	0,919	0,2066	10,14
K	$\ln y = 4,862094 - 859,103811.(d.h^{-1}) - 0,006323.(d^{-1}.di^3) + 0,000132.di^3$	0,941	0,1845	5,58
Ca	$\ln y = 4,545049 - 631,103028.(d.h^{-1}) - 0,004332.(d^{-1}.di^3) + 0,000099.di^3$	0,872	0,2007	5,83
Mg	$\ln y = 4,151065 - 43,930759.d^{-1} - 0,005685.(d^{-1}.di^3) + 0,000124.di^3$	0,904	0,2077	7,95
S	$\ln y = -6,440608 + 0,457289.\ln(d.h)^3 - 0,005353.(d^{-1}.di^3) + 0,000121.di^3$	0,952	0,1483	6,30
B	$\ln y = 7,174978 - 44,474953.d^{-1} - 0,005238.(d^{-1}.di^3) + 0,000118.di^3$	0,902	0,2046	3,63
Cu	$\ln y = 6,261278 - 41,482987.d^{-1} - 0,004860.(d^{-1}.di^3) + 0,000111.di^3$	0,940	0,1460	3,02
Fe	$\ln y = 10,164143 - 46,817078.d^{-1} - 0,005229.(d^{-1}.di^3) + 0,000120.di^3$	0,948	0,1158	2,35
Mn	$\ln y = 8,157008 - 36,970620.d^{-1} - 0,005635.(d^{-1}.di^3) + 0,000125.di^3$	0,914	0,1746	2,55
Zn	$\ln y = 7,767425 - 57,470171.d^{-1} - 0,007070.(d^{-1}.di^3) + 0,000151.di^3$	0,947	0,1942	3,37
Madeira				
N	$\ln y = 7,673490 - 60,875242.d^{-1} - 0,006081.(d^{-1}.di^3) + 0,000145.di^3$	0,958	0,1683	2,99
P	$\ln y = 5,506183 - 4,113180.(d^{-1}.h) - 0,006149.(d^{-1}.di^3) + 0,000143.di^3$	0,953	0,1926	6,92
K	$\ln y = 5,902243 - 890,949084.(d^2)^{-1} - 0,005983.(d^{-1}.di^3) + 0,000142.di^3$	0,946	0,1961	4,08
Ca	$\ln y = 5,969841 - 741,016933.(d^2)^{-1} - 0,005251.(d^{-1}.di^3) + 0,000126.di^3$	0,948	0,1621	3,21
Mg	$\ln y = 5,920072 - 54,225238.d^{-1} - 0,005258.(d^{-1}.di^3) + 0,000125.di^3$	0,952	0,1602	3,91
S	$\ln y = 6,012201 - 50,457225.d^{-1} - 0,005918.(d^{-1}.di^3) + 0,000142.di^3$	0,924	0,1997	4,64
B	$\ln y = 8,864216 - 59,033659.d^{-1} - 0,005821.(d^{-1}.di^3) + 0,000138.di^3$	0,961	0,1571	2,28
Cu	$\ln y = 6,932901 - 990,527974.(d^2)^{-1} - 0,005909.(d^{-1}.di^3) + 0,000138.di^3$	0,971	0,1544	2,70
Fe	$\ln y = 9,902424 - 58,966554.d^{-1} - 0,005227.(d^{-1}.di^3) + 0,000124.di^3$	0,930	0,2063	2,60
Mn	$\ln y = 9,948021 - 833,142272.(d^2)^{-1} - 0,005169.(d^{-1}.di^3) + 0,000123.di^3$	0,932	0,2027	2,27
Zn	$\ln y = 8,850292 - 67,680591.d^{-1} - 0,005777.(d^{-1}.di^3) + 0,000135.di^3$	0,936	0,2250	3,42
Raiz				
N	$\ln y = 7,214926 - 70,945882.d^{-1}$	0,945	0,1718	3,51
P	$\ln y = 4,322887 - 71,973409.d^{-1}$	0,956	0,1547	7,84
K	$\ln y = 6,478077 - 4,490409.(d^{-1}.h)$	0,885	0,2624	7,36
Ca	$\ln y = -7,718346 - 1,197253.\ln(d^2.h)^{-1}$	0,978	0,1162	2,78
Mg	$\ln y = -0,960584 + 1,074202.\ln(d^2.h^{-1})$	0,901	0,1936	5,95
S	$\ln y = 5,665682 - 71,703531.d^{-1}$	0,965	0,1369	4,12
B	$\ln y = -2,157818 + 2,424889.\ln d$	0,964	0,1404	2,25
Cu	$\ln y = -0,620464 + 1,368484.\ln(d^2.h^{-1})$	0,932	0,2017	4,24
Fe	$\ln y = 1,240545 + 0,888105.\ln(d^3.h^{-1})$	0,919	0,2228	2,86
Mn	$\ln y = -3,675793 + 0,783701.\ln(d^3.h)$	0,916	0,2243	3,29
Zn	$\ln y = 7,893214 - 4,438913.(d^{-1}.h)$	0,917	0,2170	4,33

$\ln$ = logaritmo natural; y = massa do respectivo nutriente, em grama para N, P, K, Ca, Mg e S, e em miligrama para B, Cu, Fe, Mn e Zn; d = dap (diâmetro à altura do peito); h = altura total; d_i = diâmetro mínimo de colheita com casca; $R^2_{ajust.}$ = coeficiente de determinação ajustado; Syx = erro-padrão da estimativa absoluto; Syx (%) = erro-padrão da estimativa relativo.

APÊNDICE C – Equações de regressão e estatísticas de ajuste das equações utilizadas para estimar a altura relativa ao longo do tronco do teor de macro e micronutrientes na casca e na madeira de *Pinus taeda*, aos 17 anos de idade.

Equação		$R^2_{\text{ajust.}}$	Syx	Syx(%)
Casca				
N	$\ln y = 4,853061 - 13,412745.(1/ti^2)$	0,738	0,4017	10,9
P	$y = 96,515669 + 48,076815.(Inti)$	0,800	12,7809	25,5
K	$y = 140,532290 - 103,291599.(\sqrt{1/ti})$	0,883	9,6279	19,1
Ca	$\ln y = 4,282348 - 1,127933.(\sqrt{ti^3})$	0,437	1,3159	49,1
Mg	$y = -1,674285 + 73,473475.ti$	0,695	15,5587	31,7
S	$\ln y = 5,153447 - 0,267776.(1/ti^2)$	0,572	0,5257	14,4
B	$y = -92,598849 + 41,672766.(\sqrt{ti})$	0,472	20,6600	41,3
Cu	$\ln y = 13,259521 - 22,572678.(\sqrt{1/ti})$	0,258	1,6488	55,2
Fe	$\ln y = 5,448039 - 79011,812601.(1/ti^2)$	0,470	1,2699	40,8
Mn	$\ln y = 6,870211 - 20,431144.(\sqrt{1/ti})$	0,540	0,5322	14,5
Zn	$\ln y = 5,702993 - 7,638353.(\sqrt{1/ti})$	0,722	0,4109	11,1
Madeira				
N	$\ln y = 5,930202 - 3,081536.(1/ti)$	0,463	0,5715	15,4
P	$\ln y = 6,713664 + 0,310261.(Inti^4)$	0,458	0,5805	15,7
K	$\ln y = 7,664242 - 3,106973.(\sqrt{1/ti})$	0,383	0,6149	16,8
Ca	$\ln y = 7,426288 - 5,469813.(\sqrt{ti})$	0,044	1,7827	60,6
Mg	$\ln y = 9,584401 - 3,539810.(\sqrt{1/ti})$	0,123	1,7292	59,9
S	$\ln y = -0,326077 + 42,813097ti^4 - 0,980065.(Inti^3)$	0,171	0,7360	20,0
B	$\ln y = 3,011030 - 107,501661.(1/ti^4)$	0,128	1,7905	65,4
Cu	$y = -60,940150 + 79,687470.(\sqrt{ti})$	0,388	24,9689	49,9
Fe	$y = 46,191008 + 0,002853.(ti^3)$	0,104	27,3531	54,7
Mn	$y = 12,39$	—	—	—
Zn	$\ln y = 2,407932 + 0,907917.(Inti)$	0,260	0,6873	18,6

$\ln$ = logaritmo natural; y = altura relativa ao longo do tronco onde se encontra ti ; ti = teor de nutriente em $g\ kg^{-1}$ para N, P, K, Ca, Mg e S, e em $mg\ kg^{-1}$ para B, Cu, Fe, Mn e Zn; d = dap (diâmetro à altura do peito); h = altura total; $R^2_{\text{ajust.}}$ = coeficiente de determinação ajustado; Syx = erro-padrão da estimativa absoluto; Syx (%) = erro-padrão da estimativa relativo.