

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

**Sustentabilidade da produtividade de madeira de *Pinus taeda* com
base no estoque, na exportação e na ciclagem de nutrientes**

Ricardo Michael de Melo Sixel

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

**Piracicaba
2012**

Ricardo Michael de Melo Sixel
Engenheiro Florestal

**Sustentabilidade da produtividade de madeira de *Pinus taeda* com base no
estoque, na exportação e na ciclagem de nutrientes**
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

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

**Piracicaba
2012**

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

Sixel, Ricardo Michael de Melo

Sustentabilidade da produtividade de madeira de *Pinus taeda* com base no estoque, na exportação e na ciclagem de nutrientes / Ricardo Michael de Melo Sixel.- - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2012.
109 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2012.

1. Balanço de nutrientes 2. Biomassa 3. Madeira - Produtividade 4. Manejo florestal
5. Mineralogia 6. Nutrição vegetal 7. Pinheiro 8. Sustentabilidade I. Título

CDD 634.9751
S625s

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

À minha mãe Conceição, ao meu pai Thomas (*in memoriam*),
à minha irmã Katharina e à Jennifer, pelo amor, apoio,
incentivos e confiança em todos os momentos de minha vida.

DEDICO

"Nós não herdamos a terra de nossos pais.

Nós a emprestamos de nossos filhos."

Provérbio indígena

AGRADECIMENTOS

À ESALQ-USP, em especial ao Departamento de Ciências Florestais, pelo inesquecível, prestimoso e inigualável ambiente acadêmico e profissional.

Ao CNPQ pela concessão do auxílio de pesquisa.

Ao Professor Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves pelos incentivos, amizade, orientação e oportunidades de desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao Professor Dr. Antônio Carlos de Azevedo pelo apoio, amizade e contribuições para análise mineralógica e as longas conversas sobre filosofia da ciência.

Ao Engenheiro Florestal Dr. José Carlos Arthur Jr. (Coordenador do PTSM/IPEF) pela amizade e contribuições inestimáveis para realização deste trabalho.

Ao Engenheiro Florestal e doutorando Gabriel Ramatis Plugliese Andrade pela amizade e contribuições para análise dos difratogramas.

À Engenheira Florestal Flávia Mariani Gomez Barsotti pela amizade e pela ajuda na coleta e no processamento dos dados de campo.

À empresa Klabin pela oportunidade de desenvolvimento do projeto e pelo auxílio financeiro.

Ao Engenheiro Florestal Antônio Maurício Moreira, ao Engenheiro Florestal M.sc James Stahl, ao Técnico Leonardo Pires e a toda equipe de campo pelo apoio para realização deste trabalho.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho!!!

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Base florestal de <i>Pinus taeda</i>	21
2.2 Acúmulo de biomassa e Estoque de nutrientes em povoamentos florestais.....	21
2.3 A Ciclagem de nutrientes e a sustentabilidade da produtividade florestal	26
2.4 Nutrientes do solo	35
3 MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1 Localização e caracterização da área de estudo	39
3.2 Métodos silviculturais	42
3.3 Amostragem da biomassa florestal	42
3.4 Determinação do estoque de nutrientes no sítio florestal.....	47
3.5 Ciclagem de nutrientes.....	48
3.6 Análise mineralógica do solo.....	51
3.7 Balanço nutricional do sítio florestal	53
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4.1 Inventário florestal	55
4.2 Estoque de nutrientes.....	64
4.3 Ciclagem de nutrientes.....	69
4.4 Mineralogia do solo e liberação de nutrientes	73
4.5 Concentração e estoque de nutrientes no solo	82
4.6 Balanço nutricional do sítio florestal	85
5 CONCLUSÕES	93
REFERÊNCIAS	95

RESUMO

Sustentabilidade da produtividade de madeira de *Pinus taeda* com base no estoque, na exportação e na ciclagem de nutrientes

Os impactos do manejo intensivo sobre a sustentabilidade da produção florestal dependem da manutenção da fertilidade dos solos. A contribuição dos resíduos florestais e a ciclagem de nutrientes nesse processo são determinantes. Os objetivos desse trabalho foram: (i) quantificar a biomassa e o estoque de nutrientes na parte aérea e no sistema radicular de um povoamento de *Pinus taeda* aos 16 anos de idade; (ii) caracterizar o potencial de liberação de nutrientes dos minerais primários e secundários, e o estoque de nutrientes de um Cambissolo Húmico; (iii) quantificar a exportação de nutrientes via colheita de madeira e dos componentes florestais; (iv) avaliar potencial da sustentabilidade da produtividade de madeira com base no balanço de nutrientes, sob diferentes cenários de manejo florestal. Avaliou-se uma plantação de *Pinus taeda* na idade de 16 anos em um Cambissolo Húmico Alumínico léptico de textura argilosa, relevo ondulado no meio-sul catarinense. Amostraram-se dez árvores de cinco classes diamétricas em função da distribuição dos diâmetros à altura do peito. Para cada árvore mensurou-se a biomassa de acículas, galhos, casca, madeira e raízes. Além da biomassa vegetal, amostrou-se serapilheira acumulada e solo nas camadas 0-20, 20-40, 40-60, 60-100, 100-140, 140-180 e 180-190 cm. Equações entre a área seccional a 1,30 m e a biomassa de cada componente foram ajustadas para estimar a biomassa das árvores inventariadas. Equações entre o conteúdo de nutriente e a biomassa do componente também foram ajustadas para estimar a quantidade de cada nutriente em todos os componentes da árvore. As equações permitiram estimar para as demais árvores do talhão a biomassa de cada componente e o seu respectivo estoque de nutrientes. Nas amostras de solo e de serapilheira se determinou a concentração e o estoque de nutrientes, além de no solo realizar-se a caracterização mineralógica. Simularam-se três cenários de manejo florestal, retirada da madeira (A), da madeira + casca (B) e da madeira + casca + copa (C) do sistema florestal. A soma de todos os componentes da biomassa foi de 313 Mg ha⁻¹, sendo a madeira o mais representativo (62%). O estoque dos nutrientes na árvore foi N > Ca > K > S > Mg > P. A madeira foi o componente que acumulou as maiores quantidades de nutrientes (210 N, 33 P, 85 K, 91 Ca, 31 Mg e 65 S, kg ha⁻¹). A mineralogia do Cambissolo demonstrou predominância do quartzo nas frações areia, silte e argila, com pequenos traços de vermiculita na fração de silte. A argila é a principal fração que contribui com o intemperismo do solo, devido à transformação da vermiculita-ilita, liberando K. Para os três cenários de manejo, o esgotamento de nutrientes do sistema solo-biomassa foi: P > S > N > K > Mg > Ca. O P e o S permaneceram como mais limitantes no cenário A decorrente de seus baixos estoques disponíveis no solo. No cenário B, o número de rotações florestais se alterou para N, K e S. O cenário C resultou na maior diminuição de produtividade, possibilitando para o P duas rotações e para o Mg 14. Desta forma, evidenciou-se, pelo número potencial de rotações de cultivo, que os diferentes cenários de manejo podem em curto prazo comprometer a sustentabilidade do *P. taeda*.

Palavras-chave: Balanço de nutrientes; Manejo florestal; Mineralogia; *Pinus taeda*; Plantação; Nutrição

ABSTRACT

Sustainability of wood productivity of *Pinus taeda* based on inventory, export and nutrient cycling

The impacts of intensive management on the sustainability of forest production depends on the maintenance of soil fertility. The contribution of forest residues and nutrient cycling in this process are crucial. The objectives of this study were: (i) quantify the biomass and nutrient stocks in the shoot above and belowground and root system of a stand of 16-years-old *Pinus taeda*, (ii) characterize the potential release of nutrients from primary and secondary minerals, and the stock of nutrients in a Humic Cambisol (iii) quantify the export of nutrients through wood harvesting and forest components, (iv) evaluate the potential of sustainability in wood based on the balance of nutrients under different forest management scenarios. We evaluated a 16-years-old plantation of *Pinus taeda* in a Humic Cambisol, undulating relief in the middle-south of Santa Catarina. Ten trees were sampled from five diameter classes according to the distribution of diameter at breast height. Biomass of the needles, twigs, bark, wood and roots were measured for each tree. Besides the biomass and litter soil samples were collected from the layers 0-20, 20-40, 40-60, 60-100, 100-140, 140-180 and 180-190 cm. Equations which has the sectional area of 1.30 m as independent variable and the biomass of each component as the dependent variable were adjusted to estimate the biomass of the entire studied forest. Furthermore, equations which has the nutrient content of the component as the dependent variable and the biomass as independent variable were adjusted to estimate the amount of each nutrient in all parts of the tree. The concentration and stock of nutrient were determined from the soil sample collected. In addition, a mineralogical characterization was performed for the soil and litters. Three scenarios simulated forest management, removal of wood (A), the wood and bark (B) and wood + bark + cup (C) of the forest system. The sum of all components of biomass was 313 mg h⁻¹ being the most representative of the wood (62%). The stock of nutrients in the tree was N > Ca > K > S > Mg > P. The wood was the largest exporter of nutrients (210 N, 33 P, 85 K, 91 Ca, 31 Mg and 65 S, kg ha⁻¹). The mineralogy of the Cambisol showed the predominance of quartz sand, silt and clay, with small traces of vermiculite in the silt fraction. Clay is the main fraction which contributes to the weathering of the soil due to the transformation of illite-vermiculite, releasing K. The depletion of nutrients from the soil-biomass was: P > S > N > K > Mg > Ca and S. The P and S remained as the most limiting at the scenario A due to its low inventories in the soil. At the scenario B, the number of rotations forest changed to N, K, S. The scenario C resulted in the greatest reduction in productivity, allowing for P two rotation and for Mg 14. It was evident by the number of potential crop rotations, the different management scenarios in the short term may jeopardize the sustainability of *P. taeda*.

Keywords: Balance of nutrients; Forest management; Mineralogy; *Pinus taeda*; Plantation; Nutrition

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de uso do solo da secretaria de desenvolvimento regional do município de Lages – SC. Fonte: www.iff.sc.gov.br	40
Figura 2 - Balanço hídrico climatológico da região de Otacílio Costa – SC	40
Figura 3 - Diferentes estratos de decomposição das camadas de serapilheira: não decomposta (a), pouco decomposta (b) e muito decomposta (c). Aspecto dos três estratos (d)	43
Figura 4 - Separação de acículas, galhos mortos e galhos vivos (a) e posterior pesagem (b)	44
Figura 5 - Metodologia para medição e corte dos discos de madeira	45
Figura 6 - Início da escavação manual da trincheira (a) e posterior retirada da raiz primária mais grossa com auxílio da retroescavadeira (b)	46
Figura 7 - Classificação das raízes em diâmetros menor (a) e maior que 3 mm (b) .	46
Figura 8 - Detalhe do coletor instalado (a) e disposição dos mesmos dentro da parcela (b)	49
Figura 9 - Distribuição diamétrica do povoamento de <i>Pinus taeda</i> com 16 anos de idade	56
Figura 10 - Distribuição relativa da biomassa nos diferentes componentes das árvores de <i>Pinus taeda</i> aos 16 anos de idade	59
Figura 11 - Correlação entre massa seca de acícula (a) e de madeira (b) com a massa seca da raiz total.....	59
Figura 12 - Volume acumulado (%) do povoamento de <i>P. taeda</i> aos 16 anos. A linha pontilhada representa o povoamento com todas as árvores iguais.....	60
Figura 13 - Correlação entre altura total (a) e massa seca madeira (b) com o comprimento da raiz primária mais grossa	61
Figura 14 - Distribuição relativa dos nutrientes estocados nos componentes florestais e da serapilheira em plantação de <i>P. taeda</i> aos 16 anos de idade	68
Figura 15 - Deposição mensal de serapilheira em povoamento de <i>P. taeda</i> aos 16 anos de idade.....	69
Figura 16 - Difratoograma de raios-x da fração areia do Cambissolo Húmico aluminico léptico.....	73
Figura 17 - Difratoograma de raios-x da fração silte do Cambissolo Húmico aluminico léptico.....	74

Figura 18 - Sequência de difratogramas de amostras orientadas da fração argila da camada 0-20 cm. Difratogramas das amostras saturadas com K (tratamentos térmicos a 25°C, 300°C e 500°C), amostra saturada com Mg e solvatada com etilenoglicol (EG) 75

Figura 19 - Sequência de difratogramas de amostras orientadas da fração argila da camada 140-180 cm. Difratogramas das amostras saturadas com K (tratamentos térmicos a 25°C, 300°C e 500°C), amostra saturada com Mg e solvatada com etilenoglicol (EG) 76

Figura 20 - Sequência de difratogramas de amostras orientadas da fração argila da camada 180-190 cm. Difratogramas das amostras saturadas com K (tratamentos térmicos a 25°C, 300°C e 500°C), amostra saturada com Mg e solvatada com etilenoglicol (EG) 77

Figura 21 - Sequência de difratogramas das amostras orientadas de argila saturadas com Mg, demonstrando os deslocamentos dos picos de vermiculita, illita e caulinita ao longo das diferentes camadas do perfil do solo 78

Figura 22 - Razão Zr:Ti para o perfil de um Cambissolo Húmico alumínico léptico. 80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Estoque de nutrientes e biomassa seca acumulada de serapilheira para diferentes idades de <i>Pinus taeda</i>	24
Tabela 2 - Entrada de nutrientes via precipitação externa (PE), via precipitação interna (PI) e via escoamento do tronco (TR) para diferentes povoamentos de <i>Pinus</i> spp	29
Tabela 3 - Taxa de formação de diferentes solos	37
Tabela 4 - Atributos físicos do solo e concentração de óxidos nas camadas de solo	42
Tabela 5 - Dados dendrométricos das árvores selecionadas no experimento	55
Tabela 6 - Equações para a estimativa da biomassa dos componentes florestais e do volume de madeira (com e sem casca) em povoamento de <i>Pinus taeda</i> aos 16 anos de idade	57
Tabela 7 - Biomassa dos componentes florestais avaliados nas 10 árvores amostradas.....	58
Tabela 8 - Produção e partição de biomassa seca estimada dos diferentes componentes e da serapilheira da plantação de <i>Pinus taeda</i> com 16 anos de idade	62
Tabela 9 - Concentração média e desvio padrão de macronutrientes contidos nos diferentes componentes de <i>Pinus taeda</i> aos 16 anos de idade	65
Tabela 10 - Estoque médio e desvio padrão de macronutrientes contidos nos diferentes componentes da biomassa e na serapilheira de <i>Pinus taeda</i> aos 16 anos de idade	67
Tabela 11- Concentração média de macronutrientes na serapilheira depositada em povoamento de <i>P. taeda</i> aos 16 anos de idade	71
Tabela 12- Aporte de macronutrientes via deposição de serapilheira de <i>Pinus taeda</i> aos 16 anos de idade	71
Tabela 13 - Quantidades de nutrientes absorvidas, acumuladas e depositadas via serapilheira, e contribuição relativa das ciclagens biogeoquímica e bioquímica em relação as quantidades de nutrientes absorvidas pelas árvores no povoamento de <i>P. taeda</i> aos 16 anos de idade.....	72
Tabela 14 - Fórmula química e composição de minerais primários e secundários ..	81
Tabela 15 - Concentração dos óxidos nas camadas de solo amostradas obtidas por FRX.....	81

Tabela 16 - Atributos químicos do Cambissolo húmico alumínico léptico no povoamento de *Pinus taeda* aos 16 anos de idade 83

Tabela 17 - Estoque de macronutrientes disponíveis em diferentes camadas do solo, no povoamento de *Pinus taeda* aos 16 anos de idade⁽¹⁾ 84

Tabela 18- Balanço nutricional e estimativa do número potencial de rotações de 16 anos sob três cenários de manejo para plantação comercial de *Pinus taeda* estabelecida em um Cambiossolo Húmico, considerando um IMA de 37 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ de madeira com casca e biomassa total de 341 Mg ha⁻¹ 85

Tabela 19 - Número potencial de rotações de cultivo com base em cenário de manejo silvicultural 86

Tabela 20 - Estoque de nutrientes no solo e na serapilheira e relação entre o estoque de nutrientes nestes componentes para povoamento de *P. taeda* aos 16 anos de idade 90

1 INTRODUÇÃO

A capacidade de prever, no longo prazo, a produtividade florestal constitui parte do desafio da gestão florestal (ADAMS et al., 2000). Nesse contexto, entender e situar os processos atuantes na produção dos recursos florestais permite que se estabeleçam critérios de manejo mais adequados a sítios específicos, determinando o maior, ou o menor, nível de segurança do sistema de manejo. Todo o esforço de trabalho deve passar pelo conhecimento das características e das condições do “sistema florestal” inserido em determinado sítio.

A silvicultura de *Pinus* spp contribui ambiental, social e economicamente para o desenvolvimento da região Sul do Brasil (VASQUES et al., 2007). O *Pinus taeda* é a principal espécie plantada na região, prova de sua adaptabilidade às condições edafoclimáticas similares às de sua região de ocorrência natural no sudeste dos Estados Unidos da América. A espécie destaca-se como principal fonte de matéria-prima para a produção de serrados, de chapas e processados e, de celulose e papel (ABRAF, 2011).

Desde o início das primeiras plantações comerciais de *P. taeda* no sul do Brasil, o manejo e a acuidade quanto à sustentabilidade dos povoamentos sofreram profundas transformações. Parte dessa mudança deveu-se à importância do estoque de nutrientes e, conseqüentemente, de sua ciclagem na floresta para a manutenção de boas produtividades (POGGIANI; STAPE; GONÇALVES, 1998). Nos primeiros projetos implantados, o manejo com fogo propiciava rápida mineralização dos nutrientes contidos nos compartimentos florestais, mas, por outro lado, resultava em grande e rápida perda de nutrientes por volatilização, erosão e lixiviação (ZEN; YONEZAWA; FELDEBERG, 1995).

Dúvidas sobre a sustentabilidade da produção das plantações florestais, notadamente nas plantações em áreas com solos pouco férteis, bem como às demandas crescentes por aumento de produtividade, levaram ao advento do sistema de cultivo mínimo, a partir da década de 1980 (GONÇALVES, 1995). O preparo do solo localizado e a manutenção dos resíduos da colheita permitiram obter-se um novo padrão de produção florestal, atenta às demandas da produção e à sua sustentabilidade. Esses efeitos puderam ser notados tanto na minimização das perdas de solo, da erosão, da lixiviação e dos efeitos do intemperismo, quanto no aumento de entradas de nutrientes, tornando o sistema produtivo mais estável

(GONÇALVES et al., 1997). Segundo Poggiani (1980), a sustentabilidade da produção florestal e a qualidade do ambiente relacionam-se diretamente à manutenção dos resíduos da colheita dentro do talhão.

Embora considerada uma espécie de baixa demanda nutricional (RIGATTO; DEDECEK; MATTOS, 2005), o *P. taeda* tem sua produtividade dependente, entre outros fatores, do conteúdo e da ciclagem de nutrientes armazenados no solo florestal, fornecidos principalmente pelos resíduos florestais (SCHUMACHER; POGGIANI, 1993). Ademais, o aproveitamento dos resíduos florestais para uso energético, embora possa ser importante no aspecto econômico/energético, pode causar significativo impacto na capacidade produtiva dos solos, provocando a necessidade de reposição nutricional no menor tempo.

O entendimento da ciclagem de nutrientes nos ecossistemas florestais configura-se como pré-requisito essencial para a compreensão e a predição dos efeitos da nutrição no crescimento da floresta (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2000). Do mesmo modo, o conhecimento da distribuição da biomassa e do conteúdo dos nutrientes nos diferentes compartimentos e fases de desenvolvimento dos povoamentos florestais é indispensável para definir o manejo mais adequado.

Nesse contexto, testaram-se as seguintes hipóteses:

- I. Os resíduos florestais são essenciais para manutenção da sustentabilidade da produtividade de madeira;
- II. A entrada de nutrientes via precipitação pluviométrica pode compensar a retirada de nutrientes via exportação de madeira;
- III. O balanço de entrada e saída de nutrientes é um indicador para avaliar a sustentabilidade da produtividade de madeira.

Assim, foram os objetivos deste trabalho:

- I. Quantificar a biomassa e o estoque de nutrientes na parte aérea e no sistema radicular de um povoamento de *Pinus taeda* aos 16 anos de idade;
- II. Caracterizar o potencial de liberação de nutrientes dos minerais primários e secundários, e o estoque de nutrientes de um Cambissolo Húmico;
- III. Quantificar a exportação de nutrientes via colheita de madeira e dos componentes florestais;
- IV. Avaliar potencial da sustentabilidade da produtividade de madeira com base no balanço de nutrientes, sob diferentes cenários de manejo florestal;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Base florestal de *Pinus taeda*

O *Pinus taeda* L. é uma espécie da família Pinaceae natural das regiões Sul e Sudeste dos Estados Unidos da América, onde é dominante em cerca de 11,7 milhões de hectares. Nessas regiões, a precipitação pluviométrica média anual varia entre 900 e 2.200 mm, com boa distribuição durante o ano e até dois meses de seca. A temperatura média anual varia de 13°C a 19°C, com temperaturas mínimas de 4°C (GILMAN; WATSON, 1994).

Os primeiros exemplares de *P. taeda* foram introduzidos no Brasil em 1936 por conta dos trabalhos de importação de sementes do Instituto Florestal de São Paulo. Devido à madeira de alta qualidade para múltiplos usos, como construção civil, fabricação de móveis, chapas e celulose, o *P. taeda* substituiu a madeira de *Araucaria angustifolia*. A silvicultura em larga escala do *P. taeda* teve início na década de 1960, em decorrência dos incentivos fiscais. Pelas características climáticas semelhantes às de origem, os estados da região Sul concentraram a maior parte das plantações (KRONKA; BERTONI; PONCE, 2005).

O estado do Paraná possui a área de 605.130 hectares, representando 33% do total. O estado de Santa Catarina, com a segunda maior área, possui aproximadamente 530 mil hectares (ABRAF, 2011). Neste estado, as plantações concentram-se na região meio-oeste, localizados principalmente sobre Cambissolos (EMBRAPA, 2009). A espécie destaca-se como principal fonte de matéria-prima para a produção de serrados, de chapas e processados e, de celulose e papel.

2.2 Acúmulo de biomassa e Estoque de nutrientes em povoamentos florestais

Avaliar o acúmulo de biomassa é importante para prever a capacidade produtiva de um determinado sítio. O estudo da biomassa florestal (folhas, galhos, casca, madeira e raiz) permite fazer inferências sobre a produtividade do sistema florestal, os fluxos de energia, os balanços nutricionais e o ciclo do carbono (SOARES; LEITE; GÖRGENS, 2005).

Diversos fatores ambientais e da própria planta influenciam o acúmulo de biomassa. Fatores ambientais como a luz, a temperatura, a concentração de CO₂ do ar, a umidade, a fertilidade do solo e a incidência de doenças, bem como fatores

da planta como a idade, a estrutura e a disposição das acículas, a distribuição e o comportamento dos estômatos, a concentração de clorofila e a acumulação de hidratos, são preponderantes (TAIZ; ZEIGER, 2009). A distribuição da biomassa entre os componentes muda com a idade.

De acordo com Gonçalves et al. (2000), há dois padrões de alocação dos fotoassimilados. Até o fechamento da copa, as árvores alocam recursos para garantir sua plena adaptação no meio físico, priorizando a destinação dos fotoassimilados para a expansão da área foliar e o desenvolvimento do sistema radicular (principalmente o das raízes finas). Posteriormente, intensificam-se a alocação de recursos para a madeira, resultando no maior incremento desse componente. Dessa forma, à medida que a árvore cresce, ocorre uma redução gradual da biomassa da copa, simultânea a um aumento na proporção da biomassa da madeira e da casca (SCHUMACHER; HOPPE, 1997). Para plantações de *Pinus taeda* com 26 anos de idade, Oki (2002) observou que o acúmulo da madeira na biomassa aérea foi de 75%, nos galhos, 16%, nas acículas, 6,0%, e na casca, 3,0%. Valeri, Soares e Monteiro (1989), estudando o acúmulo de biomassa de *P. taeda* em desbastes aos 7, 10 e 14 anos, observaram o aumento da biomassa da madeira de 56,6% para 73,4%, entre o 7º e o 14º ano. Por outro lado, verificaram a redução na alocação de biomassa para a acícula, os galhos e a casca, de 13,0% para 5,1%, de 23,0% para 15,3% e de 7,4% para 6,2%, respectivamente.

O manejo florestal interfere no acúmulo de biomassa florestal, podendo aumentá-la significativamente. As práticas silviculturas, como a fertilização, o espaçamento, a desrama, o desbaste, o controle de pragas e de doenças, podem influenciar a taxa de crescimento das árvores, a qualidade da madeira e a idade de corte (FOX, 2000).

O acúmulo de biomassa está ligado ao espaçamento de plantio. Menores espaçamentos possuem maior quantidade de árvores e promovem maior acúmulo de biomassa por unidade de área (LADEIRA et al., 2001). Entretanto, a maior densidade de árvores altera o padrão de distribuição de biomassa dos componentes arbóreos (folha, casca, galhos e madeira), promovendo maior destinação dos fotoassimilados para a madeira (GONÇALVES et al., 2000). Em espaçamentos maiores, o acúmulo de biomassa total por área diminui, ao passo que se observa maior acúmulo de biomassa individual. Esse comportamento foi

observado por Baldwin Jr. et al. (2000), ao estudarem a distribuição de biomassa em diferentes espaçamentos em *P. taeda*. Povoamentos mais espaçados apresentaram mudanças no padrão de distribuição de biomassa, acumulando-se mais biomassa nos galhos e nas folhas.

A fertilização é de extrema importância para a melhoria da qualidade do sítio e da taxa de crescimento e, conseqüentemente, da produção de biomassa, notadamente em solos intemperizados (NAMBIAR, 1999; VALE et al., 2000). Entretanto essa não é uma prática silvicultural utilizada nas plantações florestais de *P. taeda*, no Brasil, pela inexistência de sintomas de deficiência nutricional (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2000), pela obtenção de produtividades semelhantes, ou superiores, na rotação seguinte (BIZON, 2005) e pela baixa exigência nutricional (RIGATTO; DEDECEK; MATTOS, 2005). Todavia a importância de cada nutriente e o seu nível de impacto variam de acordo com as características edáficas da produtividade florestal e dos manejos aplicados (BIZON, 2005).

Em sítios com solos de baixa fertilidade, Fernández et al. (2000) observaram diferenças no desenvolvimento de *P. taeda* aos 34 meses de idade, com relação às doses de nitrogênio e fósforo. Por sua vez, Vogel et al. (2005), estudando os efeitos de doses crescentes de N, P e K em Cambissolo Húmico alumínico típico, observaram efeito para o P e o K. Segundo os autores, a falta de resposta ao N está ligada à sua alta disponibilidade, devida ao elevado teor de matéria orgânica.

De fato, plantações florestais de *P. taeda* têm grande capacidade de ciclagem de nutrientes, devido à camada de resíduos vegetais mortos sobre o solo (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2000). Essa camada, formada pela ação do tempo, diferencia os solos agrícolas dos solos florestais, constituindo uma importante fonte de nutrientes para as árvores (PRITCHETT, 1979). Poggiani e Schumacher (2000) citam que a quantidade de nutrientes, em um ecossistema florestal, é representada pelos nutrientes encontrados nos diferentes componentes da árvore (folhas, casca, galhos, raiz e madeira), na vegetação do sub-bosque, na serapilheira e no solo.

Em geral, concentrações de nutrientes dos componentes das árvores apresentam a seguinte magnitude: acícula > casca > galhos > madeira (VALERI, 1988). As concentrações, em geral, mudam com a idade das árvores, a espécie, a qualidade do solo, a época de coleta e a idade fisiológica das amostras (POGGIANI;

COUTO; SUITER FILHO, 1983). Entretanto o acúmulo de nutrientes nos diferentes componentes, via de regra, é maior na madeira e nas raízes, devido ao maior acúmulo de biomassa.

Diversos trabalhos abordaram o estoque de nutrientes e a produção de biomassa em florestas de *P. taeda*, apontando a inexistência de proporcionalidade entre a biomassa do componente e a distribuição de nutrientes na floresta (BIZON, 2005; WITSCHORECK, 2008; MORO et al., 2008; VOIGTLAENDER, 2007; OKI, 2002). Para a serapilheira, embora de baixa importância relativa, quanto ao conteúdo total de biomassa no ecossistema florestal (5%) (WITSCHORECK, 2008), apresenta estoque de nutriente significativo, sobretudo para elementos como o N e Ca. Esses horizontes espessos são compostos, na maioria das vezes, por 70% de acícula, enquanto os demais componentes, por casca, galhos e estruturas de reprodução (VALERI; REISSMANN, 1989).

A serapilheira contém uma grande parte dos nutrientes extraídos do solo pelas árvores, liberados à medida que ocorre a decomposição, podendo, assim, ser novamente absorvidos pelas plantas. Diversos estudos demonstraram altas quantidades de nutrientes acumuladas sobre o solo florestal (Tabela 1).

Tabela 1- Estoque de nutrientes e biomassa seca acumulada de serapilheira para diferentes idades de *Pinus taeda*

Idade	Mg ha ⁻¹	N	P	K	Ca	Mg	S
				kg ha ⁻¹			
7 ⁽¹⁾	7,6	61,8	4,8	8,6	41,8	8,2	
8 ⁽²⁾	23,9	208,0	7,6	12,8	86,1	22,6	
10 ⁽³⁾	19,7	161,5	10,7	9,2	61,3	9,7	
14 ⁽³⁾	24,3	185,0	13,4	8,4	87,5	14,2	
15 ⁽⁴⁾	43,3	285,3	25,5	18,2	67,5	17,0	
15 ⁽⁴⁾	83,9	826,3	42,5	35,2	66,4	18,1	
15 ⁽⁴⁾	64,4	725,0	42,2	22,2	64,0	8,9	
17 ⁽⁵⁾	14,9	152,7	7,8	10,1	47,8	12,9	8,9
19 ⁽⁶⁾	37,4	292,5	10,4	14,8	86,1	12,1	
24 ⁽⁷⁾	14,0	106,1	5,0	11,8	86,9	14,2	

Fonte: ⁽¹⁾ VALERI; REISSMANN (1989); ⁽²⁾ VOIGTLAENDER (2007); ⁽³⁾ VALERI; REISSMANN (1989); ⁽⁴⁾ TREVISAN (1992); ⁽⁵⁾ WITSCHORECK (2008); ⁽⁶⁾ LOPES; GARRIDO; MELLO (1983); ⁽⁷⁾ HAAG; ROCHA FILHO; OLIVEIRA (1978).

No manejo de plantações de *P. taeda*, devem-se avaliar o armazenamento e os fluxos de entrada e saída de nutrientes na serapilheira, uma vez que constituem importantes informações para o atendimento à demanda

nutricional das árvores (REISSMANN; WISNIEWSKI, 2000). Após o processo de queda, a serapilheira vai se decompondo, liberando os nutrientes nele contidos, dando sequência à ciclagem de nutrientes (KOEHLER, 1989). De fato, o retorno de nutrientes devido à mineralização da serapilheira representa uma via muito importante para a ciclagem dos nutrientes, principalmente em sítios com solos de baixa fertilidade (REIS; BARROS, 1990; REISSMANN; WISNEWSKI, 2000), onde o acúmulo de serapilheira é maior (TREVISAN et al., 1987).

Pritchett (1979) ressalta que, sob o aspecto nutricional, a serapilheira desempenha importante papel. Solos sob cobertura florestal fornecem microclima e espectro de microorganismos diferentes dos que se encontram na maior parte dos demais solos. Tal diferença consiste em processo dinâmico, como a ciclagem de nutrientes, a formação de ácidos orgânicos e a consequente lixiviação de bases, que dão um caráter distinto aos solos florestais. Esse material vegetal acumulado garante, às plantas, um estoque de nutrientes, os quais se vão liberando à medida que ocorre o processo de decomposição dos resíduos (TREVISAN, 1992).

Estudos comprovam que grandes quantidades de serapilheira acumulada em plantações de *P. taeda*, bem como a relação positiva, em geral, entre a quantidade de serapilheira depositada anualmente e a idade das árvores. Bray e Gohan (1964) comentam que, normalmente, há aumento da deposição da serapilheira até a idade em que as árvores atingem a maturidade, ou fecham suas copas, ocorrendo, posteriormente, ligeiro decréscimo ou estabilização. A quantidade de serapilheira acumulada depende da taxa de composição, sendo influenciada pelas suas características físico-químicas, pela aeração, pela temperatura, pela umidade do solo, pelo tipo e pela abundância da microflora e da fauna (PRITCHETT, 1979).

De acordo com Trevisan (1992), na espessa camada de serapilheira, torna-se possível observar horizontes e sub-horizontes orgânicos, diferenciáveis entre si pelos estádios de decomposição que apresentam. Na camada superior, encontra-se material praticamente intacto, recém depositado. Porém, quanto maior a proximidade com a superfície do solo, maior é o grau de decomposição, dificultando, ou até impossibilitando, determinar sua origem, confundindo-se, inclusive, com a porção mineral do solo e das raízes. Trevisan et al. (1987), estudando a deposição de serapilheira de plantações de *P. taeda* em três classes de sítio diferentes,

observaram que a espessura do material depositado foi maior nos sítios de média (13 cm) e de baixa (12 cm) produtividade do que nos mais produtivos (8 cm). Maiores deposições também são observadas em plantações mais velhas. Valeri e Reissmann (1989) avaliaram o acúmulo da serapilheira em plantações de *P. taeda* com diferentes idades (7, 10 e 14 anos): observaram maiores deposições com o passar dos anos, estabelecendo-se o mais intenso acúmulo até os 10 anos. Entretanto, para Viera e Shumacher (2010), avaliando a deposição média anual de serapilheira em plantações de *P. taeda*, entre o 5º e o 7º anos de idade, não observaram diferenças estatísticas entre os anos avaliados, sendo a média anual, aos 7 anos, de 2,7 6 Mg ha⁻¹.

A decomposição da serapilheira é influenciada pelo clima, pelo solo, pelas características genéticas da espécie, pela idade, pela densidade do plantio, pelos tratos culturais e pela concentração de diferentes nutrientes (POGGIANI et al 1987). Klemmedson et al. (1985), estudando plantações de *P. ponderosa*, observaram que a taxa de decomposição da serapilheira foi mais rápida em povoamentos mais abertos, devido à ação dos fatores responsáveis: a temperatura e a umidade da serapilheira. Poggiani (1985), estudando plantações florestais de *Pinus caribaea* com 14 anos de idade, verificou que a serapilheira acumulada sobre o solo foi de 20,2 Mg ha⁻¹.

2.3 A Ciclagem de nutrientes e a sustentabilidade da produtividade florestal

Nos ecossistemas florestais, os fluxos de entrada e de saída de nutrientes ocorrem na forma de três ciclos, denominados ciclo bioquímico, ciclo biogeoquímico e ciclo geoquímico (PRITCHETT; FISHER, 1987). A estabilidade do balanço de nutrientes, no curto, no médio e no longo prazos, associa-se à sustentabilidade dos ecossistemas florestais (SWITZER; NELSON, 1972). O ciclo bioquímico é também conhecido como ciclo interno, pois trata dos processos de translocação dos nutrientes dentro da planta. O ciclo biogeoquímico, por sua vez, considera as transferências entre o solo e a planta, enquanto o geoquímico considera o fluxo de entrada e de saída de nutrientes no ecossistema como um todo (VITAL,1996).

A ciclagem bioquímica de nutrientes constitui importante estratégia da árvore para aumentar a eficiência na utilização de nutrientes e para reduzir as

perdas devido à deposição de serapilheira (POGGIANI; SCHUMACHER, 2000). Em espécies de pinus, configura, além disso, uma importante fonte de nutrientes (NAMBIAR; FIFE, 1987). A quantidade de nutrientes retranslocados é maior para elementos como N, P, K e Mg e menor para Ca, S e micronutrientes. Do mesmo modo, a ciclagem bioquímica é maior nas folhas, quando comparada à da casca. Miller (1981) relata que as quantidades de nutrientes retranslocados são mais importantes, à medida que ocorre o fechamento das copas do povoamento, podendo praticamente qualquer tipo de tecido contribuir para essa ciclagem.

Viera e Schumacher (2009) estimaram a retranslocação de nutrientes em acículas de *P. taeda*, como 74,9% do N; 86,1% do P; 91,0% do K; 58,0% do Mg e 66,2% do S, seguindo esta magnitude de retranslocação: $K > P > N > Mg = S$. Para Switzer e Nelson (1972), estudando plantações de *Pinus taeda* com 20 anos de idade, estimaram que 39% do N, 60% do P, 22% do K, 24% do Mg foram retranslocados.

Embora esse mecanismo interno de transferência de nutrientes apresente suma importância para as florestas, sobretudo de coníferas, a ciclagem biogeoquímica detém a maior importância, nesse processo, nos ecossistemas florestais. Koehler (1989) considera a deposição de serapilheira como o mais significativo modo de transferência de nutrientes, dentro do ecossistema florestal. A avaliação dos aspectos quantitativos dessas entradas é fundamental para a ecologia, a produtividade florestal e a manutenção da qualidade do sítio. Poggiani (1981) cita que os nutrientes transferidos por meio da deposição da serapilheira são reutilizados para o crescimento da própria floresta, funcionando como o principal caminho de transferência, ao solo, do carbono, do N, do P e do Ca. O K, entretanto, é transferido principalmente pela precipitação interna na floresta. Em geral, as folhas senescentes à época da queda contêm macronutrientes na proporção $N > Ca > K$ e P (KOEHLER, 1989).

Switzer e Nelson (1972) relatam que a importância das fontes de nutrientes para povoamentos de *P. taeda* com 20 anos segue esta ordem: na decomposição da serapilheira (ciclagem biogeoquímica) > lixiviação das copas (ciclagem geoquímica) > precipitação (ciclagem geoquímica) > retranslocação de nutrientes (ciclagem bioquímica) > o solo (ciclagem geoquímica). Em seu estudo, os

autores estimaram que 40% da demanda de N e 54% da de Ca derivavam-se da decomposição da serapilheira.

Embora a ciclagem bioquímica e a biogeoquímica sejam importantes mecanismos de manutenção nutricional das florestas, mostram-se incapazes de manter a produtividade, devido à contínua perda de nutrientes do sistema pela exportação de madeira e pelos outros componentes das árvores, como galhos e acícula/folhas, conforme observado por Santana; Barros e Neves (2002), Gonçalves et al., (2002), Bizon (2005) e Witschoreck (2008).

A perspectiva de manter a produtividade em rotações contínuas deve partir do entendimento de como funciona o ecossistema florestal e dos fatores limitantes dessa produção. O manejo intensivo das plantações florestais, na medida em que manipula o solo, pode levar as plantas daninhas e as fertilizações a atenuar os efeitos dos fatores limitantes de crescimento, mas deve ser compreendido na extensão de suas interações com o ambiente; por exemplo, usar o balanço de entrada e de saída de nutrientes como ferramenta para manter a qualidade produtiva dos solos (KIMMINS, 1994).

A análise do balanço de nutrientes é de fundamental importância, pois estima a sustentabilidade da produtividade para as rotações seguintes (SWITZER; NELSON, 1972). Bizon (2005) ressalta que esse balanço pode ser negativo, no longo prazo, devido à intensificação da silvicultura e à realização de grandes colheitas. Assim, o balanço de nutrientes do ecossistema florestal, identificando as entradas e as saídas do sistema, constitui instrumento fundamental para o manejo florestal adequado (BARROS; NEVES; NOVAIS, 2000). Os principais meios de entrada de nutrientes no ecossistema são as chuvas, a deposição atmosférica, o intemperismo de minerais do solo, as fertilizações (POGGIANI, 1980), os elementos em solução (drenagem lateral, capilaridade) ou em forma sólida (depósitos coluviais), as entradas biológicas e as entradas de fixação simbiótica e não-simbiótica de nitrogênio (RANGER; TURPAULT, 1999).

As espécies florestais possuem distintas capacidades de utilização e de exigência nutricional. Nesse sentido, a capacidade de determinada espécie em ciclar os nutrientes absorvidos pode refletir-se na adaptação aos diferentes tipos de solo e à produtividade florestal. Fatores climáticos relacionam-se, intimamente, à produtividade florestal, configurando-se a disponibilidade de nutrientes no sistema

florestal como um dos principais aspectos envolvidos. Em florestas de produção e, principalmente, em florestas de rápido crescimento, esse cenário torna-se mais evidente. Devido à exímia capacidade de crescimento dessas florestas, grandes quantidades de nutrientes são rapidamente estocadas na biomassa florestal e prontamente exportadas, via colheita florestal, podendo acarretar desequilíbrios nutricionais, caso não sejam repostas (POGGIANI, 1985).

Estudos sobre a ciclagem biogeoquímica e a importância da entrada de nutrientes, via precipitação interna e escoamento pelo tronco das árvores, foram elucidativos em plantações de *Pinus* spp. (Tabela 2), destacando a significativa entrada de nutrientes do sistema florestal. De fato, a contribuição das entradas de nutrientes via precipitação interna pode ser 160% maior, se comparada somente à precipitação externa ou global (SHEER, 2009). Ao arrastar partículas depositadas sobre a vegetação, a precipitação interna lixivia órgãos vegetais vivos e mortos, exsudados das plantas, excrementos e cadáveres de animais (SCHRUMPF et al., 2006).

Tabela 2 - Entrada de nutrientes via precipitação externa (PE), via precipitação interna (PI) e via escoamento do tronco (TR) para diferentes povoamentos de *Pinus* spp

Espécie	Local	Tipo	N	P	K	Ca	Mg	S
<i>P. taeda</i> ⁽¹⁾	EUA	PI + TR	-	-	7,6	2,5	1,3	-
<i>P. taeda</i> ⁽²⁾	Rio Grande do Sul, Brasil	PE	-	-	11,1	4,9	1,5	-
<i>P. taeda</i> ⁽²⁾		PI	-	-	18,10	4,7	1,5	-
<i>P. taeda</i> ⁽²⁾		TR	-	-	2,60	0,5	0,3	-
<i>P. taeda</i> ⁽³⁾	Argentina	PE	5,73	2,23	3,79	23,84	2,67	-
<i>P. taeda</i> ⁽³⁾		PI	5,52	3,27	54,09	28,06	10,44	-
<i>P. taeda</i> ⁽³⁾		TR	0,48	0,25	3,90	0,7	0,12	-
<i>P. oocarpa</i> ⁽⁴⁾	São Paulo, Brasil	PI	-	-	13,90	3,3	1,7	-
<i>P. caribaea</i> ⁽⁴⁾		PI	-	-	18,60	5,8	1,6	-
<i>P. radiata</i> ⁽⁵⁾	Espanha	PE	18,0	-	7,00	45,0	11,0	59,0
		PI	11,0	-	11,00	26,0	8,0	64,0
<i>P. taeda</i> ⁽⁶⁾	Paraná, Brasil	PE	3,9	0,3	8,6	19,2	1,8	-

Fonte: ⁽¹⁾ (FEHL; RAY, 1983 apud LIMA, 1985); ⁽²⁾ LOPES; SCHUMACHER; VIERA (2010); ⁽³⁾ CALDATO (2011); ⁽⁴⁾ LIMA, 1985; ⁽⁵⁾ AMEZAGA, 1997 apud CASARTELLI, 2006; ⁽⁶⁾ OKI, 2002.

A entrada de nutrientes pela precipitação pluviométrica e pela deposição atmosférica apresenta alta variabilidade espacial e temporal, relacionando-se com a distância da costa marítima, a proximidade de fontes de poluição, as queimadas e o regime pluviométrico (COUTINHO, 1979). Oki (2002)

comenta que os constituintes da chuva também podem ser derivados do oceano e da erosão eólica, exercendo a proximidade do mar influência sobre o aumento das concentrações de sódio, cloro, magnésio e potássio dos solos de região costeira. Esse tipo de entrada pode constituir um importante processo de entrada de nutrientes, especialmente em regiões onde predominam sistemas florestais de baixo uso de insumos externos. Além disso, possui fundamental importância para a ciclagem biogeoquímica, devido ao carregamento de nutrientes das folhas, dos galhos e da casca das árvores, por meio da precipitação interna (PEREZ-MARIN; MENEZES, 2008).

Poggiani e Schumacher (1997) salientaram que, dependendo do local, da idade do povoamento e da espécie, a entrada anual de nutrientes, via precipitação pluviométrica, pode ser suficiente para suprir os nutrientes anualmente acumulados no tronco das árvores. Tais constatações também foram corroboradas por Lima (1985), ao observar que a entrada de nutrientes, via precipitação pluviométrica, é uma importante fonte de nutrientes para as florestas.

De fato, a passagem da água por meio da vegetação resulta, geralmente, em aumento da concentração dos elementos, em função da lavagem de poeiras e de aerossóis das superfícies foliares. Em outras palavras, a água da chuva, ao atravessar o dossel, arrasta e carrega material particulado, depositado sobre a superfície das folhas, o tronco e os tecidos vegetais, durante os períodos de seca, o que acarreta modificações na composição química da água da chuva. Para alguns nutrientes, as entradas no ecossistema, por meio desses processos de lavagem, podem exceder a quantidade normalmente retornada ao solo, via deposição na serapilheira (BURGHOUTS; STRAALLEN; BRUIJNZEEL, 1998). Quase todo o conteúdo de nitrogênio, enxofre e cloro presente em ecossistemas florestais deriva-se da atmosfera, na qual são encontrados gases em baixas concentrações, em formas oxidadas de N e S, fontes de nutrientes para as plantas. Esses gases são originados tanto de fontes naturais quanto de atividades humanas (HAAG, 1985).

Uma medida pouco usada, mas que representa significativa entrada de nitrogênio no ecossistema florestal é a consorciação com espécies de leguminosas, por meio da fixação biológica de nitrogênio. Silva (2007), estudando a consorciação entre as espécies de *E. grandis* e de *A. mangium*, observou que, na densidade de plantio de 833 árvores ha⁻¹ de *A. mangium* e de 1667 árvores ha⁻¹ de *E. grandis*,

sequestraram-se 31 kg ha⁻¹ de N atmosférico. Entretanto, devido praticamente à inexistência de espécies herbáceas e arbustivas leguminosas no sub-bosque das plantações de *Pinus* spp., a entrada de N por essa via é considerada muito baixa (FISHER; BINKLEY, 2000).

A fertilização mineral representa forma artificial de incorporar nutrientes ao sítio florestal. Em plantações florestais, as árvores respondem às mudanças ambientais, por meio da produtividade, entre cujos principais fatores está a fertilização (GONÇALVES et al., 2000). O uso da fertilização mineral no meio florestal preconiza que as aplicações devam suprir as necessidades das plantas em fase inicial de crescimento, em geral até o segundo ano de plantio, a partir do qual se inicia a ciclagem interna de nutrientes.

Nos solos tropicais, altamente intemperizados, a abordagem nutricional torna-se bastante significativa, sendo imprescindível seu manejo para obter altas produtividades e, sobretudo, sustentabilidade, no longo prazo. O controle da saída de nutrientes é o ponto-chave no balanço nutricional, com vistas à produção florestal sustentada, pois se relaciona, diretamente, ao manejo florestal praticado, seja pela manipulação do solo, das práticas silviculturais, dos resíduos florestais, da serapilheira, da colheita florestal, da exploração madeireira e da utilização de materiais genéticos mais eficientes no uso de nutrientes (GONÇALVES et al., 1997).

Poggiani (1980) identifica que as saídas de nutrientes são representadas pelas perdas erosivas, pela volatilização, pela lixiviação profunda e pela colheita florestal. Para Reis e Barros (1990), a colheita da biomassa florestal apresenta papel de destaque nesses processos, sendo responsável pela maior parte dos nutrientes exportados. Ferreira et al. (2001) salientam que, não havendo o período de reposição de nutrientes adequado, a diminuição da fertilidade do solo tem, como principais responsáveis, as explorações intensivas com rotações curtas.

Bahia et al. (1992) apontaram que a erosão constitui a forma mais importante de degradação do solo e a principal causa do esgotamento de nutrientes no sítio, com implicações diretas sobre a produtividade agrícola ou florestal. Devido ao grande carregamento de resíduos em solos superficiais, nos quais a fertilidade em áreas tropicais é mais significativa, a erosão tem grande efeito sobre esta. Cavichiolo (2005) salienta que a erosão do solo, além de poder reduzir a

produtividade das culturas, devido à sua degradação, ou ao esgotamento de nutrientes, pode causar significativos impactos ambientais.

Para o manejo de florestas plantadas, Cavichiolo (2005) destaca três atividades principais, que contribuem para acelerar o processo erosivo: a colheita mecanizada, que pode causar a compactação do solo, diminuindo a infiltração de água e promovendo maior volume de enxurrada; a locação inadequada de estradas, que pode causar problemas quanto à captação, à condução e ao deságue concentrado de enxurrada, ocasionando erosão dentro ou fora dos talhões, e métodos inadequados de preparo do solo, que o podem expor à erosão hídrica ou eólica. Analisando-se os impactos, percebe-se que se relacionam, direta ou indiretamente, ao manejo dos resíduos florestais remanescentes no talhão, após a colheita. Em outros termos, os resíduos podem atenuar os níveis de compactação das máquinas florestais (SEIXAS; SOUZA, 2007) e a velocidade das enxurradas (CAVICHIOLO, 2005), bem como proteger a superfície do solo da exposição às intempéries (GONÇALVES, 1995).

De fato, a sustentabilidade da produção florestal e a qualidade do ambiente relacionam-se, diretamente, à conservação do solo, cuja condição é diagnosticada pelos indicadores físicos, químicos e biológicos (CHAER; TÓTOLA, 2007; FOX 2000). Foi a partir da década de 1980, com o advento do sistema de cultivo mínimo, que ocorreram profundas mudanças nos sistemas de manejo florestal.

O cultivo mínimo eliminou a aração, a gradagem e a queima de resíduos, e propôs o controle das ervas daninhas, por meio do uso de herbicidas, em aplicações anteriores e posteriores ao plantio (ZEN et al., 1995; CASTRO, 1995). O preparo de solo restringe-se às linhas, ou às covas, de plantio, mantendo os resíduos, com o intuito de racionalizar o uso dos recursos do solo (GONÇALVES, 1995).

Gonçalves (2002) avaliou preparos mais intensivos do solo, comparativamente ao cultivo mínimo, em plantações florestais, observando que as perdas de solo, para o sistema intensivo, foram de $3,3 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, enquanto, para o sistema de cultivo mínimo, as perdas foram de $0,07 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Lombardi Neto e Bertoni (1990) destacam que, em geral, a perda de solo de $12,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ é tolerável para solos bastante profundos, permeáveis e bem drenados, enquanto

perdas de 2,0 a 4,0 t ha⁻¹ ano⁻¹ são admissíveis em solos com camadas de impedimento físico, ou solos pouco profundos.

Cavichiolo (2005), estudando perdas de solo por erosão hídrica, sob diferentes métodos de preparo do solo, em plantação de *Pinus taeda*, observou interação positiva entre a intensidade de preparo do solo e a perda de sedimentos. Mesmo com o uso do subsolador florestal, impactos significativos poderão ser detectados, quando do mau uso do equipamento (morro abaixo), implicando uma perda de 3,4 t ha⁻¹ ano⁻¹. Cortando o aclive, as perdas reduziram-se para 1,0 t ha⁻¹ ano⁻¹.

Constituindo o solo um recurso natural essencial e disponível em quantidade limitada, seu manejo produtivo, sempre a aprimorar, é uma meta importante para o manejo florestal sustentável, pois determina, em grande medida, a capacidade do local para a produção de madeira (RANGER e TURPAULT, 1999). Nessa direção, é objetivo central da gestão florestal sustentável manter tanto a capacidade produtiva dos solos, como a qualidade do ambiente (NAMBIAR; BROWN, 1997).

O conceito de sustentabilidade estabelece-se a partir da manutenção, ou do aumento, da produtividade da floresta, seguindo o princípio básico de que a colheita florestal não pode exceder a capacidade produtiva do sítio, considerando a floresta como unidade individual de manejo (SCHLICH, 1925 apud POGGIANI, 1996). A fim de que essa capacidade não seja exaurida, e sabendo que árvores de rápido crescimento extraem consideráveis quantidades de nutrientes e de água do solo, deve-se manter um equilíbrio dinâmico entre as entradas e as saídas dos nutrientes do sítio (STAPE, 1997). Para tanto, torna-se necessário monitorar as plantações florestais, com base em informações do passado, que indiquem a necessidade de mudanças na forma de manejo, assegurando a ausência de qualquer efeito danoso sobre o ecossistema (POGGIANI; STAPE; GONÇALVES, 1998).

Para buscar a sustentabilidade do sítio florestal, é preciso entender como ocorre o balanço de nutrientes, no curto, no médio e no longo prazos (SANTANA; BARROS; NEVES, 2002), e sobre como funcionam o ecossistema florestal, a produção orgânica, a distribuição da mesma, pelos diferentes componentes da árvore, e os fatores limitantes dessa produção (KIMMINS, 1994). Nos ecossistemas florestais, os nutrientes são constantemente ciclados entre a

biomassa e o solo, dependendo o processo de ciclagem das propriedades físico-químicas dos nutrientes e da sua função fisiológica, mas, principalmente, do ciclo hidrológico. Isso porque este mantém os processos da lixiviação do solo e da biomassa, da disponibilidade no solo e da taxa de intemperismo, configurando-se o balanço de nutrientes do ecossistema a interação entre esses vários processos do meio (FLINN et al., 1979). As diferenças entre entradas e saídas exibem o balanço de nutrientes do ciclo geoquímico no curto, no médio e no longo prazos. Em florestas plantadas, esse balanço determina o grau de sustentabilidade de uma floresta para as rotações seguintes (KIMMINS, 1994).

Dessa forma, esses estudos são capazes de caracterizar a depleção, antes da análise direta do sistema, e seriam capazes de indicá-lo, fornecendo, também, dados quantitativos úteis para recomendações aplicáveis ao manejo florestal (RANGER; TURPAULT, 1999). De fato, muitos trabalhos têm feito esse tipo de abordagem (GONÇALVES et al., 1997; SANTANA; BARROS; NEVES, 2002; BIZON, 2005; WITSCHORECK, 2008; PEREZ-MARTIN; MENEZES, 2008; CALDATO, 2011). Em outros casos, também vêm ampliando a escala de estudo para uma bacia hidrográfica (VITAL; LIMA e CAMARGO, 1999; OKI, 2002; VOIGTLAENDER, 2007).

Algo notório, em todos esses estudos, são as implicações das exportações de nutrientes, devidas à biomassa florestal, sobretudo dos resíduos florestais. Entretanto, devido à importância relativa da biomassa da madeira e da preconização, por parte da silvicultura moderna, em se manterem os resíduos florestais no campo, o grande impacto nutricional do sítio deve-se à colheita da madeira. Soma-se, também, a este componente a casca, que, embora em alguns casos seja mantida no sítio, via de regra é retirada, principalmente em plantações de *Pinus spp.*, em que a utilizam na produção de substratos para viveiros florestais, ou para fins energéticos.

Assim, analisando-se o manejo atual das plantações de *Pinus taeda*: exportação da madeira + casca, deixando-se no campo a copa (galhos + folhas), o manejo dos resíduos no campo é relevante, evitando que esses componentes sejam retirados do sítio, exportando quantidades significativas de nutrientes, ou evitando que os nutrientes contidos sejam rapidamente mineralizados.

2.4 Nutrientes do solo

Vários fatores encontram-se relacionados à produtividade florestal, a qual, fundamentalmente, depende das condições do solo e do meio ambiente. O solo, por si só, possui importantes atributos, responsáveis, direta ou indiretamente, pela produtividade florestal, como a profundidade, a presença de camadas compactadas, a densidade, a atividade química da fração coloidal, a classe textural, a concentração de matéria orgânica e as concentrações de nutrientes (PRITCHETT, 1979; CARVALHO et al 1999).

Normalmente, os atributos físicos do solo relacionam-se melhor com a capacidade produtiva dos sítios florestais do que os químicos (GONÇALVES; DEMATTÊ; COUTO, 1990), constituindo a classe textural, que desencadeia uma série de atributos correlatos (estrutura do solo, capacidade de retenção de água e consistência), a característica mais importante (CARVALHO et al 1999). Assim, correlações significativas entre a produtividade e a concentração de argila têm sido observadas (BRAGA et al., 1995; GAVA; GONÇALVES, 2008), principalmente por se relacionarem, diretamente, ao regime de água no solo, determinante da capacidade produtiva do sítio (MELO et al., 1995) e da disponibilidade de nutrientes (GONÇALVES et al., 2000).

Bellote e Dedecek (2006), estudando os atributos físicos e químicos do solo e suas relações com a produtividade do *P. taeda*, observaram que esta foi afetada pela disponibilidade de água no solo, sendo maiores os efeitos no Cambissolo Háplico Léptico, devido às maiores concentrações de argila e silte. Segundo o autor, embora os cambissolos estudados apresentem perfil edáfico restrito, seus atributos químicos, associados a características granulométricas adequadas, permitem boa capacidade de retenção da água, resultando em altas produtividades.

Tais constatações parecem sustentar o atual manejo das plantações florestais de *P. taeda* no sul do Brasil, já que, mesmo não se realizando a fertilização, se obtêm altas taxas de produtividade. Portanto o manejo desempenhado em solos mais argilosos, que costumem ser mais férteis que os arenosos (ZOBEL et al., 1987), com base na característica regional de baixo déficit hídrico e no sistema de cultivo mínimo (a manutenção dos resíduos da colheita no talhão), tem mantido estável a produção florestal de *P. taeda*, há décadas, nessa

região. Entretanto exaustões sucessivas dos sítios, normalmente associadas à retirada da madeira e da casca, e, por vezes, ao manejo inadequado dos resíduos florestais, têm implicado interações entre os atributos químicos do solo e a produtividade florestal (DOLDAN, 1987; MENEGOL, 1991; CARVALHO et al 1999; RIGATTO; DEDECEK; MATTOS, 2005).

No ecossistema florestal, o intemperismo, dependendo do tipo de rocha de origem e do grau de envelhecimento do solo, pode ser uma importante fonte de nutrientes, desempenhando importante papel nas principais reações biogeoquímicas (ZIEGLER et al., 2005). Mota et al. (2007) argumentaram que a composição mineralógica do solo é um dos aspectos que mais influencia seus fenômenos físicos e químicos e que possibilita melhor entendimento da evolução dos sistemas de intemperismo e pedogenético. De fato, a composição química do solo é altamente controlada pela composição do material de origem geológica, cuja composição diverge, progressivamente, a partir do material de origem, sob a influência de processos pedogênicos determinados pela vegetação, pela topografia e, em particular, pelo clima (THANACHIT et al., 2005).

Chadwick e Chorover (2001) apontam que o desenvolvimento do solo pode ser entendido, no longo prazo, como uma reação ácido-base em que os ácidos da atmosfera (CO_2 , NO_2 , SO_2) e os ácidos orgânicos reagem com as bases, na forma de minerais da rocha, para formar os minerais secundários do solo. Essas reações químicas são acionadas pela ação de um fluxo contínuo de matéria e de energia sobre um material de origem, progressivamente modificado e instável. Nesse processo, minerais primários são transformados para fases secundárias, mais estáveis. O consumo de prótons e de elétrons, durante as reações químicas do material de origem, afeta a trajetória da pedogênese, determinando caminhos para a intemperização dos minerais

Dessa forma, ao longo do tempo, pelo intemperismo, vão-se liberando os nutrientes dos minerais do solo, principalmente nos mais novos, ainda com grande quantidade de minerais primários. Os íons solúveis são frequentemente liberados, por meio de reações do intemperismo, sendo disponibilizados para a absorção pelas plantas e para a ciclagem dentro do ecossistema florestal. Em florestas, entre 80 e 100% do aporte de Ca, Mg, K e P se derivam do intemperismo de rochas (HAAG, 1985). Na contrapartida, Reis e Barros (1990) consideram que,

nas regiões tropicais, de modo geral, a entrada de nutrientes, por esse processo, seja pouco expressiva, ou inexistente, devido ao elevado grau de intemperismo dos solos.

Há, na literatura, valores da taxa de formação dos solos da ordem de 2 a 5 mm de solo por ano. Esses valores podem ser considerados representativos para a velocidade de aprofundamento do perfil de alteração, referindo-se o extremo superior desse intervalo aos climas mais agressivos. Friend (1992) apresenta um levantamento, realizado em diversos sítios, sobre a taxa de formação dos solos (Tabela 3). Em climas muito frios, como na Escandinávia, superfícies graníticas descobertas pelo gelo há cerca de 10 mil anos apresentam um manto de alteração de poucos milímetros de espessura. Por outro lado, sob o clima tropical, na Índia, cinzas vulcânicas, datadas de 4000 anos, desenvolveram uma camada de solo argiloso de 1,8 m de espessura ($4,5 \text{ mm ano}^{-1}$). Em regiões muito úmidas, como no Havaí, o intemperismo de lavas basálticas recentes permitiu a formação de solos suficientes para o cultivo em apenas um ano (FRIEND, 1992).

Tabela 3 - Taxa de formação de diferentes solos

Solo	Local	Idade do material	Taxa de formação
		anos	mm ano^{-1}
Planossolo	Oregon, EUA	133	4,9
Neossolo	Havaí, EUA	45	39,4
Argissolo	Iowa, EUA	4000	1,0
Argissolo	Iowa, EUA	2500	0,5
Argissolo	Wisconsin, EUA	265	1,0
Argissolo	Iowa, EUA	400	3,3
Chernossolo	Iowa, EUA	110	1,3
Latossolo Vermelho	África	75000	0,1
Espodossolo	Europa	1200	1,9

Fonte: FRIEND (1992).

Chadwick; Brimhal; Hendricks (1990) apontaram vários métodos para descrever e quantificar o intemperismo do solo. Entre eles, os mais utilizados baseiam-se em princípios de conservação de massa, para estimar os elementos durante o intemperismo. Os procedimentos para realizar esses cálculos incluem estimativas sobre as quantidades dos constituintes do solo e sua relativização, por substâncias consideradas estáveis. Nesse processo, utilizam-se, como referência, elementos pouco móveis no solo (elemento índice), os quais permitem avaliar

mudanças na composição química, em relação ao material de origem. Devido à natureza relativamente insolúvel dos minerais que dele fazem parte, como o rutilo e o anatásio (TiO_2), o titânio (Ti) é considerado um elemento imóvel, sendo usado como elemento-índice para estudos de balanço químico de massa (MICHELON, 2006). Nesse contexto, tais balanços estabelecem diferenças entre o ganho e a perda de elementos, durante a alteração do material original em material residual, resultante do intemperismo químico (LACERDA; ANDRADE; QUÉMÉNEUR, 2002). De fato, nos estudos pedogenéticos, esses trabalhos contribuem, não só para o entendimento do processo de ganhos e de perdas de elementos, como também para a compreensão do funcionamento do solo (MICHELON, 2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área de estudo

O presente trabalho foi desenvolvido entre os anos de 2010 e 2011 no planalto serrano do estado de Santa Catarina, no município de Otacílio Costa, Fazenda Bom Retiro da empresa Klabin, distante 206 km da capital catarinense. Nesta região, ocorrem extensas áreas de plantações florestais de *P. taeda*. (Figura 1) (SAR, 2005). O sítio de estudo localiza-se nas coordenadas geográficas 27°21'34" S e 50°05'06" W, em uma altitude de 856 m. O tipo climático da região é classificado segundo Köppen como mesotérmico úmido Cfa, sem estação seca, com temperatura média anual de 13,2 °C e uma precipitação pluviométrica anual de 1691 mm (INMET, 2011). A evapotranspiração potencial anual é de aproximadamente 670 mm, sem deficiência hídrica e excedente hídrico de 1000 mm (Figura 2). O fator climático mais limitante ao crescimento das árvores é ligado a ocorrência de temperaturas abaixo de 0°C em alguns meses do ano, resultando na ocorrência média de quatro geadas por ano. O cálculo do balanço hídrico seguiu o método de Thornthwaite e Mather (1955) por meio do programa BHnorm (ESALQ, 2005) elaborado em planilha eletrônica por Rolim et al. (1998). A disponibilidade climática natural de água foi estimada para a região de Otacílio Costa com base em uma série histórica de 30 anos de observações, sendo, portanto, considerados representativos para a escala regional.

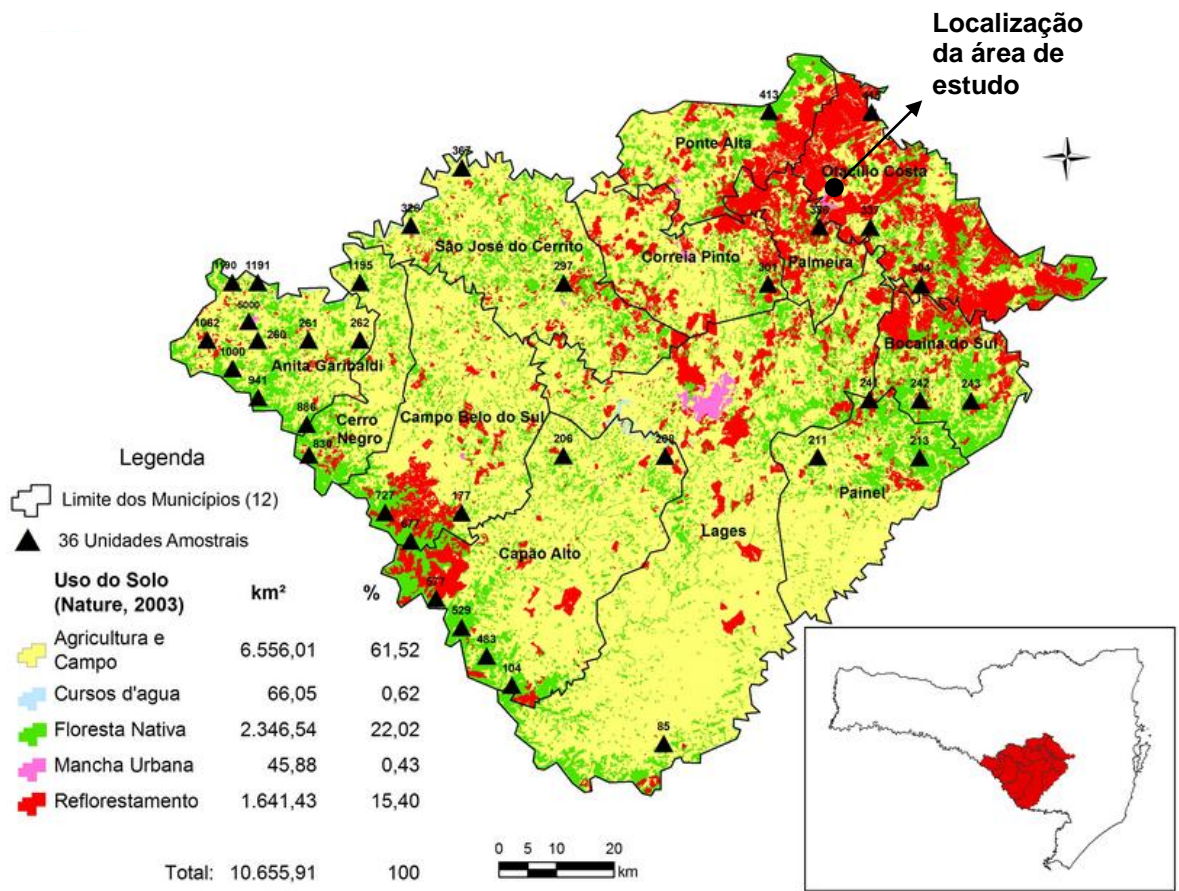


Figura 1 - Mapa de uso do solo da secretaria de desenvolvimento regional do município de Lages – SC. Fonte: www.iff.sc.gov.br

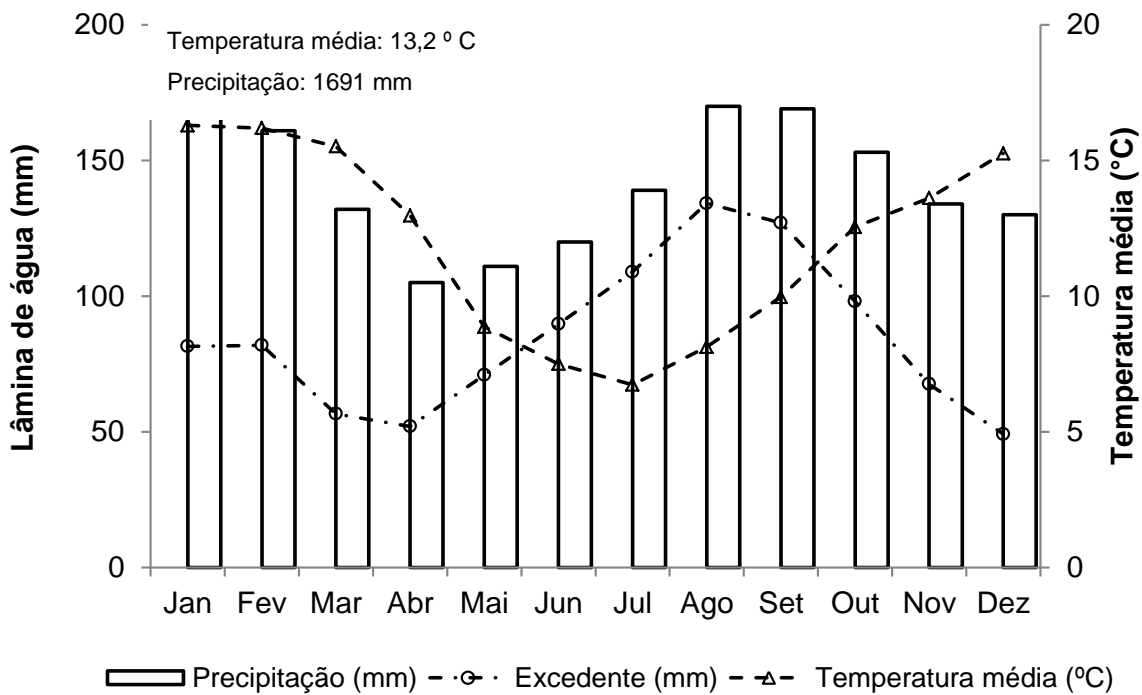


Figura 2 - Balanço hídrico climatológico da região de Otacílio Costa – SC

A vegetação natural da região era formada por Floresta Ombrófila Mista (Mata de Araucária), um ecossistema do Bioma da Mata Atlântica. A Mata de Araucária ocorre em todo o Planalto Catarinense, caracterizada pela coexistência da flora tropical e temperada, e apresenta a *Araucária angustifolia* (Pinheiro-brasileiro) como principal espécie arbórea, situando-se acima dos 500-600 metros de altitude (LAGO, 1968). Até a década de 1930, a principal atividade econômica e ocupação agrária da região dependiam exclusivamente da pecuária. Entretanto, a partir desta época e com maior destaque nos anos de 1950 e 1960, iniciou-se na região a exploração intensiva da madeira de *A. angustifolia*. Após o desmatamento de grandes áreas e início dos incentivos fiscais em 1966, iniciou-se na região o plantio de extensas áreas de *Pinus taeda* para produção de serrados e papel e celulose (SILVA, 2010).

Segundo o mapa geológico do estado de Santa Catarina (SANTA CATARINA, 1986), a área de estudo está localizada na Bacia do Rio Paraná, sob a formação geológica do Rio do Rasto, Grupo Passa Dois, Permiano. A litologia predominante é formada por rochas sedimentares, composta por arenitos avermelhados, violáceos ou esbranquiçados, de granulometria fina a média, intercalados com argilitos e siltitos de mesma coloração (BETIOLLO, 2006).

O solo presente na área de estudo é um Cambissolo Húmico Alumínico léptico (CHa) de textura argilosa, com saturação de bases de 1,2 % e saturação por Al acima de 97%. A sequência de horizontes do perfil do solo é A1-ABBA-Bi-BC-C, com drenagem moderada, em relevo suave ondulado, com cores variando de escuro, bruno amarelado escuro a bruno claro acinzentado e profundidade média de 1,5 m. O material de origem é formado por siltitos, caracterizados pelo acúmulo de sedimentos silteosos, variando de 0,002 a 0,06 mm, composto principalmente de minerais de quartzo, feldspato e mica (MACHADO et al., 2001). No ano de 2008 a empresa Klabin realizou estudos dos atributos físicos e da concentração de óxidos do solo na área de estudo (Tabela 4).

Tabela 4 - Atributos físicos do solo e concentração de óxidos nas camadas de solo

Horizonte	Profundidade (cm)	Areia ⁽¹⁾	Silte	Argila	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃ %	MnO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Ki	Kr
A1	00-16	22	32	45	0,06	3,3	0,01	0,66	11,3	11,5	2,14	1,70
A2	16-45	20	32	47	0,06	4,4	0,01	0,55	11,2	11,7	1,94	1,55
A3	45-64	18	27	53	0,05	4,8	0,01	0,60	11,4	12,8	1,92	1,55
AB/BA	64-78	19	27	53	0,05	4,8	0,01	0,72	11,3	12,3	1,84	1,50
Bi	78-103	18	30	51	0,06	5,3	0,01	0,73	12,1	14,0	1,82	1,50
BC	103-132	22	33	45	0,08	3,4	0,01	0,64	12,5	14,8	1,62	1,40

⁽¹⁾ Composição granulométrica: dispersão por NaOH (%); ⁽²⁾ Ataque por H₂SO₄. Fonte: Empresa Klabin, 2008.

3.2 Métodos silviculturais

A plantação de *Pinus taeda* selecionada para realização da amostragem da biomassa estava com 16 anos de idade, manejados sem desbaste, plantados via propagação seminal, espaçamento 2,50 m x 2,50 m ou 1.600 árvores ha⁻¹. À época de plantio foi realizado o preparo do solo com auxílio de trator de esteira com haste (ripper) de 40 cm de profundidade. As mudas foram plantadas manualmente e produzidas em sistema de raiz nua, sendo realizadas adubações necessárias para o seu pleno desenvolvimento. Realizaram-se manutenções silviculturais combatendo formiga cortadeira e combatendo a mato competição com herbicida glifosato e roçadas manuais até que estas interferências não fossem mais significativas ao crescimento das árvores (aproximadamente 3 anos). Na ocasião do plantio ou nas manutenções silviculturais não foram realizadas adubações, por não ser uma prática adotada em plantações de *Pinus taeda*.

3.3 Amostragem da biomassa florestal

Para a amostragem da biomassa florestal, inicialmente foi realizado um inventário florestal para caracterização dendrométrica do povoamento. Foram instaladas 23 parcelas de 20 m x 30 m em 230 ha de plantio, para medição do diâmetro à altura do peito (DAP) de todas as árvores da parcela e medição da altura total somente das árvores da primeira linha da parcela. A seleção das árvores para o estudo baseou-se na distribuição diamétrica do povoamento. Em um talhão representativo da amostragem do inventário florestal, selecionaram-se 10 árvores do sítio florestal, de cinco classes diamétricas, da seguinte forma: quatro árvores com

DAP médio, duas árvores com DAP igual ao DAP médio - 1 desvio padrão (s), duas árvores com DAP igual ao DAP médio + 1 (s), uma árvore com DAP igual ao DAP médio - 2 (s) e uma árvore com DAP igual ao DAP médio + 2 (s).

Após a identificação das 10 árvores foi demarcada uma área de 2,5 m x 2,5 m no entorno de cada árvore selecionada, de modo que esta permanecesse no centro da parcela. Dentro deste perímetro foi amostrada serapilheira acumulada em quatro pontos com um aro de metal circular com 5 cm de altura e 30 cm de diâmetro. Dois pontos de amostragem foram locados na linha e dois pontos na entrelinha de plantio. O material depositado foi amostrado em três estratos distintos de decomposição, classificados como: serapilheira não decomposta, serapilheira pouco decomposta e serapilheira muito decomposta. A separação foi baseada na coloração e características físicas do material (Figura 3). O principal componente da serapilheira amostrada era composto por acículas. Galhos, estróbilos e casca foram encontrados nas camadas B e C, em estado avançado de decomposição. Cada amostra foi seca e pesada individualmente. Somente quando foram enviadas para análise química foi feito a homogeneização das amostras por estrato e por árvore.



Figura 3 - Diferentes estratos de decomposição das camadas de serapilheira: não decomposta (a), pouco decomposta (b) e muito decomposta (c). Aspecto dos três estratos (d)

Finalizado a amostragem da serapilheira, seccionou-se as árvores ao nível do solo para amostragem da biomassa florestal. A motosserra utilizada no procedimento de derrubada das árvores foi lubrificada à água para evitar contaminação das amostras. Inicialmente, foram coletados as medidas de altura total e do DAP. Em seguida, os componentes acícula, galho vivo e galho morto foram separados e pesados no campo em balança analógica com 100 g de precisão (Figura 4).

No fuste abatido e sem copa, foram realizados cortes seccionais a cada dois metros para retirada de discos de madeira de três centímetros de espessura (Figura 5). As toras de madeira com casca com dois metros de comprimento foram pesadas no campo. Na ocasião da coleta da madeira (fuste) não foi considerado diâmetro mínimo de aproveitamento da árvore.

No laboratório, os discos (madeira) amostrados foram mensurados as circunferências com e sem casca, para determinação do volume de cada árvore de acordo com a fórmula de Smalian (eq. 1). Em seguida, separou-se a casca da madeira, mediu-se a massa úmida de ambos, para posterior cálculo da quantidade de casca e madeira do tronco. Todos os discos coletados de cada árvore foram picados e depois moídos para garantir a homogeneidade das amostras submetidas às análises químicas.

$$V_t = \pi/8 \times L [D_1^2 + D_n^2 + 2 (D_2^2 + D_3^2 + \dots + D_{n-1}^2)] \quad (1)$$

em que:

V_t = Volume total (m^3);

L = Comprimento da tora (m);

D = Diâmetro da tora (m).



Figura 4 - Separação de acículas, galhos mortos e galhos vivos (a) e posterior pesagem (b)

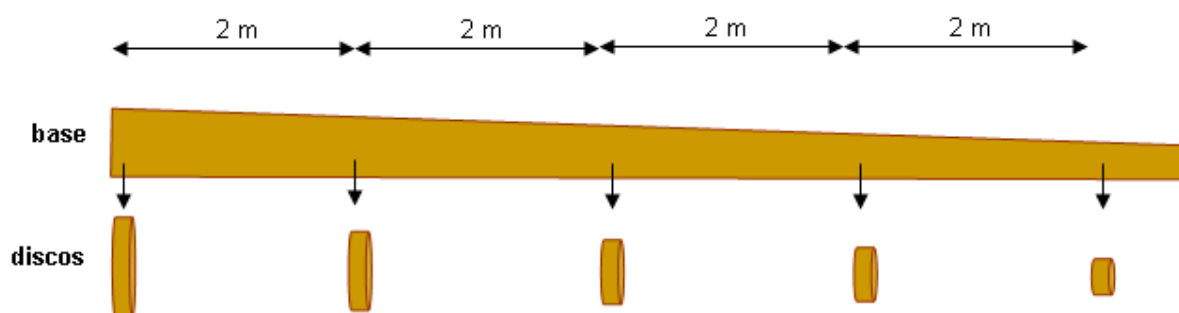


Figura 5 - Metodologia para medição e corte dos discos de madeira

A amostragem de raiz foi realizada ao redor de cada árvore selecionada, em trincheiras abertas com dimensões equivalentes ao do espaçamento de plantio. Na área da trincheira, retirou-se a serapilheira, em seguida com enxadadas e pás escavou-se até 20 cm de profundidade. A escavação nessa camada foi manual devido à maior concentração de raízes finas (Figura 6a). Após esta etapa, realizou-se com auxílio de uma retroescavadeira o içamento do toco de cada árvore (Figura 6b). Posteriormente, abaixo de 20 cm, as raízes restantes foram retiradas com a ajuda da retroescavadeira, enxadadas e pás até a profundidade de 190 cm. O solo escavado passou por catação manual minuciosa para coleta das raízes.

Todas as raízes coletadas foram pesadas e enviadas ao laboratório para classificação em duas classes de diâmetro: raízes < 3mm (raiz fina) e raízes > 3 mm (raiz grossa), exceto o toco das árvores que foram pesados no campo. Esta separação foi realizada com auxílio de um paquímetro (precisão de 1 mm). Amostras de raízes foram retiradas para determinação da umidade e concentração de nutrientes (Figura 7).

No momento da amostragem das árvores, também foram coletadas as medidas do comprimento da raiz primária mais grossa. Este procedimento foi facilitado pelo uso da retroescavadeira, a qual realizava a retirada dos tocos intactos. Devido à umidade presente no solo, em todas as árvores amostradas, não ocorreu ruptura do sistema radicular, sendo possível coletar a medida completa da raiz primária mais grossa (Figura 6b).



Figura 6 - Início da escavação manual da trincheira (a) e posterior retirada da raiz primária mais grossa com auxílio da retroescavadeira (b)



Figura 7 - Classificação das raízes em diâmetros menor (a) e maior que 3 mm (b)

Para estimativa da biomassa florestal aérea e radicular foram ajustadas equações de regressão relacionando a área seccional do DAP, como variável independente, com a massa seca dos componentes acícula, galho vivo, galho morto, casca, madeira, raiz fina e raiz grossa, como variável dependente, nas 10 árvores selecionadas. A seleção da equação mais adequada baseou-se no coeficiente de determinação (R^2) e o erro padrão da estimativa ($Sy.x$), utilizando-se para isso o programa SIGMAPLOT v.10 (STATISTICAL PACKAGE FOR THE SOCIAL SCIENCE – SPSS, 2006). Após o ajuste das equações de regressão de cada componente foi realizada aplicação das equações aos dados do inventário florestal. Desta forma, pôde-se estimar a massa seca de cada componente para as demais árvores inventariadas.

3.4 Determinação do estoque de nutrientes no sítio florestal

Amostras de todos os componentes florestais coletados foram enviados para laboratório para obtenção da massa úmida e massa seca em balança semi-analítica (precisão de 0,01 g). Em seguida, os materiais vegetais foram levados para estufa com circulação forçada de ar a 65°C de temperatura e secados até massa constante. Todas as amostras foram processadas em moinho tipo Willey (modelo MA680/01) e enviadas para a análise química no Laboratório de Ecologia Aplicada, no Departamento de Ciências Florestais, ESALQ/USP. A concentração de N foi determinada por destilação (semimicro-Kjedahl) após a digestão sulfúrica. As concentrações de Ca e Mg foram determinadas por espectrofotometria de absorção atômica, a concentração de K por espectrofotometria de chama, a concentração de P por espectrofotometria em extrato nítrico-perclórico e a concentração de S por espectrofotometria em ultravioleta visível (UV/VIS), segundo métodos propostos por Malavolta; Vittj; Oliveira (1989).

Com os resultados das análises químicas e do cálculo de biomassa de cada componente florestal determinou-se o estoque de nutrientes na biomassa. Para isso, foram ajustadas equações lineares relacionando o conteúdo de nutrientes nos diferentes componentes com a biomassa seca dos mesmos. Para seleção das equações foi utilizado a mesma estatística para ajuste das equações de biomassa florestal. Após o ajuste das equações de regressão de cada componente foi realizada aplicação das equações aos dados do inventário florestal. Desta forma, pôde-se estimar o estoque de nutrientes de cada componente para as demais árvores inventariadas.

O estoque de nutrientes na serapilheira foi estimado por estrato e por ponto de amostragem, a partir da concentração média dos nutrientes e do estoque de biomassa. A quantidade de nutrientes transferida para o solo via deposição de serapilheira foi estimada pela equação abaixo (eq. 2):

$$\text{QNT} = [\text{Nutriente}] \times \text{BSD} \times 10^3 \quad (2)$$

em que:

QNT = Quantidade de nutrientes transferidos para o solo (kg ha^{-1});

[Nutriente] = Concentração do nutriente na serapilheira depositada (g kg^{-1});

BSD = Biomassa seca da serapilheira depositada (kg ha^{-1}).

Para amostragem do solo e análise dos atributos químicos, utilizou-se trado holandês nas camadas de 0-20, 20-40, 40-60, 60-100, 100-140, 140-180 e 180-190 cm de profundidade. Dez amostras compostas (quatro amostras simples por árvore) foram coletadas nos mesmos locais de retirada da serapilheira. As amostras de solo foram secas em estufa durante 72 horas à temperatura de 45°C até massa constante. Em seguida, as amostras foram peneiradas (peneira de 2 mm) e enviadas ao Laboratório de Ecologia Aplicada, Departamento de Ciências Florestais, ESALQ/USP, para determinação da concentração dos nutrientes N, P, K, Ca, Mg e S por espectrofotometria de absorção atômica e por espectrofotometria de chama segundo os métodos propostos por Raij (2001). O estoque de nutrientes foi calculado nas camadas acima citadas, calculando-se o produto entre o volume de solo, a concentração de nutrientes e a densidade de solo obtidos no ponto médio de cada camada.

Para a estimativa da disponibilidade de N foi considerado somente o N potencialmente mineralizável (GONÇALVES; MENDES; SASAKI, 2001). Como a maioria do N total está contida em formas não-disponíveis (frações húmicas muito estáveis), apenas 10% do N total foi considerado disponível às plantas.

3.5 Ciclagem de nutrientes

Para amostragem da serapilheira depositada foram demarcadas no povoamento três parcelas de 20 m x 30 m, com seis coletores por parcela, distribuídos diagonalmente. Deste modo, foram instalados três coletores na linha de plantio e três coletores na entrelinha de plantio. Todos os coletores foram confeccionados com tela tipo sombrite (50%), com superfície de 0,25 m² (0,50 m x 0,50 m), suspensos à altura de 0,5 m do solo (Figura 8). A amostragem foi realizada durante 12 meses, sempre na última semana de cada mês. As amostras de cada coletor foram pesadas individualmente. Para análise laboratorial, mensalmente coletou-se uma amostra homogeneizada das três parcelas.

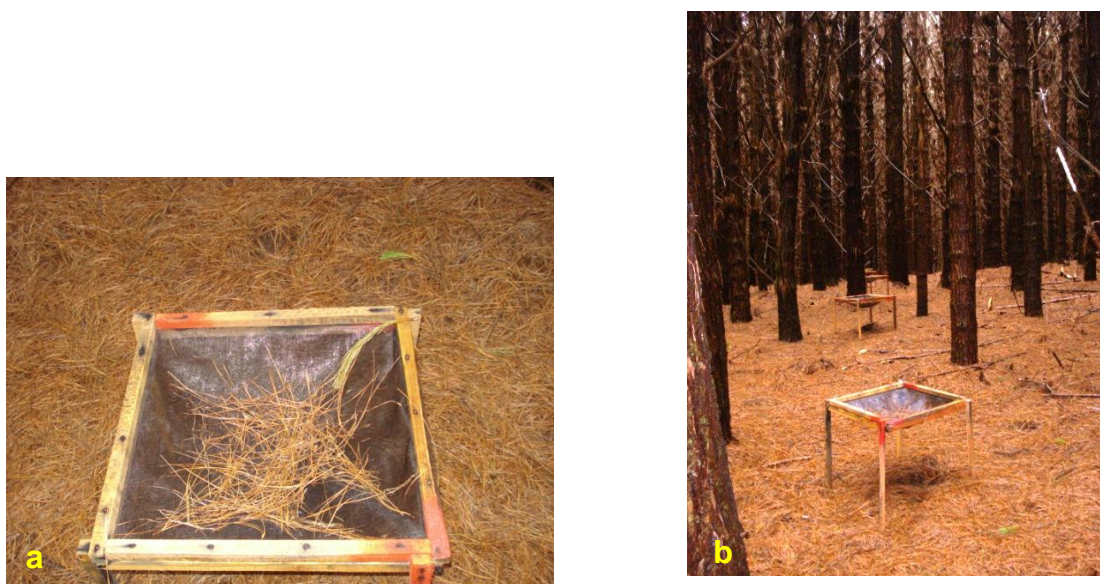


Figura 8 - Detalhe do coletor instalado (a) e disposição dos mesmos dentro da parcela (b)

Para se estimar a taxa de decomposição da serapilheira utilizou-se o método de Olson (1963), onde a massa da serapilheira acumulada sobre o solo em equilíbrio dinâmico e a massa da serapilheira depositada anualmente são relacionadas para cálculo da constante de decomposição da serapilheira (eq. 3).

$$K = \frac{L}{X_{ss}} \quad (3)$$

em que:

K = Taxa de decomposição da serapilheira (ano^{-1});

L = Massa da serapilheira depositada anualmente ($\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$);

X_{ss} = Massa da serapilheira acumulada sobre o solo (kg ha^{-1}).

Com base no K foi possível também estimar o tempo médio necessário para renovação da serapilheira acumulada sobre o solo, estimado por K^{-1} , e os tempos necessários para a decomposição de 50% (eq. 4) e 95% (eq. 5) da serapilheira, segundo Shanks e Olson (1961):

$$t_{0,5} = \frac{0,693}{K} \quad (4)$$

em que:

$t_{0,5}$ = Tempo necessário para decomposição de 50% da serapilheira (anos);

$$t_{0,05} = \frac{3}{K} \quad (5)$$

em que:

$t_{0,05}$ = Tempo necessário para desaparecimento de 95% da serapilheira (anos);

A estimativa da ciclagem bioquímica foi obtida segundo a equação 6 (VITOUSEK; SANFORD, 1986), a qual leva em conta a retranslocação de Ca, elemento praticamente imóvel, que pode servir de referência para avaliar a retranslocação dos demais nutrientes avaliados (N, P, K, Mg e S):

$$CBQ = \frac{[NSD] / [CaSD]}{[NAc] / [CaAc]} \times 100 \quad (6)$$

em que:

CBQ = Ciclagem bioquímica de nutrientes (%);

[NSD] = Concentração do nutriente na serapilheira depositada (g kg^{-1});

[CaSD] = Concentração do Ca na serapilheira depositada (g kg^{-1});

[NAc] = Concentração do nutriente nas acículas (g kg^{-1});

[CaSD] = Concentração do Ca na acícula (g kg^{-1});

A estimativa da ciclagem biogeoquímica foi obtida segundo a equação 7, avaliada pela variação nas concentrações de nutrientes entre a serapilheira acumulada e a serapilheira depositada (REIS; BARROS, 1990).

$$CBG = \frac{[NSA] - [NSD]}{[NSD]} \times 100 \quad (7)$$

em que:

CBG = Ciclagem biogeoquímica para um dado nutriente (%);

[NSA] = Concentração do nutriente na serapilheira acumulada (g kg^{-1});

[NSD] = Concentração do nutriente na serapilheira depositada (g kg^{-1});

Assim, segundo a equação 9, valores positivos indicam baixa ciclagem biogeoquímica, isto é, os elementos tenderiam a se acumular na serapilheira; para

valores negativos, interpreta-se que ocorreu alta ciclagem dos nutrientes devido a alta mineralização dos elementos.

Parte da ciclagem biogeoquímica nutrientes deve-se a deposição de anual de serapilheira. Uma forma de avaliar a importância da deposição da serapilheira para suprimento nutricional das árvores foi apresentado por Poggiani (1985) o qual considera as quantidades de nutrientes depositados relativamente aos nutrientes absorvidos pelas árvores (eq. 8).

$$QRDe = \frac{[QNDe]}{[QNAc] + [QNDe]} \times 100 \quad (8)$$

em que:

QRDe = Quantidade relativa da entrada de nutrientes via deposição de serapilheira em relação as quantidades de nutrientes absorvidos pelas árvores (%);

[QNDe] = Quantidade de nutrientes depositados via deposição de serapilheira (kg ha^{-1});

[QNAc] = Quantidades de nutrientes acumulada anualmente nas árvores (kg ha^{-1}).

Para estimar a total de nutrientes absorvidos somam-se os nutrientes que entraram via deposição de serapilheira com os nutrientes estocados anualmente pelas árvores. Para a estimativa dos nutrientes estocados anualmente pelas árvores, divide-se os nutrientes estocados na biomassa florestal pela idade das árvores.

3.6 Análise mineralógica do solo

Para amostragem do solo foi aberta uma trincheira e coletada uma amostra de solo nas camadas de 0-20, 20-40, 40-60, 60-100, 100-140, 140-180 e 180-190 cm de profundidade. Também foram coletadas amostras indeformadas de solo nas mesmas camadas para determinação da densidade do solo, calculada pela razão entre a massa seca do solo e o volume do anel de Kopecky, segundo método proposto pela EMBRAPA (1997).

Amostras secas de solo foram passadas em peneira de abertura de 2 mm. Para realização da análise química total foi utilizada a técnica analítica de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) (MORI et al., 1999). Amostras

secas de solo foram enviadas ao Laboratório de Fluorescência de Raios X, do Instituto de Geociências, do Departamento de Mineralogia e Geotectônica da Universidade de São Paulo (DMP-IG/USP).

Para as análises mineralógicas, inicialmente, amostras secas de solo de cada camada amostrada foram colocadas em tubo de ensaio com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) 30% à temperatura de 75 °C para eliminação da matéria orgânica. Em seguida, separaram-se seis amostradas em tubos de ensaio, aplicando-se em cinco delas $0,3 \text{ mol L}^{-1}$ de citrato de sódio + bicarbonato de sódio e 1g de ditonito de sódio, aquecidas a 75 °C e centrifugado a 2400 rpm, para retirada dos óxidos de ferro das amostras. Após retirada do sobrenadante destas amostras, aplicou-se água destilada nas seis amostras, agitando-as para dispersão das frações argila e silte. A solução contendo argila + silte dispersa foi passada em peneira de 270 mesh, acumulando-se no fundo do tubo de ensaio a fração areia. Para separação das frações argila e silte, centrifugações foram realizadas na solução argila + silte à 700 rpm, separando-se a solução sobrenadante (fração argila) do material acumulado no fundo do tubo de ensaio (fração silte). As frações silte e areia foram transferidas para cápsulas de porcelana e secas à temperatura de 110 °C. Posteriormente, a solução contendo somente argila foram saturadas separadamente com $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ e $\text{MgCl}_2 \text{ } 1 \text{ mol L}^{-1}$, para saturação das entre camadas dos minerais de argila, permitindo diferenciar os minerais secundários do tipo 2:1. Este procedimento foi realizado somente para as amostras em que foram retirados os óxidos de ferro. Assim, para a fração argila realizaram-se seis tratamentos: uma amostra preparada com Fe e cinco sem Fe, sendo três saturadas com K, uma mantida à temperatura ambiente (25 °C), uma aquecida à 300 °C e a terceira aquecida à 500 °C; e duas saturadas com Mg à temperatura ambiente, sendo uma solvatada com etilenoglicol. A realização destes tratamentos nas amostras da fração argila é usado para caracterização de esmectitas e micas (RESENDE et al., 2005).

Por fim, lâminas com as amostras das frações argila, silte e areia das sete camadas de solo amostradas, foram confeccionadas para serem analisadas pelo difratograma de raios-x (DRX), equipado com tubo de Cu e filtro de Ni, radiação $\text{CuK}\alpha$, operando com 20 mA e 40 Kw de acordo com o método de Jackson (1973). A varredura no difratômetro de raio X foi feita para ângulos de 2 a 30° (escala 2 θ) com velocidade de 1° min^{-1} para identificar os argilominerais e a presença de outros

minerais como quartzo e feldspato. Todas as etapas descritas foram realizadas no Laboratório de Mineralogia de Solos da ESALQ/USP.

3.7 Balanço nutricional do sítio florestal

Para o balanço nutricional do sítio florestal contabilizou-se as entradas e saídas de nutrientes na rotação de cultivo florestal de 16 anos. Foram consideradas as entradas de nutrientes via precipitação pluviométrica como sendo de $3,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de NO^{-3} , $0,19 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de P, $3,46 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de K, $7,21 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de Ca e $1,61 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ Mg. Os dados de precipitação foram coletados em estação pluviométrica situada a dois km do local de plantio (PROMAB, 2011). Para as entradas via intemperismo de rocha foram considerados os resultados obtidos no presente trabalho quanto à caracterização mineralógica do solo.

Para saída de nutrientes, simularam-se três cenários de manejo silvicultural, com diferentes intensidades de remoção da biomassa:

- i) Cenário A: retirada somente da madeira;
- ii) Cenário B: retirada da madeira e da casca; e,
- iii) Cenário C: retirada da madeira, da casca e da copa (acículas, galhos vivos e galhos mortos).

O cenário B é o manejo mais adotado nos plantios florestais da região de estudo. Este cenário, comparativamente ao cenário mais conservador (A) ou exaustivo (C) permite inferir por meio de balanços nutricionais as diferenças quanto ao número de rotações florestais potenciais que o sítio suporta, sem diminuir a produtividade de madeira.

Para estimar o número potencial de rotações com 16 anos de cultivo, dividiu-se os estoques dos seis macros nutrientes (N, P, K, S, Ca, Mg) contidos no solo e na biomassa total do povoamento pela quantidade de nutrientes exportada em cada rotação, diminuída da entrada de nutrientes via precipitação pluviométrica, de acordo com equação abaixo (eq. 9):

$$\text{NPR} = \frac{\text{ENS} + \text{ENB}}{\text{SNC} - \text{ENC}} \quad (9)$$

em que:

NPR = Número potencial de rotações de cultivo de *P. taeda* (16 anos), necessários para zerar o estoque de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, e S) no Cambissolo húmico alumínico léptico;

ENS = Estoque de nutrientes no solo avaliado até 190 cm de profundidade (kg ha^{-1});

ENB = Estoque de nutrientes na biomassa florestal (acícula, galho vivo, galho morto, casca, madeira, raiz fina e raiz grossa) (kg ha^{-1});

SNC = Saída de nutrientes na rotação florestal, segundo os cenários de manejo A, B e C (kg ha^{-1});

ENC = Entrada de nutrientes via precipitação pluviométrica (kg ha^{-1} rotação⁻¹).

Com base nesta equação foi avaliado o impacto de três cenários de manejo florestal (A, B e C) sobre a sustentabilidade do sítio florestal pelo uso do conceito de números potenciais de rotações florestais padrões necessários para zerar o estoque de cada nutriente disponível no solo estudado. Quando as saídas dos nutrientes forem maiores que as entradas, o balanço será negativo, indicando o número de rotações florestais que o sistema suporta. Por outro lado, quando as entradas são maiores que as saídas, existe uma condição de sustentabilidade ou número indeterminado rotações florestais em determinado cenário de manejo, simbolizado por “ In ”. Embora o resultado do número de rotações florestais potenciais do sistema de manejo não tenha significado absoluto, em termos relativos, os resultados são de grande valia para comparar diferentes sistemas de manejo e expressar em longo prazo a sustentabilidade do sistema de manejo florestal (SWITZER; NELSON, 1972). Desta forma, o balanço de entrada e saída de nutrientes para manutenção da qualidade produtiva dos solos é um importante indicador para um adequado manejo florestal, com vistas a uma produção florestal sustentada (KIMMINS, 1994; RANGER; TURPAULT, 1999; BARROS; NEVES; NOVAIS, 2000).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Inventário florestal

A plantação florestal de *P. taeda* apresentou alta produtividade, indicada pelo volume com casca $609,8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ou $38,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, com DAP médio de 22,8 cm e altura total (H) média de 20,0 m. Os resultados são coerentes com a produtividade média das principais empresas florestadoras da espécie (ABRAF, 2011). A sobrevivência de 94,7% e a alta produtividade do povoamento indicam que as condições edafoclimáticas locais foram adequadas ao desenvolvimento das árvores.

As árvores selecionadas no estudo apresentaram resultados do DAP e da H muito semelhantes aos das árvores do povoamento (Tabela 5). A seleção das árvores do presente estudo representou a distribuição diamétrica das árvores do povoamento florestal: aproximadamente 97,4% das árvores do inventário florestal estão contidos na amplitude diamétrica amostrada. Somente árvores muito pequenas, com DAP menor que 4,0 cm, ou muitos grandes, com diâmetro maior que 41,5 cm, não foram amostradas (Figura 9).

Tabela 5 - Dados dendrométricos das árvores selecionadas no experimento

Tamanho da árvore ¹	Altura	DAP	Volume	
			Madeira	Casca
	m	cm	$\text{m}^3 \text{ árvore}^{-1}$	
$\bar{x} - 2s$	16,3	13,1	0,080	0,020
$\bar{x} - 1s$	16,5	15,8	0,109	0,026
$\bar{x} - 1s$	18,1	17,1	0,129	0,026
\bar{x}	18,1	21,9	0,248	0,072
\bar{x}	20,4	22,6	0,326	0,073
\bar{x}	23,0	23,1	0,378	0,078
\bar{x}	20,2	23,2	0,291	0,072
$\bar{x} + 1s$	22,9	28,6	0,589	0,100
$\bar{x} + 1s$	21,8	29,4	0,502	0,120
$\bar{x} + 2s$	23,5	33,7	0,827	0,175
Média geral	20,1	22,9	0,348	0,076
s	2,7	6,5	0,202	0,012
CV (%)	13,5	28,3	67,902	62,810

⁽¹⁾ selecionaram-se quatro árvores com DAP médio, duas árvores com DAP igual ao DAP médio - 1 desvio padrão (s), duas árvores com DAP igual ao DAP médio + 1s, uma árvore com DAP igual ao DAP médio - 2s e uma árvore com DAP igual ao DAP médio + 2s.

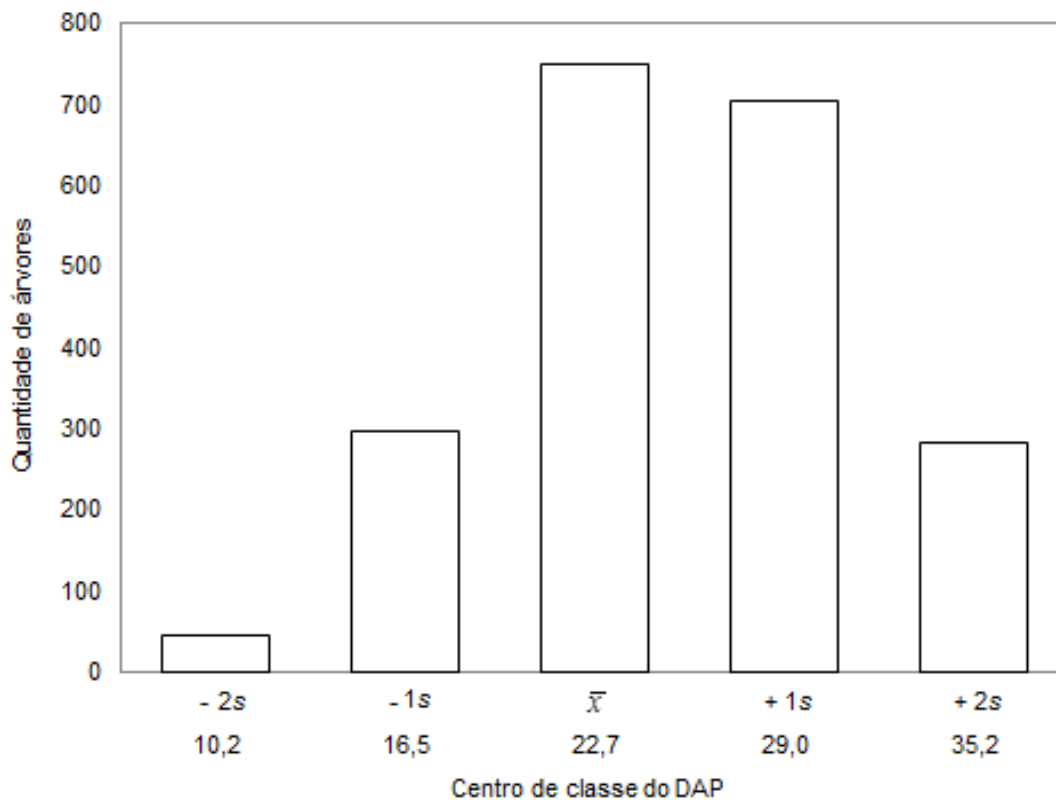


Figura 9 - Distribuição diamétrica do povoamento de *Pinus taeda* com 16 anos de idade

As equações para estimar a biomassa dos componentes da árvore, que tiveram a área seccional do DAP como variável independente, foram altamente significativas (Tabela 6). De modo geral, esses resultados demonstram a consistência dessa variável em modelos dendrométricos, para estimar o volume e a biomassa de componentes das árvores, como já fora demonstrado por outros pesquisadores (VALERI; SOARES; MONTEIRO 1988; SOARES; HOSOKAWA, 1984; BRITO et al., 1984; MELLO; GONÇALVES, 2008).

Tabela 6 - Equações para a estimativa da biomassa dos componentes florestais e do volume de madeira (com e sem casca) em povoamento de *Pinus taeda* aos 16 anos de idade

Componente	Equação	R ²	Sxy	P	N
Acícula	$Y = 203,80^* x - 4,0756^*$	0,8718	1,9721	<0,0001	10
Galho Vivo	$Y = 266,29^* x - 4,5592^*$	0,9116	2,0929	<0,0001	10
Galho Morto	$Y = 576,12x^* - 10,4022^{n.s.}$	0,8998	7,5654	<0,0873	9
Casca	$Y = 398,59 x^{n.s.} - 1,2314^*$	0,9750	2,2925	<0,0001	10
Madeira	$Y = 3699,11^* x - 17,48^{n.s.}$	0,9734	1,9677	<0,0001	10
Raiz Fina	$Y = - 2,2992^{n.s.} x + 0,4253$	0,4532	0,1141	< 0,1884	10
Raiz Grossa	$Y = 811,34^* x - 0,2151^{n.s.}$	0,9307	5,5875	<0,0001	10
Volume com casca	$Y = 11,7472^* x - 0,021$	0,9753	0,0472	<0,0001	10
Volume sem casca	$Y = 9,7666^* x - 0,0813$	0,9672	0,0454	<0,0001	10

x = Área seccional do DAP (m²); * Valores dos coeficientes significativos a 5%, pelo teste t.
n.s. Valores dos coeficientes não-significativos a 5%, pelo teste t

As equações para estimar as biomassas da madeira e da casca apresentaram as melhores capacidades preditivas. Dentre os componentes avaliados, o pior ajuste foi observado para o componente raiz fina. Segundo Laclau (2003), a precisão das equações para estimar as biomassas de raízes finas poderia ser mais elevada, caso as perdas de raízes fossem reduzidas no processo de escavação do solo e de manuseio das raízes, nas fases de amostragem e preparação das amostras.

Valeri, Soares e Monteiro (1988) realizaram ajustes para a estimativa da biomassa de *P. taeda* nas idades de 7, 10 e 14 anos. Nas idades mais avançadas, 10 e 14 anos, a variável DAP foi a que melhor estimou os componentes arbóreos. Somente para a idade de 7 anos, a adição da medida do comprimento da copa viva promoveu melhores ajustes para prever os componentes acículas e galhos. De fato, a utilização da altura total, juntamente com o DAP, pode promover melhores ajustes das equações preditivas de biomassa, notadamente para componentes das copas de árvores mais jovens (HEPP; BRISTER, 1982). Entretanto, devido à facilidade de coleta e à qualidade dos ajustes, somente a variável DAP pode ser usada para estimar as equações de biomassa (VALERI; SOARES; MONTEIRO, 1988).

O estoque de biomassa nas árvores amostradas apresentou, como tendência geral, o aumento no conteúdo total de biomassa de cada componente, com o aumento do DAP (cm) (Tabela 7). Os componentes da copa apresentaram maior coeficiente de variação, como também verificado por WITSCHORECK (2008).

Entretanto, ao se analisar a massa seca relativa desses componentes, observou-se haver a tendência ao aumento do conteúdo de biomassa aérea para os componentes acícula, galho vivo e galho morto (Figura 10). Isso significa que, para proporcionar maior estoque de madeira, as árvores acumulam maior biomassa de copa, sem, entretanto, relativamente acumular maiores quantidades de raízes. Analisando-se as relações entre a massa seca do componente raiz total e a massa seca dos componentes acícula e madeira, pode-se analisar, com mais detalhes, o comportamento das árvores do povoamento florestal (Figura 11). Ambas as relações apresentaram bons ajustes. Dessa forma, para este sítio, observou-se que o compartimento raiz (desenvolvimento radicular) explica mais de 90% dos resultados em peso de acícula e em produção de madeira. Em outros termos, árvores dominadas, ao destinarem mais recursos ao seu sistema radicular, deixam de alocar recursos às folhas, as quais lhes permitiriam produzir mais madeira. Assim, fica claro que árvores codominantes e dominantes do povoamento florestal alocaram relativamente mais recursos da fotossíntese para componentes aéreos do que para o componente radicular, proporcionando maior produtividade em madeira.

Tabela 7 - Biomassa dos componentes florestais avaliados nas 10 árvores amostradas

DAP	Acícula	Galho Vivo	Galho Morto	Casca	Madeira	Raiz Fina (< 3 mm)	Raiz Grossa (> 3 mm)	Raiz total
cm	kg árvore ⁻¹							
10,2	0,04	0,1	2,0	5,1	31,6	0,3	4,6	4,9
16,5	0,9	1,8	3,1	6,0	41,8	0,5	8,2	8,7
	0,8	2,1	6,0	6,7	52,5	0,5	11,1	11,6
22,7	2,2	2,4	3,6	15,2	101,2	0,2	17,5	17,7
	2,2	4,1	18,1	17,1	139,5	0,2	28,5	28,6
	4,9	6,2	4,2	18,4	173,0	0,4	32,7	33,1
29	4,2	7,2	41,2	21,1	155,0	0,3	29,1	29,4
	6,3	12,2	22,7	24,4	209,6	0,4	34,1	34,5
35,2	10,6	16,2	18,8	29,2	244,2	0,3	36,4	36,7
	16,6	19,4	53,2	38,4	302,0	0,2	51,3	51,5
\bar{x}	4,9	7,2	17,3	18,1	145,1	0,3	25,3	25,7
s	5,2	6,6	17,7	10,7	90,4	0,1	14,7	14,6
C.V. (%)	106,4	92,9	102,1	59,2	62,3	37,2	58,0	57,0

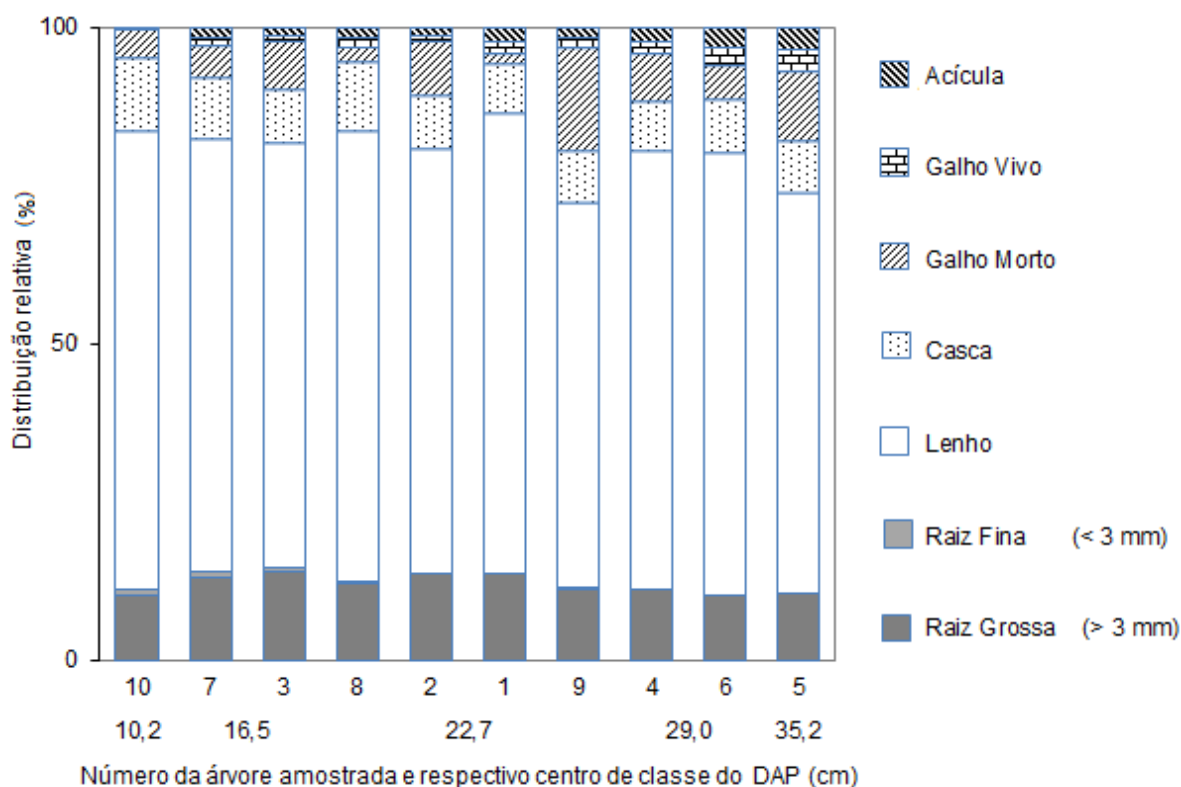


Figura 10 - Distribuição relativa da biomassa nos diferentes componentes das árvores de *Pinus taeda* aos 16 anos de idade

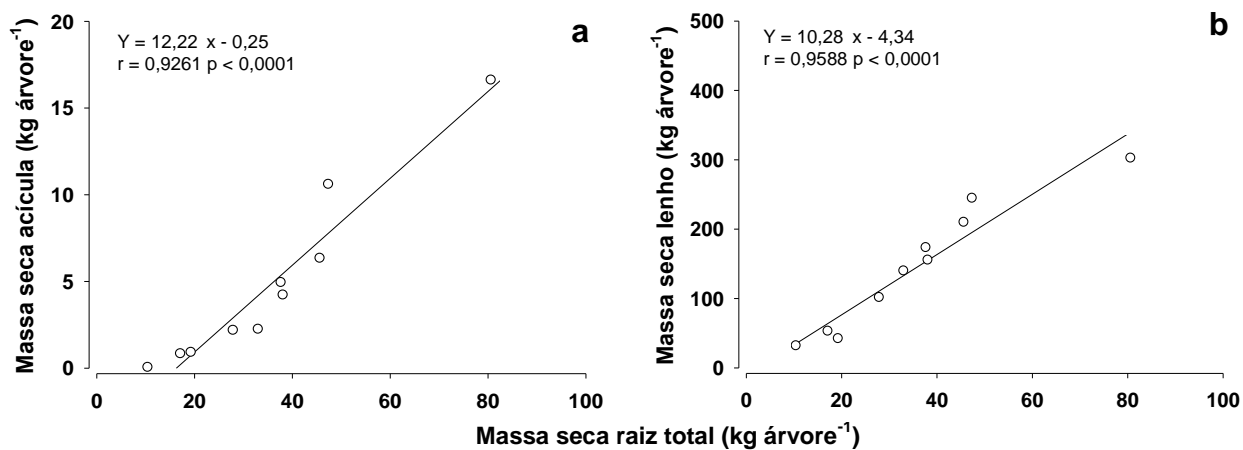


Figura 11 - Correlação entre massa seca de acícula (a) e de madeira (b) com a massa seca da raiz total

A produtividade florestal também é reflexo da uniformidade das plantações. Quanto menor a uniformidade, menor a produtividade, devido à maior ocorrência de árvores dominadas. Árvores dominadas possuem menor capacidade

de utilização de recursos do meio, justificando a menor produtividade florestal (BINKLEY et al., 2003). Várias causas para o declínio da produtividade foram verificadas, incluindo a redução na disponibilidade de recursos, especialmente nutrientes (BINKLEY; SMITH e SON, 1995), o aumento da resistência hidráulica do solo (MENCUCCINI; GRACE, 1996), a área foliar e a eficiência de crescimento (produção por unidade de interceptação de luz) (ALBAUGH et al., 1998).

A Figura 12 traz a forma gráfica que representa a uniformidade de uma plantação florestal (BINKLEY et al., 2003). No povoamento estudado, verificou-se que o volume acumulado de 50% das menores árvores representa 26% do volume do povoamento, indicando maior estratificação, ou dominância, entre as árvores. Se todas as árvores do povoamento fossem iguais (linha pontilhada), 50% das menores árvores representariam 50% do volume acumulado do povoamento.

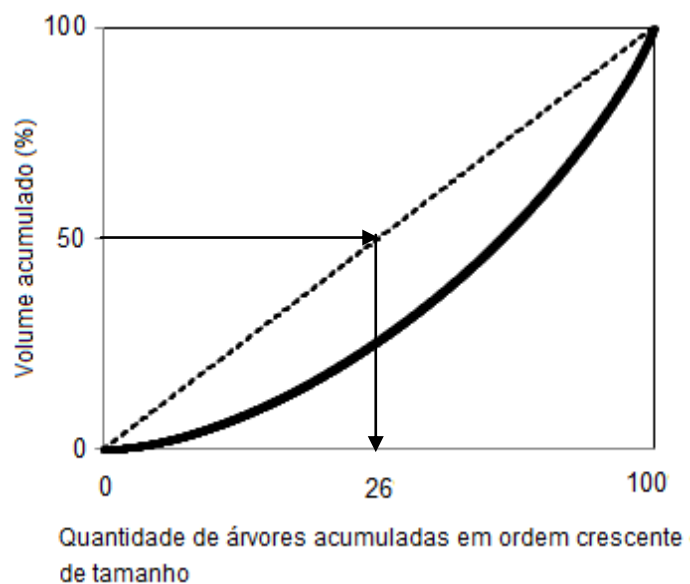


Figura 12 - Volume acumulado (%) do povoamento de *P. taeda* aos 16 anos. A linha pontilhada representa o povoamento com todas as árvores iguais

Os resultados apresentados demonstram o comportamento diferenciado entre as árvores de diferentes classes fitossociológicas. Houve boa correlação entre a profundidade das raízes, a altura total das árvores e a massa seca da madeira (Figura 13). Neste sítio, há forte correlação entre a capacidade de exploração do solo pelas raízes e o desenvolvimento das árvores.

O balanço hídrico regional, com boa distribuição das chuvas durante o ano, pode não ser o fator determinante da falta de uniformidade no tamanho das árvores. Do mesmo modo, a condição nutricional do solo, aparentemente, não foi limitante ao crescimento das árvores. Tal fato é, também, corroborado pelo desuso da adubação como prática silvicultural, pois as plantações de *P. taeda* não têm respondido a ela (FERREIRA, 2001). Entretanto as condições físicas do solo podem estar associadas ao desenvolvimento do componente raiz, implicando o menor desenvolvimento de algumas árvores e, como consequência, a menor produtividade, devido à falta de uniformidade entre as árvores. Em outras palavras, no local de estudo, o Cambissolo apresentou profundidade variável, devido à declividade do terreno, como se pôde observar, no campo, durante a abertura das dez trincheiras para coletar a raiz. Esse fato pode estar limitando o crescimento radicular de algumas árvores, resultando em menor produção de biomassa radicular, e, conseqüentemente, de madeira.

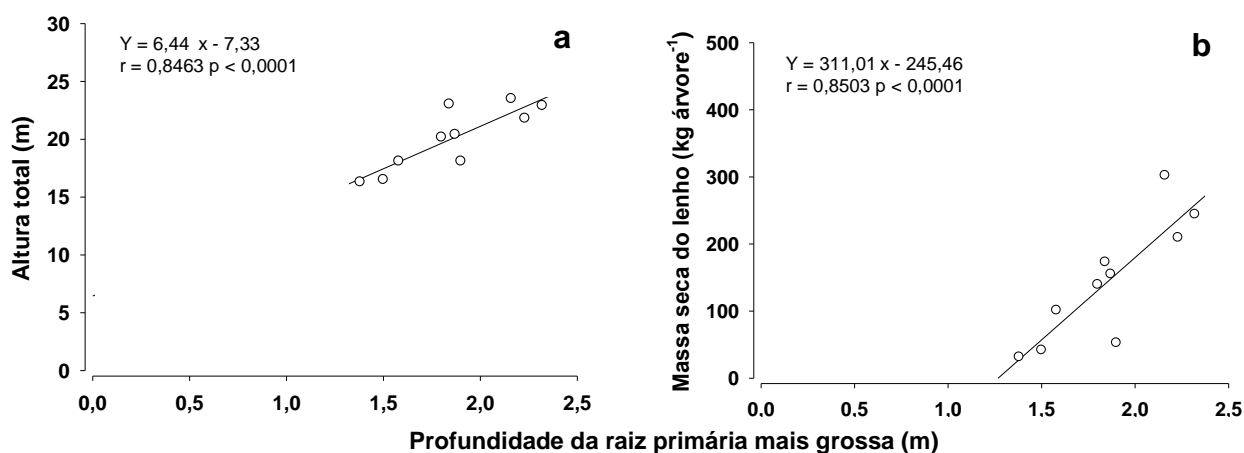


Figura 13 - Correlação entre altura total (a) e massa seca madeira (b) com o comprimento da raiz primária mais grossa

Bockheim e Jordan (2004) citaram que a profundidade do solo constitui uma importante propriedade morfológica para o crescimento das árvores, pois estas se tornam capazes de obter água e nutrientes a grandes profundidades. Entretanto, Gonçalves, Demattê e Couto (1990) salientaram que a profundidade efetiva do solo é mais importante em áreas que apresentam balanços hídricos com elevadas deficiências. Para Zobel, Van Wyk e Stahl (1987), solos pouco profundos seriam aceitáveis somente se ocorresse uma distribuição regular de chuvas. O solo então

deveria ter suficiente quantidade de macro e microporos para garantir boas, mas não excessivas, drenagem e aeração.

O componente raiz fina apresentou baixa quantidade da biomassa seca amostrada, 0,5 Mg ha⁻¹ (Tabela 8). De fato, no método utilizado neste trabalho, a amostragem de raízes finas (< 3 mm) priorizou raízes com tamanhos aproximados a esse diâmetro, podendo ter ocorrido, durante o processo de escavação, a perda de raízes finas, com diâmetro ao redor de 1 mm. Para BÖHM (1979) raiz fina é classificada com diâmetro entre 0,5 mm - 2 mm. Lopes et al. (2010), estudando raízes finas (< 2 mm) de *P. taeda* com 17 anos de idade, por meio do método de monólitos, observaram, até a profundidade de 40 cm, 3,51 Mg ha⁻¹; que, apenas na camada de 0-10 cm, o valor de biomassa chegou a 1,41 Mg ha⁻¹, diferindo estatisticamente das demais camadas do solo.

Tabela 8 - Produção e partição de biomassa seca estimada dos diferentes componentes e da serapilheira da plantação de *Pinus taeda* com 16 anos de idade

Componente	Biomassa Mg ha ⁻¹		Biomassa relativa		
			Total	Árvore inteira	Acima do Solo
			%		
Acícula	7,4	(5,2) ¹	2,2	2,3	2,8
Galho Vivo	10,9	(28,8)	3,2	3,5	4,2
Galho Morto	21,9	(36,4)	6,4	7,0	8,4
Copa	40,1	(64,8)	11,8	12,8	15,4
Casca	24,4	(10,7)	7,2	7,8	9,4
Madeira	195,3	(90,4)	57,2	62,3	75,2
Casca + Madeira	219,7	(102,5)	64,4	70,1	84,6
Biomassa acima do solo	259,8	(156,9)	76,1	82,9	100,0
Raiz Fina (< 3 mm)	0,5	(0,1)	0,1	0,2	
Raiz Grossa (> 3 mm)	53,1	(18,9)	15,6	17,0	
Raiz total	53,6	(19,9)	15,7	17,1	
Biomassa Arbórea	313,4	(175,6)	91,8	100,0	
Serapilheira A	4,6	(1,8)	1,3		
Serapilheira B	8,4	(2,5)	2,5		
Serapilheira C	14,8	(3,8)	4,3		
Serapilheira Total	27,8	(5,2)	8,2		
Biomassa total	341,2	(193,4)	100,0		

⁽¹⁾ Valores entre parêntese referem-se ao desvio padrão da biomassa amostrada.

Um aspecto importante da quantificação do componente raiz fina é sua grande relevância para compreender as relações fonte/dreno na árvore, o processo de crescimento, a alocação de C e de nutrientes, nos diferentes componentes das árvores. São importantes informações na busca do manejo sustentável de

plantações florestais, notadamente aqueles relacionados à nutrição mineral, ao balanço hídrico de uma árvore ou de um povoamento florestal e ao entendimento das respostas de materiais genéticos em diferentes sítios (MELLO; GONÇALVES; OLIVEIRA, 1998). Esses resultados conduzem, portanto, a um melhor entendimento sobre a adaptabilidade dos genótipos florestais a um sítio específico. Contudo poucos trabalhos abordam a biomassa do sistema radicular, principalmente a amostragem de raízes finas (MELLO; GONÇALVES, 2008). Sainju e Good (1993) comentam que estudos mais detalhados sobre o sistema radicular são mais trabalhosos e apresentam maior dificuldade metodológica, dificultando sua realização. Nos últimos anos, oito trabalhos realizaram, no Brasil, a quantificação da biomassa de *P. taeda* (VALERI, 1988); (OKI, 2002); (BARROS FILHO, 2003); (BIZON, 2005); (VOIGTLAENDER, 2007); (WITSCHORECK, 2008); (LOPES et al., 2010) e (CALDATO, 2011); entre eles, dois avaliaram a biomassa radicular total e dois, a quantificação de raízes finas.

Estas são as principais responsáveis pelo processo de absorção de água e de nutrientes no solo. Para várias espécies e ecossistemas, nas primeiras camadas do solo, pode-se encontrar a maior quantidade desse componente. Para *Araucaria angustifolia*, Schumacher; Witschoreck; Barbieri, (2002) encontraram 53,4% da biomassa total de raízes finas na camada de 0-30 cm, enquanto Mello e Gonçalves (1998) encontraram, para *Eucalyptus grandis*, cerca 70% das raízes finas até a camada de 30 cm de profundidade.

Para os resultados da biomassa de raiz total, Witschoreck (2008), ao avaliar uma plantação com 17 anos de idade, observou em média 34,4 Mg ha⁻¹. Bizon (2005), estudando a alocação de biomassa de *P. taeda* em oito sítios florestais, observou em média 48,3 Mg ha⁻¹ de biomassa para este componente, aos 25 anos de idade. Esse autor, ao avaliar a quantidade relativa desse componente nos sítios mais produtivos (Cambissolo háplico) e em sítios menos produtivos (Neossolo lítóico), observou que a quantidade de biomassa de raiz total passou de 16% para 22%, respectivamente. Neste estudo, a qualidade de sítio também influenciou a alocação de biomassa no sistema radicular.

Mello, Gonçalves e Oliveira (1998), comparando a relação folhas/raízes finas (massa/massa) para diferentes genótipos de *Eucalyptus* spp. observaram que a menor relação ocorreu no povoamento do genótipo inferior (0,56), evidenciando

sua menor eficiência no uso dos fotoassimilados, relativamente ao genótipo superior (1,11). Dessa forma, proporcionalmente, a quantidade de fotoassimilados alocados no compartimento raiz fina foi maior nos genótipos menos produtivos. Ao compararem-se esses resultados entre sítios florestais com diferentes potenciais produtivos, essas constatações podem estar associadas às disponibilidades de água e de nutrientes no solo (REIS et al., 1985; GONÇALVES, 1994).

A quantidade de serapilheira acumulada foi bastante elevada, 27 Mg ha⁻¹ (Tabela 7). A camada C da serapilheira, em contato com o solo, representou mais de 50% da massa seca da amostra total. Witschoreck (2008), estudando uma plantação de *P. taeda* com 17 anos, encontrou 14,9 Mg ha⁻¹. Quanto aos demais componentes florestais, observou-se a seguinte sequência de acúmulo: madeira > raiz total > casca > galho morto > galho vivo > acícula. Oki (2002), estudando *P. taeda* com 26 anos de idade, encontrou a seguinte sequência: madeira > galhos > acículas > casca. Para Witschoreck (2008), houve pequena mudança de ordem: madeira > raiz > galho vivo > casca > acícula > galho morto. Bizon (2005), para uma média de oito povoamentos de *Pinus taeda*, com idades entre 19 e 29 anos, observou: madeira > raiz > galhos > casca > acícula. Em todos os trabalhos analisados, o componente madeira foi o mais representativo. Para povoamentos adultos, ele pode representar mais de 70% da biomassa acima do solo (SCHUMACHER; HOPPE, 1997). Neste trabalho, a quantidade de madeira foi de 75,2%, similar à encontrada por Oki (2002), 74,5%; e por Witschoreck (2008), 72,2%.

4.2 Estoque de nutrientes

A concentração média dos macronutrientes na biomassa apresentou grande diferença entre os componentes estruturais (madeira e galhos) e os metabólicos (acículas e raízes) das árvores (Tabela 9). Todavia a ordem de importância de cada componente, quanto à concentração dos elementos, não foi muito variável. A acícula foi o componente com maior concentração de N, K e P; o galho vivo, do Ca e a raiz grossa, do Mg e do S.

Tabela 9 - Concentração média e desvio padrão de macronutrientes contidos nos diferentes componentes de *Pinus taeda* aos 16 anos de idade

Componente	N	P	K	Ca	Mg	S
Acícula	16,9 (2,8)	1,1 (0,3)	4,1 (0,9)	1,8 (1,2)	0,6 (0,3)	1,0 (0,4)
Galho Vivo	3,6 (0,01)	0,2 (0,01)	1,0 (0,01)	2,3 (0,01)	0,3 (0,01)	0,2 (0,01)
Galho Morto	3,1 (0,82)	0,1 (0,09)	0,6 (0,59)	1,6 (0,52)	0,4 (0,07)	0,4 (0,10)
Casca	2,9 (0,17)	0,1 (0,04)	0,6 (0,19)	1,2 (0,65)	0,2 (0,10)	0,4 (0,01)
Madeira	1,1 (0,08)	0,2 (0,07)	0,4 (0,14)	0,5 (0,12)	0,2 (0,03)	0,3 (0,05)
Raiz Fina (< 3 mm)	6,7 (0,64)	0,2 (0,06)	1,0 (0,33)	2,3 (0,24)	0,6 (0,14)	0,9 (0,10)
Raiz Grossa (> 3 mm)	7,6 (0,91)	0,3 (0,06)	1,3 (0,36)	1,3 (0,89)	0,8 (0,16)	1,2 (0,26)
Serapilheira A ¹	8,9 (5,03)	0,3 (0,13)	0,4 (0,21)	1,8 (0,55)	0,4 (0,12)	0,8 (0,37)
Serapilheira B ²	9,8 (5,17)	0,4 (0,10)	0,3 (0,12)	1,4 (0,95)	0,3 (0,12)	1,0 (0,25)
Serapilheira C ³	12,0 (5,18)	0,5 (0,06)	0,3 (0,13)	0,6 (0,66)	0,3 (0,14)	1,3 (0,18)
Serapilheira total	10,3	0,4	0,3	1,3	0,4	1,0

⁽¹⁾ Serapilheira não decomposta; ⁽²⁾ serapilheira pouco decomposta e ⁽³⁾ serapilheira muito decomposta.

A madeira foi o componente com menor importância no que diz respeito à concentração de nutrientes. O elemento Ca, constituinte da parede celular, e o elemento N, presente nos compostos orgânicos essenciais, como as proteínas e os ácidos nucleicos, foram os elementos que mais se destacaram. O N é um nutriente de elevada importância, devido às funções fisiológicas exercidas, sendo altamente móvel no interior das plantas, translocando-se para as regiões de maior atividade fisiológica (folhas). Essa característica, portanto, indica sua baixa concentração na madeira (TAIZ; ZEIGER, 2009).

Excetuando-se a acícula, a serapilheira foi o componente com maior concentração de nutrientes, sobretudo na camada C, devido a . O N e o Ca destacaram-se, sobretudo devido à grande participação do componente acícula presente na serapilheira. Para alguns nutrientes, como N, P, K e S, a camada em estágio mais avançado de decomposição (C) apresentou maior concentração desses elementos, observando-se o aumento das camadas menos decompostas (A) para as mais decompostas (C). Na camada recém-depositada (A), destacaram-se os elementos Ca e Mg. Trevisan (1992) e Valeri (1988), estudando *P. taeda*, e Reissmann (1983), *P. elliottii*, observaram o aumento da concentração de N e P em camadas mais decompostas. Esse acréscimo pode ligar-se a diversos fatores, como à precipitação e à imobilização por microorganismos (REISSMANN, 1981 apud

REISSMANN,1987); à presença de fungos; às altas taxas de mineralização do material; à perda de CO₂ (REISSMANN; RODERJAN; KUNIYOSHI, 1982) e à presença maciça de raízes finas (TREVISAN, 1992). Reissmann, 1981 apud Reissmann (1987), observou que o Mg se diluiu nas camadas mais decompostas da serapilheira depositada, atribuindo esse efeito à lixiviação. Quanto ao Ca, o autor observou pouca diferença em camadas mais decompostas. Valeri (1988), estudando os horizontes orgânicos sob povoamento de *Pinus taeda*, observou maior aumento nas concentrações de N, P, Fe e Zn, quanto maior foi o grau de decomposição da serapilheira. Entretanto, assim como observado neste trabalho, verificou o decréscimo na concentração dos elementos Ca e Mg e tendência não definida para K.

Embora se tenha observado a grande contribuição relativa dos componentes arbóreos e da serapilheira, notadamente para elementos como N, P e S, e as baixas concentrações desses elementos na madeira, o balanço nutricional baseia-se no estoque de nutrientes do sistema florestal. Dessa forma, somente a análise conjunta, entre a concentração de nutrientes dos componentes florestais e o conteúdo em biomassa dos mesmos, poderá esclarecer a contribuição de cada componente para a sustentabilidade do sistema florestal. O resultado dessa análise conjunta é expresso no estoque de nutrientes dos componentes florestais. Nesse sentido, o componente florestal que, em média, mais estocou nutrientes foi a raiz total (Tabela 10). Fatores como a relativa contribuição em biomassa (17%), associados à alta concentração de nutrientes, como o N, Ca e Mg, contribuíram para esse efeito. Tais resultados são coerentes com os encontrados por Caldato (2011) que, embora também observasse maior produção de biomassa da madeira, verificou que a alta concentração de N, Ca e Mg na raiz também contribuiu, significativamente, para produzir esse efeito. A madeira destacou-se dos demais componentes, devido à sua contribuição relativa em biomassa (75% da biomassa acima do solo). Somente esse componente estoca 41% do N, 71% do P, 60% do K, 54% do Ca, 61% do Mg e 70% do S dos nutrientes acima do solo.

Tabela 10 - Estoque médio e desvio padrão de macronutrientes contidos nos diferentes componentes da biomassa e na serapilheira de *Pinus taeda* aos 16 anos de idade

Componente	N		P		K		Ca		Mg		S	
	kg ha ⁻¹											
Acícula	116,0	(14,7)	6,9	(0,8)	27,3	(3,2)	14,7	(3,0)	3,5	(0,4)	6,3	(0,8)
Galho Vivo	39,0	(4,65)	2,0	(0,2)	10,8	(1,3)	24,6	(2,9)	2,9	(0,3)	2,2	(0,2)
Galho Morto	69,8	(8,5)	1,3	(0,1)	3,2	(0,3)	16,1	(1,8)	7,8	(0,8)	8,4	(1,1)
Copa	224,9	(27,8)	10,2	(1,1)	41,4	(4,9)	55,4	(7,6)	14,3	(1,6)	17,1	(2,2)
Casca	71,9	(5,7)	3,0	(0,3)	15,8	(1,3)	20,8	(2,3)	5,1	(0,6)	10,2	(0,7)
Madeira	210,4	(16,5)	32,6	(5,6)	85,2	(11,6)	91,0	(6,5)	31,2	(2,8)	64,9	(5,2)
Casca + Madeira	282,3	(22,2)	35,72	(5,9)	101,0	(12,8)	111,9	(8,5)	36,4	(3,4)	75,2	(5,9)
Biomassa acima do solo	507,2	(49,8)	45,9	(7,0)	142,4	(17,6)	167,3	(16,0)	50,8	(5,0)	92,3	(8,1)
Raiz Fina (< 3 mm)	3,7	(0,2)	0,1	(0,0)	0,6	(0,1)	0,5	(0,1)	0,3	(0,1)	0,5	(0,1)
Raiz Grossa (> 3 mm)	361,2	(32,0)	10,2	(1,1)	53,4	(4,3)	129,0	(16,6)	29,6	(2,1)	48,2	(4,2)
Raiz total	364,9	(31,9)	10,3	(1,1)	54,1	(4,3)	129,5	(16,6)	30,0	(2,1)	48,8	(4,2)
Biomassa Arbórea	872,2	(81,7)	56,3	(8,2)	196,6	(21,9)	296,9	(32,2)	80,8	(7,1)	141,1	(12,4)
Serapilheira A	40,1	(14,2)	1,4	(0,6)	1,6	(1,8)	8,2	(3,8)	2,0	(0,9)	3,7	(1,7)
Serapilheira B	82,2	(27,0)	3,2	(1,1)	2,3	(1,1)	8,3	(6,1)	2,3	(0,8)	7,9	(2,6)
Serapilheira C	177,3	(45,3)	7,0	(1,8)	4,5	(1,1)	10,6	(7,1)	4,9	(1,8)	19,1	(3,8)
Serapilheira Total	299,7	(52,4)	11,6	(2,0)	8,6	(2,7)	27,2	(11,6)	9,3	(2,8)	30,7	(3,9)
Biomassa Total	1171,9		68,0		205,2		324,1		90,1		171,9	

Excetuando-se a raiz total e a madeira, a acícula foi o componente que mais estocou nutrientes. Embora apresente pouca contribuição relativa, em termos de biomassa estocada acima do solo (3%), sua contribuição para estocar nutrientes é notável, devido às altas concentrações dos elementos químicos nas folhas. Somente esse componente foi responsável por mais de 50% dos nutrientes da copa, embora represente apenas 18%, em termos de biomassa. Ainda que os componentes mais representativos em biomassa, como a madeira e as raízes, apresentem maiores estoques de nutrientes, houve inexistência de proporcionalidade entre a biomassa do componente e a distribuição de nutrientes na floresta. Isso decorreu da diferença da concentração de nutrientes nos diversos componentes da árvore, como também constatado por Bizon (2005), que trabalhou com o mesmo tipo de solo. Tomando-se, por exemplo, o conteúdo total de N na biomassa aérea, 31% foi encontrado na raiz, 26% na serapilheira, 18% na madeira, 13% nas acículas, 9% no galho e 6% na casca. Assim, enquanto a copa representa cerca de 15% da biomassa acima do solo, esse componente estocou cerca de 22% do N total. As quantidades relativas de nutrientes acumuladas nesses componentes foram semelhantes às encontradas por Witschoreck (2008).

A importância, em armazenamento, dos macronutrientes nos componentes da biomassa arbórea apresentou a seguinte ordem: raiz total > madeira > acícula > casca > galhos mortos > galhos vivos. Quanto à magnitude de armazenamento dos elementos, a ordem foi a seguinte: N > Ca > K > S > Mg > P, a mesma obtida por Moro (2008), Witschoreck (2008) e Bizon (2005) em *Pinus taeda*.

A serapilheira mostrou-se o componente da biomassa aérea com grande acúmulo de nutrientes, notadamente o N, o P e o S. De fato, a serapilheira melhora as propriedades químicas e físicas do solo pela incorporação de matéria orgânica e pelo desenvolvimento das raízes, regendo o crescimento radicular e o fornecimento de nutrientes às plantas (TONINI, 2000). Reissmann e Wisnewski (2000) comentaram que a própria dificuldade da decomposição da serapilheira em plantações de *P. taeda* permite o acúmulo de grandes quantidades de nutrientes, principalmente de N, P e Ca. Analisando-se os dados da distribuição relativa dos nutrientes no povoamento florestal, observou-se a grande importância da serapilheira para a sustentabilidade nutricional das florestas plantadas (Figura 14). Embora represente apenas 8% da biomassa total do sistema, esse compartimento abriga 25% do N, 17% do P, 4% do K, 8% do Ca, 10% do Mg e 18% do S.

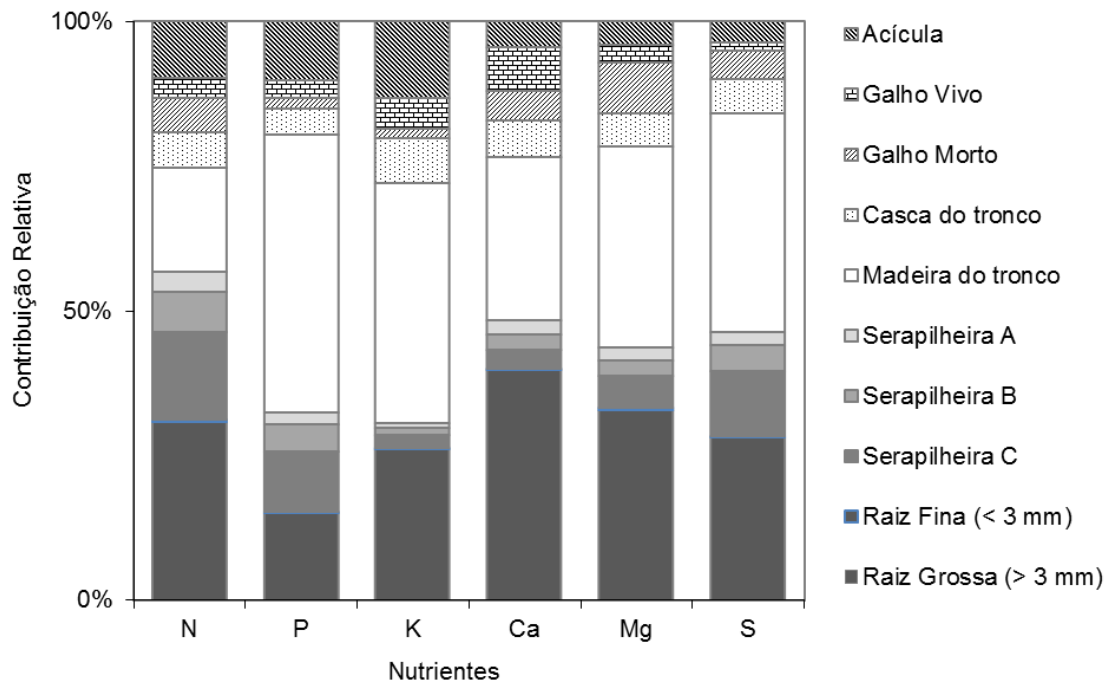


Figura 14 - Distribuição relativa dos nutrientes estocados nos componentes florestais e da serapilheira em plantação de *P. taeda* aos 16 anos de idade

4.3 Ciclagem de nutrientes

A deposição média mensal de serapilheira foi de $0,72 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Figura 15), sendo, no ano, a deposição acumulada de $8,6 \text{ Mg ha}^{-1}$. Os valores encontrados são similares aos observados por Koehler (1989), que associou a deposição de serapilheira em plantações de *Pinus taeda* com 15 anos de idade, na região de Ponta Grossa-PR, a três classes de produtividade. A deposição média anual no sítio superior foi de $8,7 \text{ Mg ha}^{-1}$, no sítio médio, de $8,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ e no sítio inferior, de $6,5 \text{ Mg ha}^{-1}$. Poggiani (1985) encontrou deposição média anual de $7,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ em *Pinus oocarpa* e de $8,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ em *Pinus caribaea var. hondunensis*.

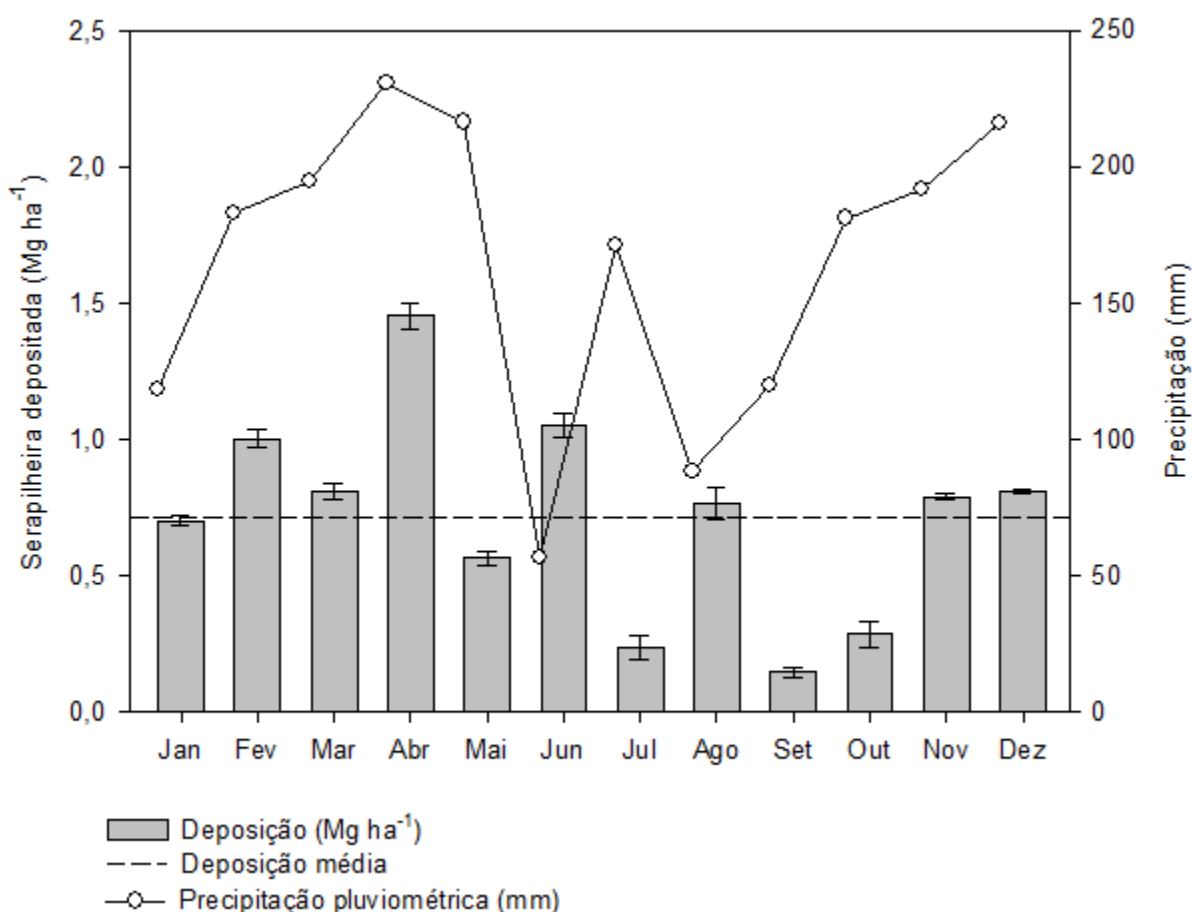


Figura 15 - Deposição mensal de serapilheira em povoamento de *P. taeda* aos 16 anos de idade

As maiores deposições de serapilheira ocorreram nos meses mais secos, junho e agosto. A variação estacional da deposição da serapilheira ocorreu da seguinte forma: outono>verão>primavera >inverno. Viera e Shumacher (2010) e

Koehler (1989), estudando *P. taeda*, encontraram a mesma sequência. Não houve correlação entre a serapilheira depositada e o índice pluviométrico. Viera e Shumacher (2010), em três anos seguidos de estudos em plantações de *P. taeda*, também não encontraram correlação significativa entre essas variáveis, bem como com a temperatura. Foi significativa apenas para umidade relativa do ar. Koehler (1989) também não encontrou correlações entre a deposição das acículas e a precipitação pluviométrica ou a temperatura. Segundo Viera e Shumacher (2010), os picos de deposição podem relacionar-se a fatores climáticos extremos, como ventos fortes e períodos de alta umidade, que ocasionariam acelerado processo de perda da folhagem senescente pelas plantas. Diversos estudos relacionam maiores deposições de serapilheira a períodos mais secos do ano (MOREIRA; SILVA, 2004; FERREIRA et al., 2007; MOCHIUTTI et al., 2006).

Os resultados do coeficiente de decomposição da serapilheira foi baixo para plantações de *Pinus* spp., $K = 0,30$, demonstrando que o tempo médio de renovação da serapilheira foi alto, $1/K = 3,2$ anos. Do mesmo modo, a decomposição de 50% e 95% foram altos, $t_{0,5} = 2,2$ e $t_{0,05} = 9,7$ anos. Os valores obtidos são coerentes com os observados por Poggiani (1985), que encontrou um valor $K = 0,37$ para *P. oocarpa* e $K = 0,41$ para *P. caribea* var. *hondurensis*, com o tempo médio de renovação da serapilheira de 2,4 anos e 2,7 anos, respectivamente.

Analisando-se a relação entre os dados da concentração de nutrientes e os meses de coleta (Tabela 11), observou-se não haver influência da precipitação pluviométrica sobre a concentração de nutrientes amostrada. Do mesmo modo, Koehler (1989) não observou correlação entre a concentração de nutrientes na serapilheira depositada e as estações do ano, em plantio de *P. taeda* com 15 anos de idade. No entanto Viera e Schumacher (2010) avaliaram a concentração de nutrientes na serapilheira depositada em plantações de *P. taeda* entre o 5º e o 7º ano de idade, observando correlação entre a concentração média de nutrientes e o índice pluviométrico do período, notadamente para N e K. Não obstante Miller (1981) relata que a quantidade e a distribuição da precipitação pluviométrica são, de fato, importantes, uma vez que o K, o Ca, o Mg e o Mn podem ser lixiviados das copas pela água da chuva, diminuindo, assim, a concentração desses nutrientes.

Tabela 11- Concentração média de macronutrientes na serapilheira depositada em povoamento de *P. taeda* aos 16 anos de idade

Mês de coleta	N	P	K	Ca	Mg	S	g Kg ⁻¹						
Janeiro	9,04	0,65	0,90	1,98	0,40	0,51							
Fevereiro	10,42	0,76	0,80	2,17	0,40	0,57							
Março	8,48	0,58	0,80	1,66	0,34	0,51							
Abril	9,46	0,76	1,00	1,87	0,34	0,56							
Mai	8,57	0,71	0,70	1,79	0,32	0,50							
Junho	9,32	0,68	0,80	1,92	0,33	0,58							
Julho	9,86	0,69	0,80	1,93	0,35	0,58							
Agosto	11,12	0,72	0,70	1,93	0,36	0,59							
Setembro	10,89	0,96	0,90	1,91	0,40	0,64							
Outubro	11,73	1,09	1,50	1,82	0,47	0,61							
Novembro	11,54	0,94	1,00	2,39	0,44	0,63							
Dezembro	10,67	0,89	1,10	2,01	0,45	0,61							
\bar{x}	10,09	0,79	0,92	1,95	0,38	0,57							
s	1,13	0,15	0,22	0,19	0,05	0,05							

Quanto ao aporte de macronutrientes, devido à queda de serapilheira (Tabela 12), observou-se que as quantidades depositadas se relacionaram, diretamente, à quantidade de biomassa da serapilheira depositada. Assim, seguindo a sazonalidade da deposição de serapilheira, no período do outono, houve o maior aporte, seguido, em ordem decrescente, por verão, primavera e inverno. As maiores quantidades depositadas foram de N e Ca. Haag (1985); Koehler (1989) e Welter et al. (2010) encontraram resultados parecidos.

Tabela 12- Aporte de macronutrientes via deposição de serapilheira de *Pinus taeda* aos 16 anos de idade

Mês de coleta	N	P	K	Ca	Mg	S	Total	kg ha ano ⁻¹						
Janeiro	7,1	0,6	0,6	1,4	0,3	0,4	10,3							
Fevereiro	10,1	0,8	0,9	2,0	0,4	0,6	14,8							
Março	8,2	0,6	0,7	1,6	0,3	0,5	12,0							
Abril	14,7	1,1	1,3	2,8	0,6	0,8	21,4							
Mai	5,7	0,4	0,5	1,1	0,2	0,3	8,3							
Junho	10,6	0,8	1,0	2,0	0,4	0,6	15,5							
Julho	2,4	0,2	0,2	0,5	0,1	0,1	3,5							
Agosto	7,8	0,6	0,7	1,5	0,3	0,4	11,3							
Setembro	1,5	0,1	0,1	0,3	0,1	0,1	2,2							
Outubro	2,9	0,2	0,3	0,6	0,1	0,2	4,2							
Novembro	8,0	0,6	0,7	1,5	0,3	0,5	11,6							
Dezembro	8,2	0,6	0,7	1,6	0,3	0,5	11,9							
\bar{x}	7,3	0,6	0,7	1,4	0,3	0,4	10,6							
s	3,8	0,3	0,3	0,7	0,1	0,2	-							
Total	87,2	6,8	7,9	16,8	3,3	5,0	127,0							

Considerando-se a alta produtividade do *P. taeda* na região de estudo, constatou-se que as ciclagens biogeoquímica e bioquímica de nutrientes constituíram importantes mecanismos das árvores para obter nutrientes (Tabela 13). As quantidades de nutrientes retranslocados foram mais intensas para os elementos N, P, Mg e S, e menos, para o K. Viera e Schumacher (2009) estimaram a retranslocação de nutrientes em acículas de *P. taeda* com 7 anos de idade, como 74,9% do N; 86,1% do P; 91,0% do K; 58,0% do Mg e 66,2% do S. Switzer e Nelson (1972), estudando plantações de *Pinus taeda* com 20 anos de idade, estimaram que 39% do N, 60% do P, 22% do K, 24% do Mg foram obtidos por meio da retranslocação interna de nutrientes.

A ciclagem biogeoquímica foi mais intensa para os nutrientes P, K, Ca, indicando maior mineralização desses elementos na serapilheira. Para os nutrientes N e Mg, observou-se baixa ciclagem biogeoquímica, o que indica que tais elementos tenderiam a acumular-se na serapilheira. A importância relativa da entrada de nutrientes, via deposição de serapilheira, foi mais significativa para os elementos N, P e Ca, embora se deva fazer a ressalva de que não foram consideradas as entradas devidas às quedas de galhos, cascas e frutos, nem as entradas devidas à precipitação interna. Entretanto demonstrou-se que o mecanismo de deposição da serapilheira é de suma importância para o suprimento de nutrientes às árvores, como também constatou Poggiani (1985). Como exemplo, o *P. taeda* reteve 34% do P e devolveu 66%.

Tabela 13 - Quantidades de nutrientes absorvidas, acumuladas e depositadas via serapilheira, e contribuição relativa das ciclagens biogeoquímica e bioquímica em relação as quantidades de nutrientes absorvidas pelas árvores no povoamento de *P. taeda* aos 16 anos de idade

Nutriente	Quantidade						Ciclagem	
	Absorvida		Acumulada		Depositada		Biogeoquímica ⁽¹⁾	Bioquímica
	kg ha ⁻¹ (%)		kg ha ⁻¹ (%)		kg ha ⁻¹ (%)		%	
N	141,7	(100)	54,5	(38)	87,2	(62)	2	56
P	10,3	(100)	3,5	(34)	6,8	(66)	-50	69
K	20,2	(100)	12,3	(61)	7,9	(39)	-65	21
Ca	35,4	(100)	18,6	(52)	16,8	(48)	-35	-
Mg	8,4	(100)	5,1	(60)	3,3	(40)	-6	57
S	13,8	(100)	8,8	(64)	4,9	(36)	81	54

⁽¹⁾ Valores positivos indicam baixa ciclagem biogeoquímica e tendência dos elementos a acumular-se na serapilheira; valores negativos, que ocorreu alta ciclagem dos nutrientes, devido à sua intensa mineralização.

Segundo Zaia e Gama-Rodrigues (2004), espécies com maior eficiência de ciclagem bioquímica gerariam serapilheira de baixa qualidade, resultando em baixas taxas de decomposição e mineralização de nutrientes. De fato, os resultados do coeficiente K sugeriram maior tempo de decomposição da serapilheira.

4.4 Mineralogia do solo e liberação de nutrientes

Os difratogramas das frações silte e areia, até a camada de 60-100 cm, apresentaram similaridade na composição mineralógica, indicando somente a presença do mineral quartzo (Figura 16). A partir da camada 100-140 cm, observaram-se traços do mineral caulinita, presente somente na fração silte (Figura 17), permanecendo o predomínio do quartzo em todo o perfil. Assim, os minerais facilmente decomponíveis não foram encontrados na fração areia. Em Cambissolos, o quartzo é o mineral mais abundante nas frações areia e silte, os quais resistiram aos processos de alteração e pedogênese (SANTOS-PINTO, 2007). Potter e Kämpf (1981), estudando a mineralogia de um Cambissolo Húmico, observaram a predominância da caulinita, além da presença do quartzo, filossilicato 2:1 e gibbsita, na fração areia, e da presença de cristobalita, na fração silte.

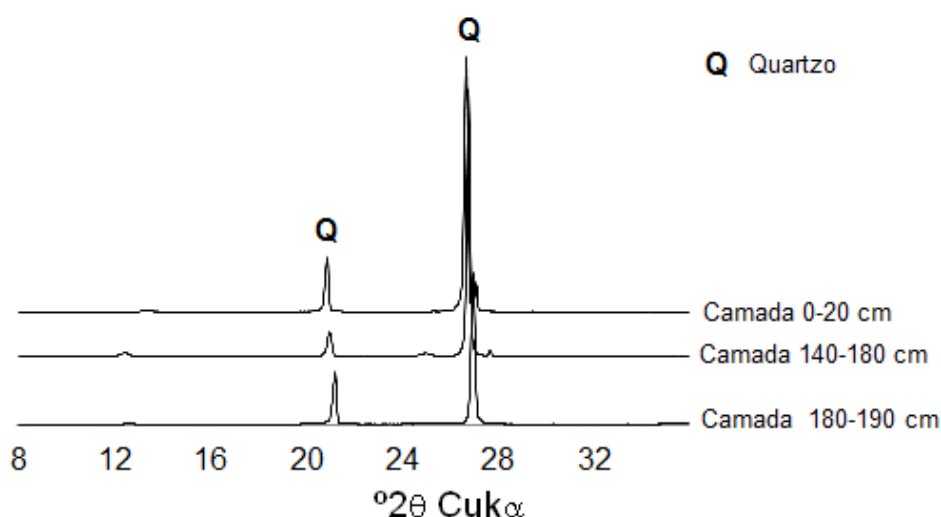


Figura 16 - Difratograma de raios-x da fração areia do Cambissolo Húmico aluminic léptico

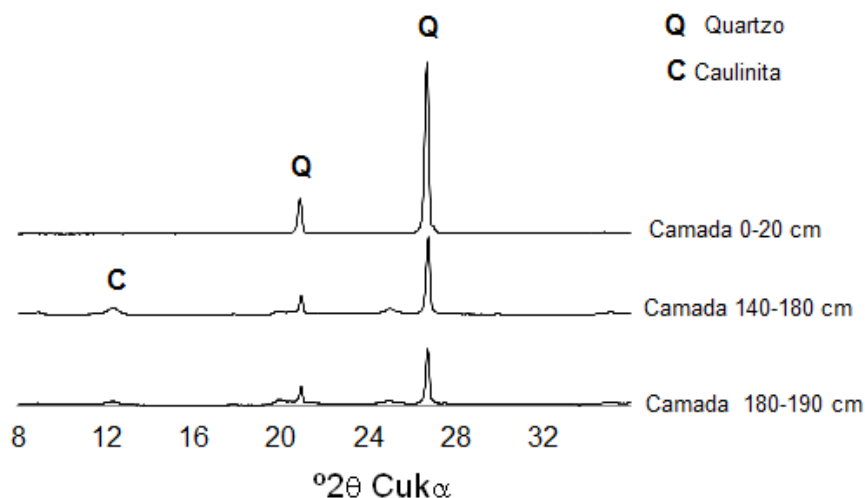


Figura 17 - Difratoograma de raios-x da fração silte do Cambissole Húmico aluminico léptico

Na fração argila, camada de 0-20 cm, a difratometria indicou pequenas frações de vermiculita, pico a 13,54 Å, nos tratamentos K⁺ 25 °C, Mg e etilenoglicol (EG) e abundância de quartzo, picos a 4,32 Å e 3,41 Å. Nesta fração, também se identificou a presença da caulinita, um mineral silicatado bastante intemperizado, de natureza secundária, picos a 7,15 Å e a 3,64 Å, nos tratamentos K 25 °C, K 300 °C, Mg e etilenoglicol (EG) (Figura 18). O desaparecimento do reflexo a 500 °C confirma a caulinita. Os resultados observados indicaram que esse solo contém minerais relacionados a certo grau de evolução pedogenética. Cambissolos são geralmente solos pouco evoluídos, com chance de possuir reserva de nutrientes na fração silte e também na fração areia. Entretanto o fato depende do material de origem: materiais de origem sedimentar mecânicos, como os identificados neste perfil, geralmente são pobres em minerais primários intemperáveis.

A presença da caulinita indica uma dessilicação intensa, com tendência à alitização (processo de formação de óxidos e hidróxidos de Al). No processo de dessilicação e lixiviação, com alta concentração de íons H⁺ e baixa concentração de bases, há decomposição dos alumino-silicatos do material de origem, com remoção do Ca, Mg, Na e K da zona do intemperismo (ANTONELLO et al., 2002). De fato, esse argilomineral é o mais comum nos solos brasileiros, favorecido pela ocorrência de clima quente e úmido. Além disso, outros fatores, como a remoção de cátions básicos e de sílica, diversos materiais de origem e vegetação nativa variável são as

principais condições que favorecem a ocorrência do argilomineral (KAMPF; CURI; MARQUES, 2009).

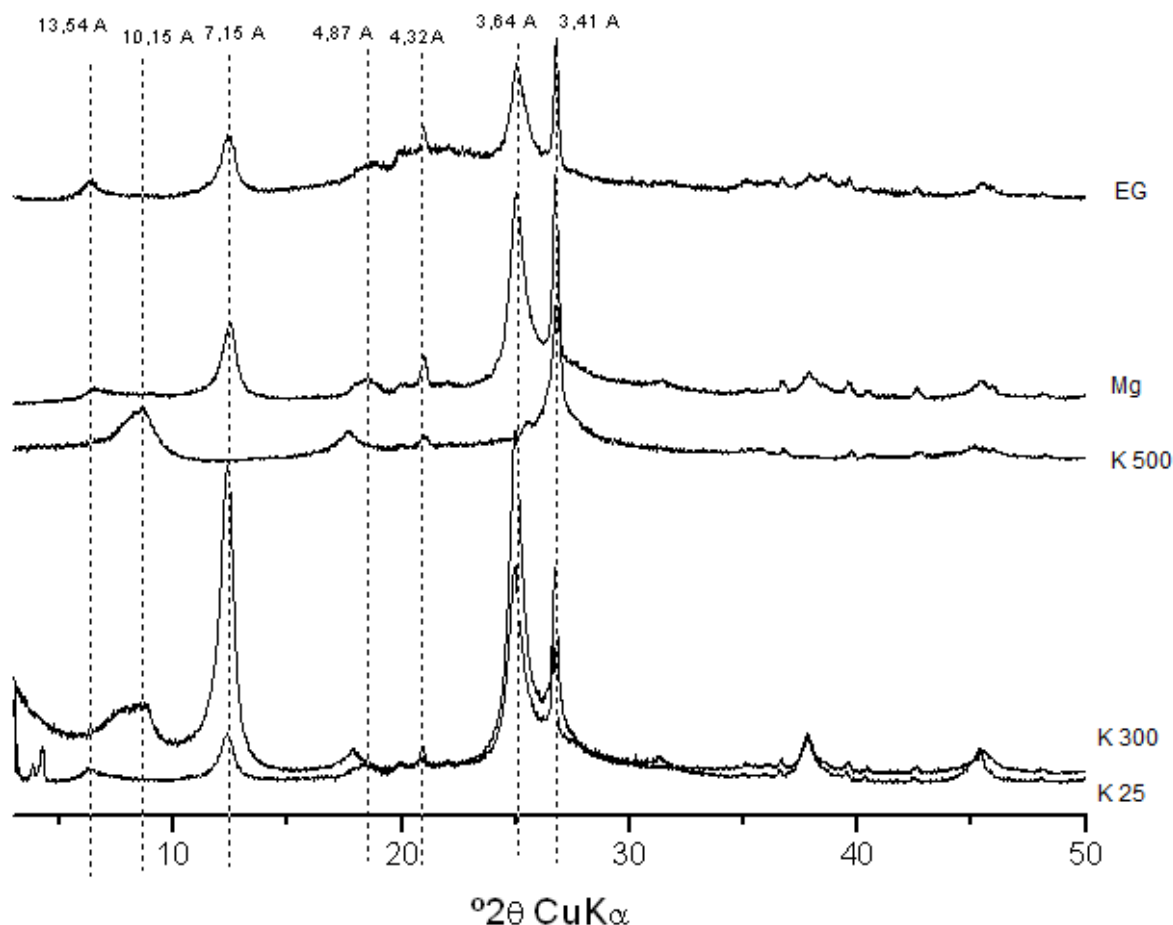


Figura 18 - Sequência de difratogramas de amostras orientadas da fração argila da camada 0-20 cm. Difratogramas das amostras saturadas com K (tratamentos térmicos a 25°C, 300°C e 500°C), amostra saturada com Mg e solvatada com etilenoglicol (EG)

A exemplo da camada de 0-20 cm, o comportamento, observado na figura 19, manteve-se nas camadas 20-40 cm, 40-60 cm, 60-100 cm e 100-140 cm do solo. Na camada mais profunda, há a presença de um pico, a 1,00 nm, que não se colapsa nos tratamentos com K^+ a 300 °C e 500 °C, assim como nos tratamentos com Mg e Mg com etilenoglicol. Isso indica a presença de ilita, picos a 9,59 Å, a 4,98 Å e a 3,40 Å, na região mais próxima do material de origem, provavelmente derivada da alteração físico-química da vermiculita das frações mais grossas (Figuras 19 e 20). Dessa forma, os difratogramas apontam a existência de pequenas quantidades de filossilicatos 2:1 ao longo do perfil, com sutil mudança em sua composição, à medida que se aproxima da superfície do solo.

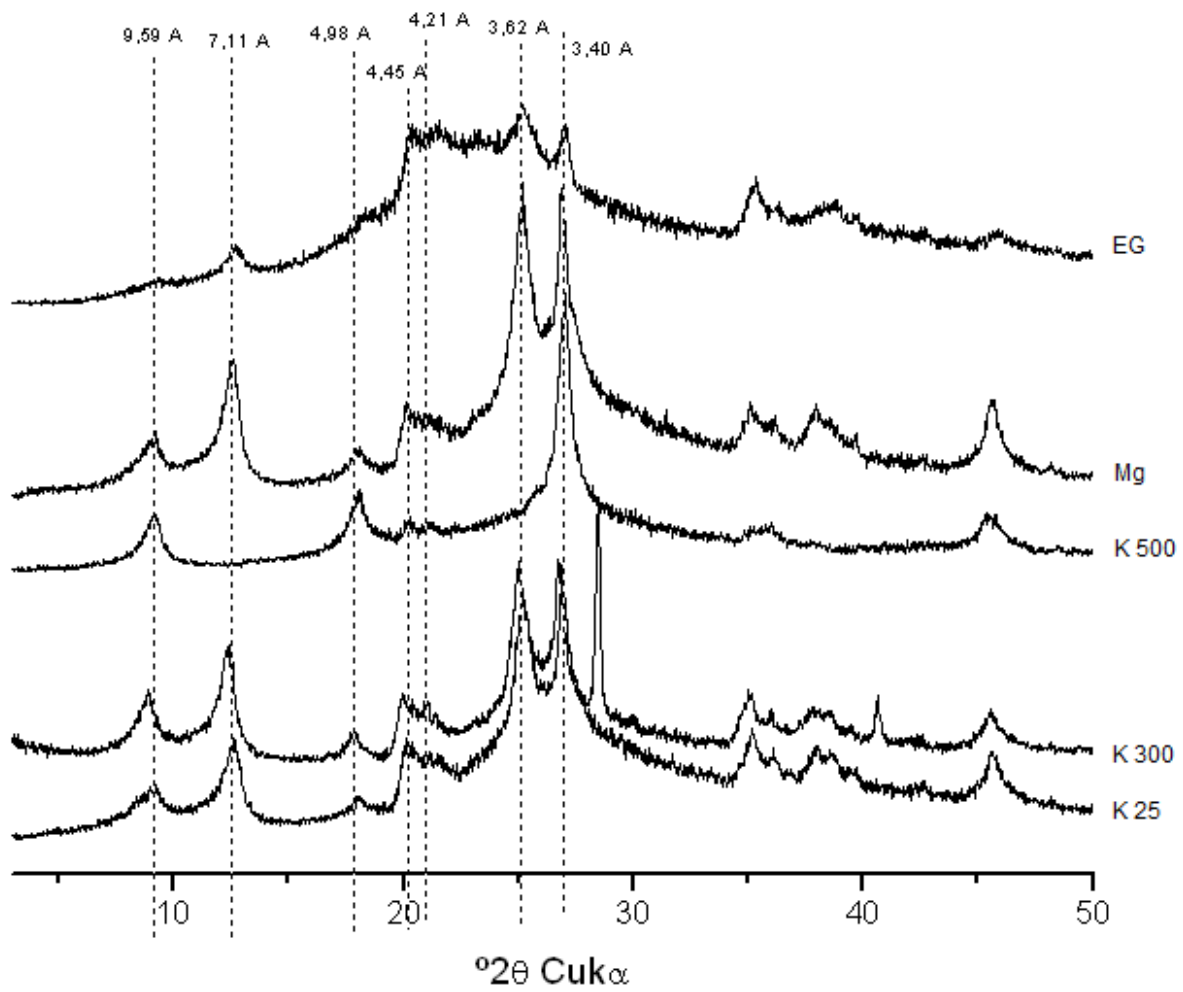


Figura 19 - Sequência de difratogramas de amostras orientadas da fração argila da camada 140-180 cm. Difratogramas das amostras saturadas com K (tratamentos térmicos a 25°C, 300°C e 500°C), amostra saturada com Mg e solvatada com etilenoglicol (EG)

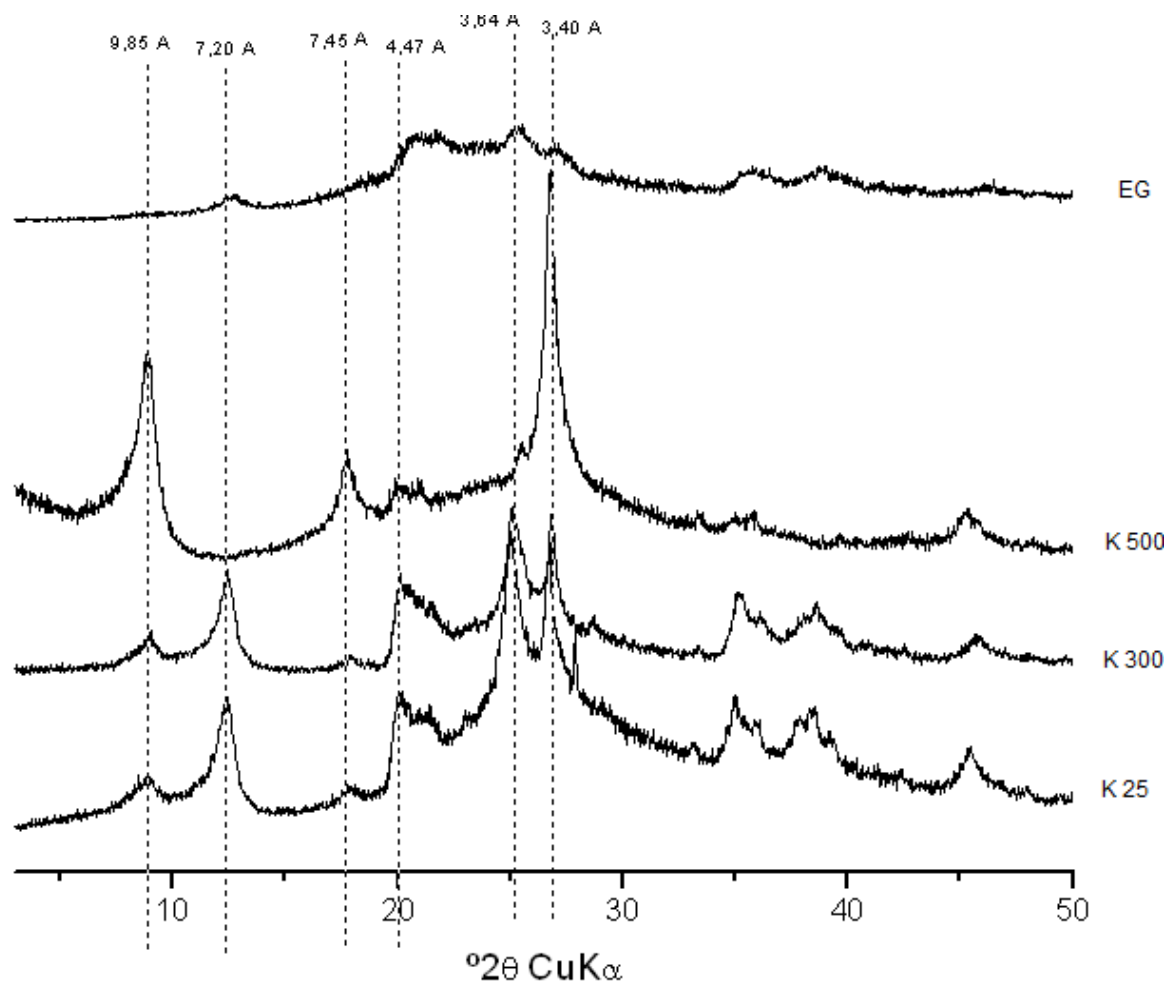


Figura 20 - Sequência de difratogramas de amostras orientadas da fração argila da camada 180-190 cm. Difratogramas das amostras saturadas com K (tratamentos térmicos a 25°C, 300°C e 500°C), amostra saturada com Mg e solvatada com etilenoglicol (EG)

A sequência de difratogramas das amostras orientadas de argila, saturadas com Mg, demonstram os deslocamentos dos picos de vermiculita, illita e caulinita, ao longo de todo o perfil do solo (Figura 21). Os deslocamentos dos picos da illita (9 a 10 Å), na direção de baixos ângulos 2θ , ocorrem na mesma proporção em que aparecem os picos na região de 13-14 Å, pertencentes a um filossilicato expansivo (provavelmente vermiculita). Isso demonstra que há, provavelmente, a transformação de illita (transformada de mica primária do material de origem) em vermiculita, que geralmente ocorre por meio da formação intermediária de um mineral interestratificado illita/vermiculita. A irracionalidade de espaçamentos entre os picos d_{001} e d_{002} , observada em todos os difratogramas da fração argila, constitui uma forte evidência dessa fase mineralógica no solo (MOORE; REYNOLDS, 1997).

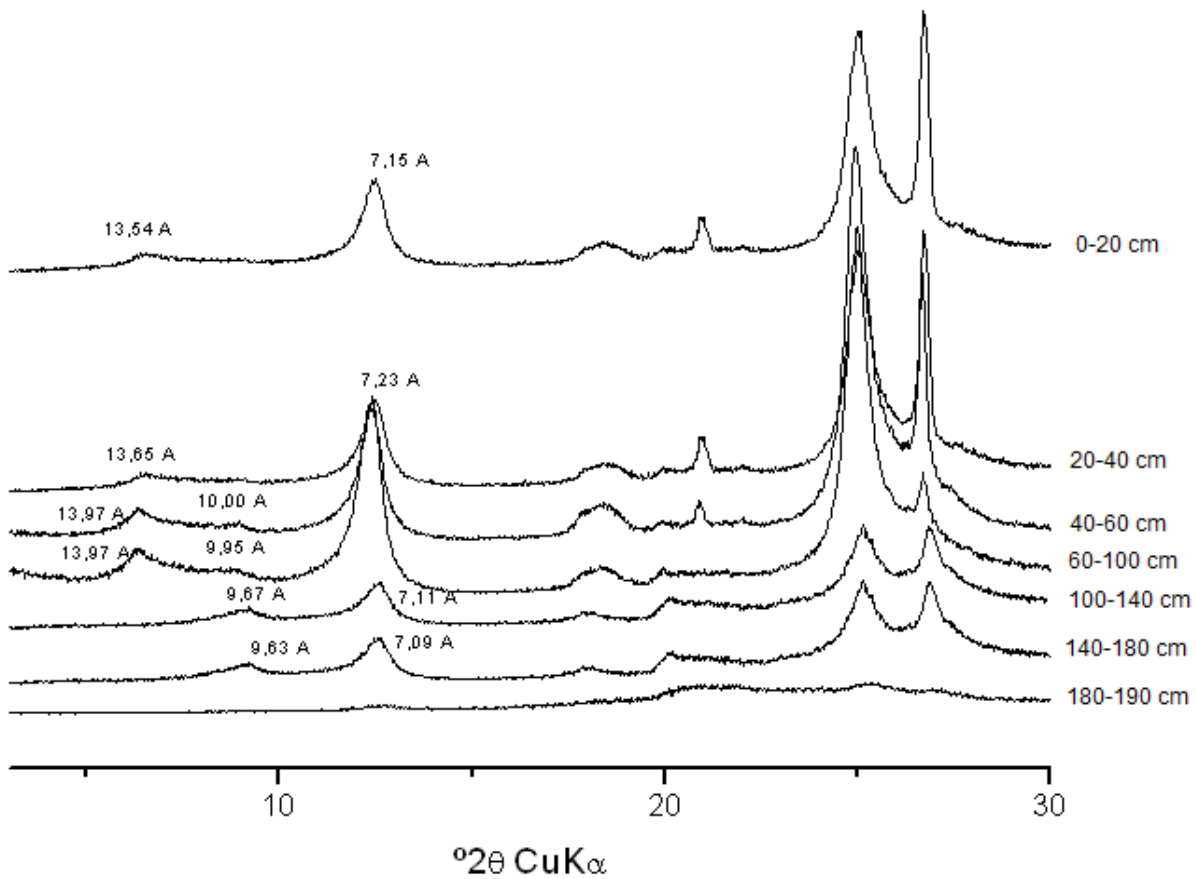
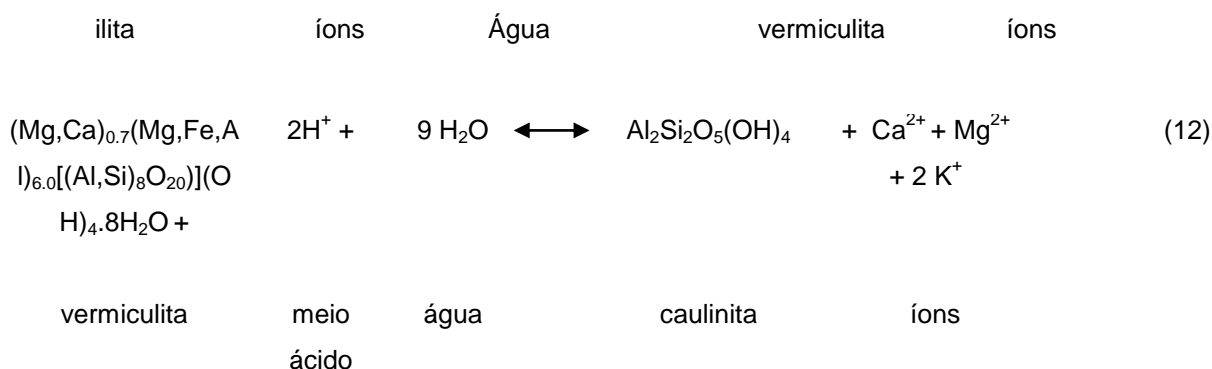
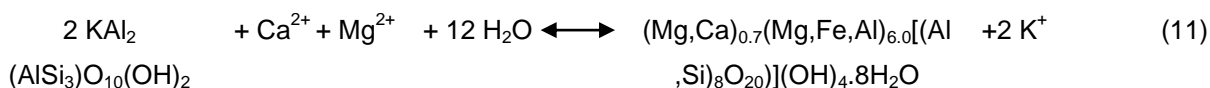


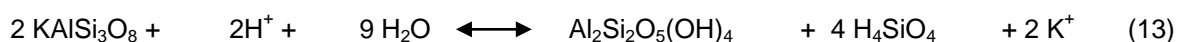
Figura 21 - Sequência de difratogramas das amostras orientadas de argila saturadas com Mg, demonstrando os deslocamentos dos picos de vermiculita, ilita e caulinita ao longo das diferentes camadas do perfil do solo

Essas transformações são importantes, no longo prazo, do ponto de vista da liberação de nutrientes (FANNING et al., 1989). A transformação ilita/vermiculita libera, principalmente, K à solução, por meio da abertura gradual das extremidades (bordas) do cristal e da saída do elemento da entre-camada do mineral, à medida que a carga na camada é reduzida (NORRISH, 1973). Por outro lado, cátions de maior raio iônico e de maior valência, como o Mg^{2+} e Ca^{2+} ocupam o complexo de troca na entre-camada, uma vez que ela se torna expansível, quando ocorre a diminuição da carga na camada. Nesse sentido, a vermiculita vai-se formando gradativamente, via interstratificado ilita em vermiculita (eq. 11). À medida que o intemperismo avança, os minerais 2:1 expansivos, como a vermiculita, perdem os cátions básicos da entre-camada (Ca^{2+} e Mg^{2+}) e sua estrutura 2:1 vai-se dissolvendo, em função das reações de intemperismo (como a hidrólise e as reações de oxirredução). Boa parte do Si perde-se em solução e a estrutura rearranja-se a partir do Si remanescente, do Al e de parte do Fe em solução,

formando a estrutura 1:1, classicamente observada na caulinita (eq. 12). Nesse processo, também pode ocorrer uma fase transitória, caracterizada como interestratificado caulinita 2:1 expansivo.



Um exemplo de intemperismo químico foi apresentado por Kampf, Curi, Marques (2009), no qual um mineral primário (feldspato microclino) é atacado por uma solução ácida, pois contém excesso de prótons (H⁺), provenientes de diversas fontes (H₂CO₃, ácidos orgânicos), resultando na formação da caulinita e de excedentes, que são removidos (eq. 13).



O feldspato é um mineral menos resistente que a vermiculita, desaparecendo primeiro no solo. O solo, como um sistema aberto, com contínua troca de energia e matéria, sofre intemperismo químico, resultante da ação da água, de O₂, CO₂, e de compostos orgânicos. Nesse processo, um mineral primário é atacado por uma solução ácida, resultando num mineral secundário e íons em solução (KAMPF; CURI; MARQUES, 2009).

As condições ambientais de alta umidade e baixa temperatura, do sítio onde se conduziu este estudo, permitiram a manutenção de elevadas concentrações de matéria orgânica no solo, favorecendo a complexação do Al e do Fe liberados

pelo intemperismo, limitando a formação de alguns óxidos, como a gibbsita e a hematita, principalmente, no horizonte A. Dessa maneira, a formação de compostos orgânicos do solo favorece a transformação dos minerais: primários → amorfos → haloisita → caulinita (POTTER; KÄMPF, 1981). Segundo Kämpf e Klamt (1978), esse processo resulta da mudança das condições climáticas desde o início da formação desses solos, em que a pedogênese teve seu início em clima mais seco e se encontra, atualmente, em clima mais úmido.

A fração argila é constituída, de maneira geral, por minerais de natureza secundária, originados dos processos de alteração física, química e biológica, seja de formação *in situ* (autóctone), ou transportada (alóctone) (FONTES, 2002). A definição desses tipos de formação, para cada solo, faz-se importante, na medida que permite a melhor compreensão dos produtos do intemperismo e da lixiviação dos solos. Nesse sentido, a razão entre os elementos Zr:Ti (Zircônio:Titânio) é utilizada como marcador de discontinuidades do perfil do solo, em razão do caráter mais inerte desses elementos, durante o processo de intemperismo. No perfil do solo estudado, essa razão apontou poucas variações (Figura 22), sugerindo o desenvolvimento autóctone do perfil, em que não há contribuição de material externo, ou evidência de alguma discontinuidade litológica.

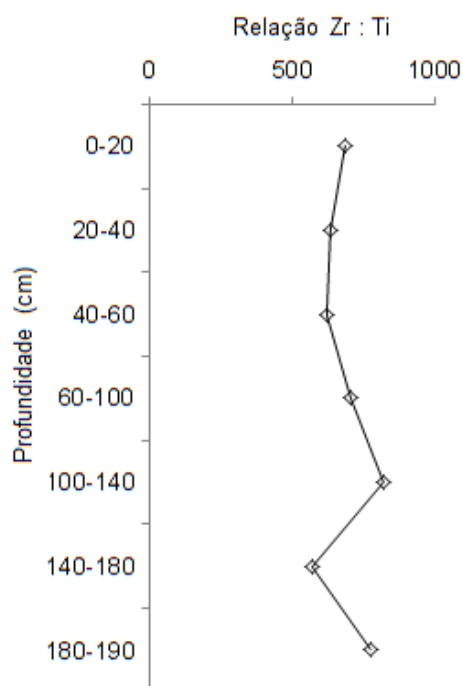


Figura 22 - Razão Zr:Ti para o perfil de um Cambissolo Húmico aluminico léptico

Os resultados mineralógicos apresentados foram importantes para elucidar o comportamento químico do solo. Analisando-se a composição química dos quatro minerais encontrados, pode-se observar que são quimicamente pobres (Tabela 14). Observa-se que, no processo de transformação da illita em vermiculita, ocorre a liberação de K, enquanto, no de transformação da vermiculita em caulinita, a liberação de Ca e Mg.

Tabela 14 - Fórmula química e composição de minerais primários e secundários

Mineral	Fórmula Química	Composição
Quarzo	SiO ₂	46,74 % Si; 53,26 % O
Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	39,5% Al ₂ O ₃ ; 46,5% SiO ₂ ; 14,0% H ₂ O
Vermiculita	(Mg,Ca) _{0,7} (Mg,Fe,Al) _{6,0} [(Al,Si) ₈ O ₂₀](OH) ₄ .8H ₂ O	4,39% MgO, 43,48% Al ₂ O ₃ , 12,82% e O, 11,92% SiO ₂ , 17,87% H ₂ O

Fonte: (MACHADO et al., 2001).

A composição química do solo, na forma de óxidos, apresentou predominância em ordem decrescente dos óxidos de Si, Al, Fe e Ti (Tabela 15). Em menores proporções observam-se em ordem decrescente os óxidos de K, Mg, P, Mn, Ca e Na. A menor concentração de potássio nas camadas superficiais do solo demonstram as perdas do elemento devido os processos de lixiviação.

Tabela 15 - Concentração dos óxidos nas camadas de solo amostradas obtidas por FRX

Profundidade	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Zr
cm	%										ppm
0-20	77,7	0,677	10,2	3,4	0,015	0,23	0,03	< 0,02	0,32	0,052	464
20-40	77,1	0,716	11,2	3,7	0,016	0,25	0,02	< 0,02	0,37	0,043	451
40-60	75,6	0,744	11,8	4,2	0,015	0,31	< 0,01	< 0,02	0,43	0,039	461
60-100	78,9	0,575	11,5	2,9	0,012	0,25	0,01	< 0,02	0,44	0,023	404
100-140	78,4	0,398	12,9	1,8	0,047	0,39	< 0,01	< 0,02	0,75	0,013	329
140-180	63,6	0,676	20,1	4,9	0,019	1,03	< 0,01	< 0,02	1,99	0,031	386
180-190	72,3	0,574	16,1	2,7	0,018	0,72	< 0,01	< 0,02	1,29	0,016	443

Vitousek (2004) salientou que o intemperismo do material de origem do solo permite que os nutrientes entrem no ciclo biogeoquímico, causando o aumento inicial na fertilidade da camada superficial do solo. No entanto as perdas de lixiviação de elementos do solo tornam-se, com o tempo, cada vez mais importantes,

resultando em diminuição da fertilidade. Nesse contexto, considerando que a qualidade do solo depende tanto de fatores inerentes ao mesmo, como da matéria orgânica, da textura e da mineralogia, e de fatores externos, como o clima, a hidrologia e a topografia (FOX, 2000), a análise conjunta, entre os resultados mineralógicos obtidos e o estoque de nutrientes no solo, pressupõe que o ciclo geoquímico de nutrientes das plantações de *P. taeda* tenha sido enriquecido, devido à entrada de nutrientes, via precipitação pluviométrica e deposições atmosféricas. A fertilidade atual do solo foi-se enriquecendo, durante muito tempo, por tais processos e, ao mesmo tempo, se foi mantendo pelos processos de ciclagem de nutrientes das florestas predominantes nessas regiões. Embora, no longo prazo, o intemperismo seja um processo importante na renovação do estoque de nutrientes do solo (FANNING et al., 1989), os resultados da mineralogia do Cambissolo húmico estudado permitem inferir que esse processo não tem mais importância significativa, exceto para o K e também para o Ca e Mg, mas no longo prazo. Dessa forma, no curto prazo, ou na escala de utilização de nutrientes do solo pelas florestas, a dependência da entrada de nutrientes, via precipitação pluviométrica e deposição atmosférica, torna-se muito maior (LIMA, 1985).

4.5 Concentração e estoque de nutrientes no solo

As concentrações de nutrientes encontradas mostraram-se adequadas para o correto desenvolvimento de *P. taeda* (REISSMANN et al., 1987), representando uma condição natural do solo, uma vez que não se realizou qualquer tipo de adubação (Tabela 16). Em todas as profundidades, o pH observado foi classificado como acidez muito alta ($\text{pH} \leq 4,3$) (TOMÉ JÚNIOR, 1997). Segundo Pedron (2007), a alta acidez do solo pode indicar intemperismo avançado. Rigatto, Dedecek e Mattos (2005), estudando plantações de *P. taeda* em Cambissolos e Latossolos, no estado do Paraná, também constataram valores de pH nessa classificação.

Tabela 16 - Atributos químicos do Cambissolo húmico alumínico léptico no povoamento de *Pinus taeda* aos 16 anos de idade

Atributo	Unidade	Profundidade (cm)						
		0-20	20-40	40-60	60-100	100-140	140-180	180-190
Densidade	g cm ⁻³	1,1	1,2	1,3	1,3	1,3	1,2	1,3
P ⁽¹⁾	mg dm ⁻³	3,7	2,8	2,5	2,0	1,2	1,8	1,1
M.O. ⁽²⁾	g dm ⁻³	30,3	27,2	14,9	5,8	3,9	2,4	3,2
pH em CaCl ₂	CaCl ₂	3,7	3,8	3,8	3,9	3,9	3,9	3,8
K ⁽³⁾	mmol _c dm ⁻³	0,8	0,5	0,5	0,5	1,3	2,0	1,7
Ca ⁽⁴⁾	mmol _c dm ⁻³	2,2	2,4	2,3	2,3	2,4	2,3	2,3
Mg ⁽⁴⁾	mmol _c dm ⁻³	1,8	1,7	1,6	1,6	1,6	1,7	1,6
H+Al	mmol _c dm ⁻³	234,0	234,0	234,0	180,0	240,0	321,5	305,0
Al	mmol _c dm ⁻³	115,3	118,1	107,5	126,9	131,9	164,3	120,2
SB	mmol _c dm ⁻³	4,8	4,6	4,4	4,4	5,2	6,0	5,6
T	mmol _c dm ⁻³	238,8	238,6	238,4	184,4	245,2	327,5	310,6
V	%	2,0	1,9	1,9	2,4	2,1	1,8	1,8
Sat. Al	%	96,0	96,2	96,0	96,6	96,2	96,5	95,6
S-SO ₄ ²⁻	mg dm ⁻³	18,1	14,9	19,1	14,2	4,4	3,5	3,6

Método: ⁽¹⁾ espectrofotometria em extrato nítrico-perclórico; ⁽²⁾ Dicromato de potássio e ácido sulfúrico; ⁽³⁾ espectrofotometria de chama; ⁽⁴⁾ espectrofotometria de absorção atômica.

Destaque maior é dado ao alto teor de matéria orgânica no solo, valor acima da classe alto (> 25 g dm⁻³) (TOMÉ JÚNIOR, 1997). De fato, na região de estudo, em função das condições climáticas, as baixas temperaturas e os altos índices pluviométricos condicionam um ambiente de baixa mineralização e de elevado acúmulo de matéria orgânica, sobretudo nas camadas superficiais do solo, situação similar à observada por Dalmolin et al. (2006) em Cambissolos Húmicos no Rio Grande do Sul. A textura argilosa desses solos favorece a formação de complexos organominerais, que contribuem para a proteção da matéria orgânica e para o acúmulo de carbono orgânico nos solos. Desse modo, a densidade do solo aumentou em maiores profundidades, devido ao menor teor de matéria orgânica nas camadas inferiores e à sua influência na porosidade do solo.

O maior teor de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo também influenciou a distribuição dos nutrientes no perfil dele, como se pôde observar para o P e o S-SO₄²⁻. Por outro lado, para os elementos Ca e Mg, suas concentrações foram indiferentes ao conteúdo de matéria orgânica, permanecendo praticamente a mesma concentração em todo o perfil do solo. Para o K, maiores concentrações foram encontrados nas camadas mais profundas, sugerindo o efeito do menor grau de intemperismo perto do material de origem.

Reissmann et al. (1987) consideram adequadas as concentrações de K, Ca e baixas para Mg, ao desenvolvimento de *P. taeda*. A razão entre as

concentrações de Ca:Mg não foi menor do que um, em nenhuma das camadas amostradas. Segundo McColl (1969), se a relação Ca:Mg trocáveis no solo for menor do que um, o Mg pode competir com o Ca, limitando o crescimento, devido à insuficiência de absorção de Ca.

Os níveis críticos de atributos químicos do solo, estudados por diversos autores (REISSMANN et al., 1987; JOKELA et al., 2004), constituem importantes referências para interpretar o risco de exaustão do solo. Ainda que os níveis nutricionais tenham satisfeito a atual produção, poderão não satisfazer as produções futuras, devido à extração de nutrientes pela colheita de madeira, pois a disponibilidade de nutrientes no solo constitui um dos principais fatores determinantes da produtividade do *Pinus taeda* (JOKELA et al., 2004), notadamente em plantações estabelecidas em Cambissolos (RIGATTO; DEDECEK; MATTOS, 2005).

Reissmann et al. (1987), estudando plantações de *P. taeda* com 15 anos de idade, em sítios florestais com diferentes níveis nutricionais, observaram que a concentração de P foi a que mais afetou a produtividade. Eles verificaram que a concentração de 2 mg dm⁻³ de P foi fortemente limitante ao crescimento.

Os estoques de nutrientes são apresentados na tabela 17. Destaca-se a grande diferença das concentrações de N nas camadas superficiais e subsuperficiais, ocasionada pela variação decrescente das concentrações de matéria orgânica em profundidade. O K e o Ca apresentaram tendência a maiores estoques em camadas mais profundas do solo.

Tabela 17 - Estoque de macronutrientes disponíveis em diferentes camadas do solo, no povoamento de *Pinus taeda* aos 16 anos de idade⁽¹⁾

Profundidade cm	N	P	K	Ca	Mg	S
	kg ha ⁻¹					
0-20	351,0 ²	7,3	61,8	89,6	43,4	36,3
20-40	315,0	5,6	41,2	96,4	40,8	29,7
40-60	173,0	4,9	36,0	93,6	38,9	38,1
60-100	134,8	8,0	82,4	182,4	78,7	56,7
100-140	90,6	4,9	195,6	190,4	75,4	17,6
140-180	54,8	7,2	308,9	181,6	81,6	14,0
180-190	18,7	1,1	66,9	45,2	19,1	3,6
Total	1138,0	39,1	792,8	879,2	377,9	196,1

⁽¹⁾o produto entre o volume de solo da camada, a concentração de nutrientes da camada e a densidade de solo obtidos no ponto médio de cada camada; ⁽²⁾ Somente N potencialmente mineralizável (GONÇALVES; MENDES; SASAKI, 2001).

4.6 Balanço nutricional do sítio florestal

O balanço nutricional do povoamento de *P. taeda* e suas perspectivas de sustentabilidade da produtividade de madeira no longo prazo mostraram-se altamente dependentes dos cenários silviculturais considerados. Os níveis de intensidade da exportação de nutrientes afetaram, drasticamente, o número potencial de rotações de cultivo (Tabela 18). Esse tipo de abordagem demonstra a importância relativa, no manejo florestal, dos componentes da floresta.

Tabela 18- Balanço nutricional e estimativa do número potencial de rotações de 16 anos sob três cenários de manejo para plantação comercial de *Pinus taeda* estabelecida em um Cambiossolo Húmido, considerando um IMA de 37 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ de madeira com casca e biomassa total de 341 Mg ha⁻¹

Componente	N	P	K	Ca	Mg	S
	kg ha ⁻¹					
(S) Estoque de nutrientes no solo (0-190 cm)⁽¹⁾	1138,0	39,1	792,8	879,2	377,9	196,1
Estoque de nutrientes na biomassa						
Acícula (Ac)	116,1	6,9	27,3	14,7	3,6	6,3
Galho (G) (morto e vivo)	108,9	3,3	14,1	40,8	10,8	10,8
Madeira (Mad)	210,4	32,6	85,2	91,0	31,2	65,0
Casca (Ca)	71,9	3,1	15,8	20,9	5,2	10,2
Serapilheira (Se)	299,7	11,6	8,6	27,2	9,4	30,8
Raiz (Rz)	365,0	10,4	54,1	129,6	30,0	48,8
Soma	1172	68	205	324	90	172
Saída de nutrientes						
Pela remoção da madeira (Mad)	210	33	85	91	31	65
Pela remoção da madeira e da casca (Mad + Ca)	282	36	101	112	36	75
Pela remoção da madeira, da casca e da copa (Ac + G)	507	46	142	167	51	92
(P) Entrada de nutrientes via precipitação pluviométrica	47,9	3,0	55,4	115,3	25,8	0
Balanço nutricional ⁽²⁾						
Cenário A: (S)+(Ac)+(G)+(Se)+(Rz)+(Ca) - (Mad)+(P)	2026	69	742	996	364	263
Cenário B: (S)+(Ac)+(G)+(Se)+(Rz) - (Ca+Mad)+(P)	1954	65	726	975	359	252
Cenário C: (S)+(Se)+(Rz) - (Ac + G) - (Ca+Mad)+(P)	1729	55	684	919	344	235

⁽¹⁾ Somente N potencialmente mineralizável (GONÇALVES; MENDES; SASAKI, 2001), P espectrofotometria em extrato nítrico-perclórico, K por espectrofotometria de chama, S por espectrofotometria em ultravioleta visível (UV/VIS), Ca e Mg espectrofotometria de absorção atômica; ⁽²⁾ Nutrientes remanescentes no sítio depois da primeira rotação de 16 anos;

Relativamente, a colheita de madeira foi o fator mais impactante sobre a sustentabilidade. A extração adicional de outro componente da biomassa, sobretudo os de alta concentração de nutrientes, como a copa, implicaria significativo depauperamento da perspectiva de sustentabilidade, mas bem menor do que o efeito causado pela extração da madeira. Para os três cenários de manejo, o esgotamento de nutrientes do sistema solo-biomassa é o mesmo, apresentando esta sequência: $P > S > N > K > Mg > Ca$. Para Bizon (2005), a ordem provável de limitação em um Cambissolo Húmico foi $P > N > Ca > K > Mg$, enquanto, para Witschoreck (2008), no mesmo tipo de solo, foi $P > N > K = Mg > Ca > S$, demonstrando a importância do P e do N em todos os sistemas.

No cenário A, o Ca aparece como o nutriente menos limitante, cujo número de rotações de cultivo é indeterminado. As entradas de nutrientes consideradas compensaram as saídas, neste cenário, devido ao estoque no solo e à entrada, via precipitação pluviométrica. Por outro lado, o P e o S são os mais limitantes, não devido às altas taxas de exportação, mas a seus baixos estoques no solo. De fato, *P. taeda* em simbiose com micorrizas são muito eficientes na absorção de P. Desse modo, a falta de dados sobre a entrada de nutrientes via precipitação pluviométrica do S, na rotação de 16 anos, pode ter influenciado, significativamente, os resultados do balanço desse nutriente. Witschoreck (2008) observou que, para esse elemento, as entradas via precipitação pluviométrica compensaram as saídas de nutrientes, via exportação, somente da madeira. Caldato (2011) observou que os principais nutrientes presentes na água da chuva foram N, S e Ca. Para os demais, os estoques de Mg, K e N são os elementos que permitiriam o maior número potencial de rotações, 67 rotações, 25 rotações e 13 rotações, ou 1072 anos, 400 anos e 208 anos de manejo, respectivamente. Já os estoques de S, cinco rotações (80 anos) e os de P, 3 rotações (48 anos) (Tabela 19).

Tabela 19 - Número potencial de rotações de cultivo com base em cenário de manejo silvicultural

Cenário silvicultural	Rotação de cultivo					
	N	P	K	Ca	Mg	S
	nº					
Cenário A	13	3	25	ln ⁽¹⁾	67	5
Cenário B	9	3	16	ln	34	4
Cenário C	4	2	8	18	14	3

⁽¹⁾ Número indeterminado de rotação de cultivo.

Embora a casca tenha menor importância, em termos de exportação de nutrientes, a sua retirada adicional (Cenário B) implicou a redução de uma rotação para o S, se comparado ao Cenário A, o que significa a retirada de 75 kg ha^{-1} , ou 10 kg ha^{-1} de S a mais, relativamente ao cenário A. O P não se alterou, porque o estoque desse elemento na casca é baixo e porque essas saídas adicionais foram compensadas pelas entradas, via precipitação do período, $3,1 \text{ kg ha}^{-1}$. Para os demais nutrientes, embora ainda permaneça grande número potencial de rotações de cultivo, observou-se a redução de quatro rotações potenciais para o N, nove para o Ca e 34 para o Mg. Para o Ca, a exportação adicional de $20,9 \text{ kg ha}^{-1}$ ainda é compensada pelas entradas de nutrientes, via precipitação pluviométrica, durante a rotação florestal. Caldato (2011), estudando plantações de *P. taeda* com 13 anos, observou que as entradas de Ca, via precipitação pluviométrica, também foram suficientes para compensar as retiradas, via exportação da casca e da madeira.

A extração adicional da copa (Cenário C) resultou em uma queda maior no número de rotações florestais, comparativamente ao Cenário B. Isso ocorreria porque a copa apresenta alta concentração de nutrientes, alguns deles com baixos estoques no solo, o que potencializaria a sua exaustão. O N, como elemento mais estocado nesse componente, causou a redução de nove rotações potenciais, relativamente ao cenário A, mesmo apresentando altos estoques no solo. Para o P e o S, a retirada da copa resultaria apenas na redução de uma rotação de cultivo; para o K e o Mg, embora cause a redução de 8 e 20 rotações de cultivo, respectivamente, ainda permitiriam um grande número de rotações de cultivo, enquanto, para o Ca, a retirada da copa provocaria a definição de um número potencial de rotações de cultivo, 18, revertendo o quadro de sustentabilidade desse elemento, relativamente aos demais cenários. Dessa forma, embora com um cenário de manejo longo, 18 rotações potenciais, ou 288 anos de manejo, as entradas de nutrientes, via precipitação pluviométrica, seriam, pela primeira vez, suplantadas pela retirada da copa.

A entrada de nutrientes, via precipitação pluviométrica, foi significativa para o balanço de nutrientes nos três cenários apresentados. Considerando-se o período longo de manejo do *P. taeda*, as entradas consideradas foram muito importantes para o balanço de entradas e saídas do sistema florestal. Embora tais

entradas não compensem as saídas de nutrientes, mesmo para a retirada somente da madeira (exceto para o Ca), a contribuição nutricional adicional da precipitação interna pode ser significativa para o manejo nutricional de *P. taeda*, na região de estudo. Plantações de *Pinus* spp. são realizadas desde a década de 1960, sem qualquer registro da prática de fertilização, desde então. De fato, a água das chuvas, ao interagir com as copas e a casca das árvores, arrasta quantidades apreciáveis de nutrientes (LIMA; BARBIN, 1975), configurando-se como uma importante fonte de reposição nutricional das plantações florestais (CALDATO, 2011).

Nesse contexto, analisando a produtividade do sítio sob a ótica nutricional, Lima (1985) considera que a manutenção da produtividade florestal, ao longo de sucessivas rotações florestais, depende da velocidade de liberação de novos nutrientes, pelo intemperismo e pela adição por meio das chuvas. Entretanto, para a escala de utilização de nutrientes do solo pelas florestas, a dependência da entrada de nutrientes via precipitação pluviométrica é mais significativa, considerando-se que as chuvas constituam importante fonte de nutrientes para os ecossistemas florestais.

Poggiani e Schumacher (1997) realizaram o balanço de nutrientes para plantações de *Eucalyptus* spp. em diversas idades. Sugeriram que, a fim de manter a sustentabilidade nutricional dos sítios, a rotação de cultivo deveria ser mais longa do que os 5-7 anos usuais e que apenas a madeira deveria ser exportada. Analisando as saídas de nutrientes somente da madeira, os autores observaram que, nas rotações de produção de 2,5, 9 e 11 anos, as entradas de nutrientes, via precipitação pluviométrica, não compensariam as saídas, na rotação de 2,5 anos, mas que seriam suficientes somente para a retirada da madeira, na rotação de 9 e 11 anos.

Ainda que a análise dos cenários estudados não considere todas as entradas e as saídas do sistema, ela forneceu uma perspectiva relativa das práticas silviculturais, quanto à sustentabilidade da produtividade de madeira no longo prazo. Por isso, presta-se a orientar decisões sobre o uso de novas práticas para sítios florestais específicos, em relação à sua qualidade edáfica (GONÇALVES et al., 2008). Nesse sentido, a avaliação relativa dos resultados dos diferentes cenários avaliados (práticas de manejo florestal), quanto à perspectiva de manter a produção

florestal em rotações contínuas, mostrou-se como importante ferramenta, na medida em que se buscou compreender e prever os impactos dos diferentes manejos florestais, quanto aos fatores limitantes da produtividade (FOX, 2000).

De fato, demonstrou-se que uma forma de reduzir a exportação de nutrientes do sítio e, assim, manter a qualidade e a capacidade produtiva do solo, durante maior período de tempo, é promover a exploração somente da madeira (FOX, 2000; FARIA et al., 2008). Isso porque a retirada da copa do sistema florestal poderia alterar todo o processo de ciclagem biogeoquímica de nutrientes, devido à retirada de resíduos nutricionalmente ricos. Ademais, devem ser considerados alguns outros aspectos, como a contribuição desses resíduos para atenuar os níveis de compactação das máquinas florestais (SEIXAS; SOUZA, 2007) e para proteger a superfície do solo da exposição às intempéries climáticas (GONÇALVES, 1995).

Sabe-se que sistemas biológicos se adaptam a mudanças do meio. Em ecossistemas florestais naturais, quando há declínios da disponibilidade de fatores de crescimento, como queda de fertilidade do solo, a comunidade florestal adapta-se às novas condições ambientais, por meio da substituição de espécies. Em plantações florestais, as árvores respondem às mudanças ambientais, por meio da produtividade em madeira, constituindo, nesse contexto, um dos principais fatores a fertilização (GONÇALVES et al., 2000). Por isso o uso de genótipos mais eficientes em sua utilização de nutrientes, bem como a fertilização, poderão configurar uma prática imprescindível para atenuar e, ou reverter o processo de empobrecimento do solo, promovendo a formação de ciclos geoquímicos sustentáveis. Por outro lado, tais mudanças devem ser analisadas sob o ponto de vista ecológico, compreendendo-se a extensão de suas interações com o ambiente sobre a qualidade produtiva dos solos (KIMMINS, 1994) e a qualidade da água de drenagem (PROMAB, 2011).

Vários aspectos encontram-se envolvidos na manutenção da produtividade florestal e na definição do número potencial de rotações de cultivo, entre os quais o balanço nutricional se mostra importante e bastante significativo (SWITZER; NELSON, 1972; KIMMINS, 1994; GONÇALVES et al., 1997; SANTANA; BARROS; NEVES, 2002; BIZON, 2005; WITSCHORECK, 2008). Nesse aspecto, a serapilheira desempenha papel imprescindível, acumulando grande parte dos nutrientes extraídos do solo pelas árvores. De fato, esse armazenamento e os fluxos

de entrada e saída de nutrientes exercem função fundamental para o manejo nutricional de plantações de *P. taeda* (POGGIANI; STAPE; GONÇALVES, 1998). Segundo Poggiani (1985), sejam os ecossistemas de florestas naturais, sejam os de plantações florestais, quando manejados corretamente, eles se constituem em ecossistemas equilibrados, do ponto de vista nutricional, devido aos processos contínuos de ciclagem de nutrientes.

Nesse contexto, o estoque de nutrientes na serapilheira é de extrema importância para o gestor florestal, pois se relaciona à ciclagem de nutrientes, notadamente em solos com baixa fertilidade (POGGIANI, 1985; REIS; BARROS, 1990; REISSMANN; WISNEWSKI, 2000). Dessa forma, para avaliar a disponibilidade de nutrientes da serapilheira às árvores, Poggiani (1985) estabeleceu a relação entre o conteúdo de nutrientes estocados no solo e na serapilheira acumulada (Tabela 20), a qual evidencia a retenção relativa de nutrientes na serapilheira, podendo indicar quais nutrientes podem estar menos disponíveis às árvores (nutrientes com menor relação).

Tabela 20 - Estoque de nutrientes no solo e na serapilheira e relação entre o estoque de nutrientes nestes componentes para povoamento de *P. taeda* aos 16 anos de idade

Estoque de nutrientes	N	P	K	Ca	Mg	S
	kg ha ⁻¹					
Solo	1138,0	39,1	792,8	879,2	377,9	196,1
Serapilheira	299,7	11,6	8,6	27,2	9,4	30,8
Solo : Serapilheira	3,8	3,4	91,9	32,3	40,3	6,4

A sequência crescente que evidencia a maior imobilização dos nutrientes na serapilheira, é $P > S > N > K > Mg > Ca$. A partir desta sequência é possível antever os elementos que podem apresentar ciclagem mais lenta, assim como observado por Poggiani (1985) para *P. oocarpa*, *P. caribaea* e *E. saligna*. Considerando-se a ordem provável de limitação obtida pelo balanço nutricional, seria possível avaliar os nutrientes mais limitantes no sistema florestal devido à maior imobilização de alguns elementos na serapilheira? A indicação dos elementos menos disponíveis às árvores, demonstrada pela relação solo/serapilheira, de alguma maneira reflete a provável limitação de nutrientes, estabelecida pelo balanço de nutrientes? Ranger e Turpault (1999) consideraram o balanço de entrada e de

saída de nutrientes como um importante indicador para avaliar a fertilidade do solo e da sustentabilidade do manejo florestal. Entretanto Adams et al. (2000) avaliaram que, para serem úteis, os indicadores devem ter: (i) uma linha de base contra a qual está disponível para comparar mudanças; (ii) fornecer uma medida sensível, contínua, e oportuna da mudança do solo; (iii) ser aplicável a grandes áreas; (iv) ser barato e fácil de usar, de coletar e de calcular; (v) discriminar as mudanças naturais das induzidas pelo manejo e (vi) ser altamente correlacionada com a resposta a longo prazo nos ecossistemas florestais de longa duração. Assim, limitações quanto aos itens 2, 3 e 4 poderiam restringir o uso do balanço de entrada e saída de nutrientes como um indicador mais usual, permitindo que avaliações mais simples, como a relação solo/serapilheira seja pleiteada.

Nesse contexto, voltando às questões levantadas, comparando-se as sequências dos nutrientes que podem estar menos disponíveis às árvores ($P > N > S > Ca > Mg > K$), obtida pela relação solo/serapilheira, com a ordem provável de limitação de nutrientes ($P > S > N > K > Mg > Ca$), obtida pelo balanço de nutrientes, observou-se que, para os elementos mais limitantes, P, S e N, a ordem foi parecida. Para os demais elementos, a significativa entrada dos nutrientes K, Mg e Ca, via precipitação pluviométrica, e o estoque desses elementos no solo podem explicar as diferenças encontradas. De fato, seguindo os preceitos estabelecidos por Adams et al. (2000), em seu item 6, talvez a relação solo/serapilheira se descaracterize como reflexo da provável limitação de nutrientes, estabelecida pelo balanço de nutrientes e, desse modo, como indicador para avaliar a fertilidade do solo e a sustentabilidade do manejo florestal. Ademais, a necessidade de estudos em outros solos e sistemas florestais poderá atestar a aplicabilidade dessas relações.

Na tentativa de prever possíveis impactos do sistema de gestão intensiva sobre as florestas, a definição e a seleção de indicadores foram apresentadas para avaliar a capacidade de produção de florestas, no longo prazo (KIMMINS, 1994; NAMBIAR, 1996; ADAMS et al., 2000). Fox (2000) salienta que indicadores confiáveis da qualidade do solo são necessários para avaliar a sustentabilidade do manejo florestal. Propõe que se realize essa análise em duas abordagens: (i) comparações diretas da produção de biomassa em rotações sucessivas e (ii) índices da qualidade do solo baseados em medidas diretas de

propriedades do solo, tais como volume e profundidade do enraizamento, resistência do solo, concentração de matéria orgânica, atividade microbiana e as taxas de mineralização de Nitrogênio. Bizon (2005) observou que a taxa de mineralização do nitrogênio e a disponibilidade de fósforo no solo foram significativamente correlacionadas à produtividade florestal de *P. taeda*.

Entretanto, para o manejo florestal intensivo, a meta é maximizar a produção, o que envolve práticas silviculturais para minimizar fatores que limitam o crescimento das árvores, como o preparo do solo e as fertilizações, a utilização de material geneticamente melhorado, a manipulação de densidade do povoamento e o controle da mato-competição (RANGER; TURPAULT, 1999). Nesse processo, a manutenção, no longo prazo, da produtividade do solo é imprescindível. Os impactos do manejo florestal sobre a qualidade do solo podem ser positivos ou negativos, e a magnitude do impacto depende da gestão dos seus atributos físicos, químicos e biológicos. Nesse contexto, alcançar a sustentabilidade florestal requer manter a qualidade do solo e a produtividade no longo prazo (FOX 2000). Para tanto, a contribuição dos resíduos florestais é condição *sine qua non* (GONÇALVES et al., 1997).

5 CONCLUSÕES

A hipótese I foi corroborada. Os resíduos florestais foram essências para manter a sustentabilidade da produtividade de madeira.

A hipótese II foi parcialmente corroborada. A entrada de nutrientes via precipitação pluviométrica compensou somente para o elemento Ca a retirada de nutrientes via exportação da madeira.

A hipótese III foi corroborada. O balanço de entrada e saída de nutrientes foi um importante indicador para avaliar a sustentabilidade do manejo florestal de *P. taeda*.

O P, seguido do S e N foram os nutrientes mais limitantes para todos os cenários silviculturais avaliados.

O cenário B, o manejo mais adotado nas plantações florestais da região de estudo, indicou que o fato de a casca ser retirada do campo levou a resultados significativos, como o número potencial de rotações de cultivo, principalmente para o K, o Ca e o Mg.

A composição mineralógica do solo mostrou predominância do quartzo nas frações areia, silte e argila. A fração argila apresentou pequena quantidade de caulinita e vermiculita.

A transformação illita/vermiculita foi identificada no Cambissolo estudado como a responsável pela liberação de K à solução, por meio da abertura gradual das extremidades do cristal e saída do elemento da entrecamada do mineral. Desse modo, este processo de transformação mineralógica libera gradativamente K para a solução à medida que o intemperismo avança.

Ainda que o estoque nutricional do solo influa significativamente para determinar o número de rotações florestais, evidenciou-se a especial atenção que se deve dar ao manejo de componentes florestais, sobretudo dos galhos e das acículas. Por outro lado, tão importante quanto esse estoque, a adequada reposição de nutrientes deve ser observada pelos gestores florestais. Os resultados

apresentados ilustraram que no sistema de manejo mais exaurível, a sustentabilidade nutricional pode ser em curto prazo comprometida, sobretudo para o P, o S e o N.

O monitoramento dos balanços nutricionais da floresta possibilita o embasamento de tomada de decisão, que vise à maior economia, por meio do corte de desperdícios, o que permite inferir sobre a sustentabilidade de diferentes manejos florestais. Nesse sentido, quanto menor o número potencial de rotações para cada nutriente, maior a atenção e a dedicação despendidas ao mesmo, a fim de garantir o aumento da produtividade e a qualidade.

Nos cenários silviculturais propostos, as perdas nutricionais devido à exportação da madeira e da casca (mais comum para o manejo de *Pinus*) mostraram-se bastante significativas. Assim, para o manejo nutricional atual de *P. taeda*, cuidados devem ser tomados, sobretudo quanto ao P, visando a suprir as demandas da espécie e a retardar os efeitos da exportação de nutrientes sobre a produtividade florestal, de modo a, assim, promover a formação de ciclos geoquímicos sustentáveis.

Por fim, não há dúvidas dos benefícios dos resíduos florestais para manutenção da sustentabilidade da produtividade de madeira de *P. taeda*, com significativas contribuições nutricionais e proteção do solo. Entretanto, os resíduos florestais por representar uma importante parcela de biomassa da árvore pode se tornar interessante no aspecto econômico devido ao potencial de geração de energia. A análise tecno-econômica entre as contribuições nutricionais e energéticas dos resíduos florestais com vistas a perspectivas da sustentabilidade das plantações florestais (maior necessidade de reposição nutricional x retorno econômico) pode ser objeto de próximos estudos.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, M.B.; BURGER, J.A.; JENKINS, A.B.; ZELAZNY, L.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112700004217> - AFF4Impact of harvesting and atmospheric pollution on nutrient depletion of eastern US hardwood forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 138, p. 301-319, 2000.
- ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; DOUGHERTY, P.M.; KRESS, L.W.; KING, J.S. Leaf area and above- and belowground growth responses of loblolly pine to nutrient and water additions. **Forest Science**, Washington, v. 44, p. 317-328, 1998.
- ANDRADE, G.R.P. **Argilominerais em solos de manguezais da costa brasileira**. 2010. 189p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- ANTONELLO, L.L.; WITTERN, K.P.; CLAESSEN, M.E.C.; BERTOLINO, L.C. Mineralogia e Química de Algumas Unidades de Solos do Estado do Rio de Janeiro. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, Rio de Janeiro, n.15, p.3-22, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário Estatístico da ABRAF**. Ano Base 2010. Brasília, 2011 Disponível em: < <http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF11/ABRAF11-BR.pdf>>. Acesso em: 22 out. 2011.
- BAHIA, V.G.; CURTI, N.; CARMO, D.N; MARQUES, J.J.G.S. Fundamentos de erosão do solo (tipos, formas, mecanismos, fatores determinantes e controle). **Informe Agropecuário**. Belo Horizonte, v. 16, n. 176, p. 25-31, 1992.
- BALDWIN, Jr., V.C.; PETERSON, K.D.; CLARK III, A.; FERGUSON, R. B.; STRUB, M.R.; BOWER, D.R. The effects of spacing and thinning on stand and tree characteristics of 38-year-old Loblolly Pine. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 137, p. 91-102, 2000.
- BARROS FILHO, N.F. **Produção e partição de biomassa e de nutrientes e recomendação de fertilizantes para o Pinus taeda L. (NUTRIPINUS)**. 2003. 56p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F. Recomendação de fertilizantes minerais em plantios de eucalipto. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba IPEF, 2000. p.270-286.
- BELLOTE, A.F.J.; DEDECEK, R.A. Atributos físicos e químicos do solo e suas relações com o crescimento e a produtividade do *Pinus taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.53, p.21-38, 2006.

BETIOLLO, L.M. **Caracterização estrutural, hidrogeológica e hidroquímica dos sistemas aquíferos guarani e serra geral no Nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil.** 2006. 117p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

BINKLEY, D.; SMITH, F.W.; SON, Y. Nutrient supply and declines in leaf area and production in lodgepole pine. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.25, p. 621-628, 1995.

BINKLEY, D.; SENOCK, R.; BIRD, S.; COLE, T.G. Twenty years of stand development in pure and mixed stands of Eucalyptus saligna and nitrogen-fixing Falcataria mollucana. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.182, p. 93-102, 2003.

BIZON, J.M.C. **Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de *Pinus taeda* L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes.** 2005. 92p. Dissertação (Mestre em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

BOCKHEIM, J.G.; JORDAN, J.K. Soils of the Sylvania Wilderness-Recreation Area, western Upper Peninsula, Michigan. **USDA Forest Service NC General Technical Report**, Saint Paul, n. 237, p.1-18, 2004.

BÖHM, W. **Methods of studying root systems.** In: DURHAM, W.D.B., ATHENS, F.G., WÜRZBURG, O.L.L., OAK RIDGE, J.S.O. (eds). Ecological Studies: analysis and synthesis. vol. 33. Brühlsche Universitätsdruckerei. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. p. 188, 1979.

BRAY, J.R.; GOHAN, E. Litter production in forest of the world. **Advances in Ecological Research**, London, v.2, n.1, p.101-157, 1964.

BRAGA, F.A.; VALE, F.R.; VENTORIM, N.; AUBERT, E.; LOPES, G.A. Exigências nutricionais de quatro espécies florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.19, n.1, p.18-31, 1995.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G.; COUTO, H.T.Z.; MENDES, C.J.; REZENDE, G. C. Estudo do comportamento de madeira de eucalipto frente ao processo de destilação seca. **Revista Brasil Florestal**, Brasília, n. 8, p. 5-48, 1984.

BURGHOUTS, T.B.A.; van STRAALLEN, N.M.; BRUIJNZEEL, L.A. Spatial heterogeneity of element and litter turnover in a Bornean rain forest. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 14, p. 477-506, 1998.

CALDATO, S.L. **Ciclagem biogeoquímica dos nutrientes em uma plantação de *Pinus taeda* L. no nordeste argentino.** 2011. 106p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

CARON NETO, M. Pinus conquista espaço na região Sul. **Revista da Madeira**, Curitiba, v. 58, n. 10, p. 24-28, 2001.

- CASARTELLI, M.R.O. **Composição da precipitação bruta e da precipitação interna (Throughfall) em florestamentos de plantas introduzidas na planície costeira do Rio Grande do Sul, Brasil, e sua utilização no monitoramento das precipitações atmosféricas.** 2006. 217p. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- CARVALHO, A.P.; MENEGOL, O.; OLIVEIRA, E.B.; MACHADO, S.A.; POTTER, R.O.; FASOLO, P.J.; FERREIRA, C.A.; BARTOSZECK, A. Efeitos de características do solo sobre a capacidade produtiva de *Pinus taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 39, p.51-66, 1999.
- CASTRO, O.M.; Cultivo mínimo e propriedades físicas do solo. In: SEMINÁRIO SOBRE CULTIVO MÍNIMO DO SOLO EM FLORESTAS, 1., 1995. Curitiba. **Anais...** Piracicaba: CNPFloresta, IPEF, UNESP, SIF, FUPEF, 1995. p. 34-42.
- CAVICHIOLO, S.R. **Perdas de solo e nutrientes por erosão hídrica em diferentes métodos de preparo do solo em plantio de *Pinus taeda*.** 1999. 152p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- CHADWICK, O.A.; CHOROVER, J. The chemistry of pedogenic thresholds. **Geoderma**, Amsterdam, v. 100, p. 321–353, 2001.
- CHADWICK, O.A.; BRIMHAL, G.H.; HENDRICKS, D.M. From a black to a gray box - a mass balance interpretation of pedogenesis. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 3, p. 369-390, 1990.
- CHAER, G.M.; TÓTOLA, M.R. Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma de plantios de eucalipto sobre indicadores de qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 31, p.1381-1396, 2007.
- COUTINHO, L.M. Aspectos ecológicos do fogo no cerrado: a precipitação atmosférica de nutrientes minerais. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v.2, n.2, p.97-101, 1979.
- DALMOLIN, R.S.D.; GONÇALVES, C.N.; DICK, D.P.; KNICKER, H.; KLAMT, E. KÖGEL-KNABNER, I. Organic matter characteristics and distribution in Ferralsol profiles of a climosequence in southern Brazil. **European Journal of Soil Science**, Cranfield, v. 57, p. 644-654, 2006.
- DOLDAN, M.E.Q. **Desenvolvimento da altura dominante de *Pinus taeda* L. como resposta aos estímulos dos fatores do meio, na região de Ponta Grossa-PR.** Curitiba, 1987. 119p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1987.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo.** 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. p. 212.
- EMBRAPA. **Mapa de solos do estado de Santa Catarina.** Santa Catarina, 2009. Disponível em: < <http://mapoteca.cnps.embrapa.br/>>. Acesso em: 22 mar. 2011.

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ". **Planilha eletrônica BHnorm**. Disponível em: < <http://www.lce.esalq.usp.br>>. Acesso em: 10 maio. 2011.

FANNING, D.S.; KERAMIDAS, V.Z.; EL-DESOKY, M.A. Micas. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Ed.). **Minerals in soils environments**. 2nd.ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p.551-634.

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

FERNÁNDEZ, R.; RODRÍGUEZ ASPILLAGA, F.; LUPI, A.; LOPEZ, E.; PEZZUTTI, R.; CRECHI, E.; PAHR, N.; NATIUCK, M.; CORTEZ, P. Respuesta del *Pinus taeda* y la *Araucaria angustifolia* a la adición de N, P y K en la implantación. In: **SILVOARGENTINA I**, Governador Virasoro, Corrientes, 2000. 1 CD-ROM.

FERREIRA, C.A.; SILVA, H.D.da; REISSMANN, C.B.; BELLOTE, A.F.J.; MARQUES, R. Nutrição de *Pinus* no Sul do Brasil – Diagnóstico e Prioridades de Pesquisa. EMBRAPA: **Documentos**, Colombo, n. 60, p. 23, 2001.

FERREIRA, R.L.C.; LIRA JR., M.A.; ROCHA, M.S. da ; SANTOS, M.V.F. dos; LIRA, M.A.; BARRETO, L.P. Deposição e acúmulo de matéria seca e nutrientes em serapilheira em um bosque de sabiá (*Mimosa caesalpinifolia* Benth.). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n.1, p. 7-12, 2007.

FISHER, R.F.; BINKLEY, D. **Ecology and management of forest soils**. 3rd ed. New York: Wiley, 2000. 489p.

FLINN, D.W.; HOPMANS, P.; FARRELL, P.W.; JAMES, J.M. Nutrient loss from the burning of *Pinus radiata* logging residue. **Australian Forest Research**, Melbourne, v.9, n.1, p.17-23, 1979.

FONTES, M.P.F. **Mineralogia do solo** (Versão Resumida). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2002. 1v.

FOX, T.R. Sustained productivity in intensively managed forest plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 138, p. 187-202, 2000.

FRIEND, J.A. Achieving soil sustainability. **Journal of Soil and Water Conservation** Ankeny, v. 47, p. 156-157, 1992.

KÄMPF, N.; KLAMT, E. Mineralogia e Gênese de Latossolos (Oxisols) e Solos Podzólicos da Região Nordeste do Planalto Sul-Riograndense. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 2, p. 68-73, 1978.

GAVA, J.L.; GONÇALVES, J.L.M. Soil attributes and wood quality for pulp production in plantations of *Eucalyptus grandis* clone. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.65, n.3, p.306-13, 2008.

GILMAN, E.F.; WATSON, D.G. *Pinus taeda* - **Loblolly Pine**: Environmental Horticulture Department, Florida Cooperative Extension Service. Florida:Institute of Food and Agricultural Sciences, 1994. p. 3.

GONÇALVES, J.L.M. Propriedades físico-químicas dos solos vs exigências nutricionais de espécies florestais de rápido crescimento. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n.154, p.1-12, 1988.

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

GONÇALVES, J.L.M. **Características do sistema radicular de absorção do *Eucalyptus grandis* sob diferentes condições edáficas**. 1994. 102p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

GONÇALVES, J.L.M. Efeito do cultivo mínimo sobre a fertilidade do solo e ciclagem de nutrientes. In: SEMINÁRIO SOBRE CULTIVO MÍNIMO DO SOLO EM FLORESTAS, 1., 1995, Curitiba. **Anais...** Piracicaba: CNP Floresta;IPEF; UNESP; SIF;FUPEF, 1995. p. 43-62.

GONÇALVES, G.A.; RAMALHO, M.A.P.; ANDRADE, H.B.; MARQUES, O.G.M. Resposta na segunda rotação pela seleção efetuada na primeira, em família de meios-irmãos de *Eucalyptus grandis* hill ex maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, v.21, n.3, p.377-383, 1997.

GONÇALVES, J.L.M. Diretrizes e ações em prol de uma silvicultura sustentável. ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 1., Curitiba, 2008. **Anais...** PTSM/IPEF/FUPEF, Piracicaba, 2008. p.89-104.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.) **Nutrição e fertilização florestal**, IPEF, Piracicaba, 2000. p.3-57.

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, p.601-616, 2001.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; WICHERT, M.C.P.; GAVA, J.L.; Manejo de resíduos vegetais e preparo do solo. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed.) **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba:IPEF, 2002. 498p.

HAAG, H.P.; ROCHA FILHO, J.V.C.; OLIVEIRA, G.D. Ciclagem de nutrientes em florestas plantadas de *Pinus* e *Eucalyptus*. Contribuição das espécies de nutrientes na manta. **Revista o Solo**, Piracicaba, v. 70, n. 2, p. 28-31, 1978.

HAAG, H.P. Ciclagem de nutrientes em florestas tropicais. Campinas: Fundação Cargill, 1985. 154p.

HEPP, T.E.; BRISTER, G.H. Estimating crown biomass in loblolly pine plantations in the carolina flatwoods. **Forest Science**, Bethesda, v.28, n.1, p.115-127, 1982.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Banco de dados agregados**. Disponível em:
<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/silvi/default.asp?t=2&z=t&o=29&u1=33&u2=1&u3=1&u4=1>. Acesso em: 31 mar. 2012.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. EMBRAPA. Disponível em:
<<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 23 mar. 2011.

JACKSON, M.L. **Ceou chemical analisys. Advanced course**. Madison:Wisconsin University, 1973. 895p.

JOKELA, E.J.; PHILIP, M.D.; TIMOTHY, A.M. Production dynamics of intensively managed loblolly pine stands in the southern United States: a synthesis of seven long-term experiments. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 192, p.117-130, 2004.

KAMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J.J. **Química e mineralogia do solo**. cap.5, Pt. 1: Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. SBCS, Viçosa, p. 333-379, 2009.

KIMMINS, J.P. Identifying key processes affecting long-term site productivity. In: DYCK, W.J.; COLE, D.W. COMERFORD, N.B. **Impacts of forest harvesting on long-term site productivity**. Britain, 1994. p. 119-150.

KLEMMEDSON, J.O.; MEIER, C.E. CAMPBELL, R.E. Needle decomposition and nutrient release in ponderosa pine ecosystems. **Forest Science**, Washington, v. 31. p. 647-660, 1985.

KOEHLER, W.C. **Variação estacional de deposição de serapilheira e de nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* na região de Ponta Grossa-PR**. 1989. 138p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Paraná, Curitiba, 1989.

KRONKA, F.J.N. ; BERTOLANI, F.; PONCE, R.H. **A cultura do Pinus no Brasil**. São Paulo: Páginas e Letras, 2005. v. 1. 160p.

LACERDA, M.P.C.; ANDRADE, H.; QUEMÉNEUR, J.J.G. Micropedologia da alteração em perfis de solos com B textural na região de Lavras, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 829-841, 2000.

LACLAU, P. Root biomass and carbon storage of ponderosa pine in a northwest Patagônia plantation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.173, p.353-360, 2003.

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**, Viçosa, v.25, n.1, p.69-78, 2001.

LAGO, P.F. **Santa Catarina**: a terra, o homem e a economia. Florianópolis: Ed. UFSC, 1968. p. 340.

LIMA,W.P.; BARBIN,D. Efeito de plantações de *Eucalyptus* e *Pinus* sobre a qualidade da água da chuva. **IPEF**, Piracicaba, n.11, p.23-35, 1975.

LIMA,W.P. Ação das chuvas no ciclo biogeoquímico de nutrientes em plantações de pinheiros tropicais e em cerrado. **IPEF**, Piracicaba, n.30, p.13-7, 1985.

LOPES, V.G. ; SCHUMACHER, M.V.; CALIL, F.N.; VIERA, M; WITSCHORECK, R. Quantificação de raízes finas em um povoamento de *Pinus taeda* l. e uma área de campo em cambará do sul, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 569-578, 2010.

LOPES, V.G.; SCHUMACHER, M.V.; VIERA, M. Aporte de nutrientes via precipitação em um povoamento de *Pinus taeda* L. no sul do Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, 6.; SIMPÓSIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA DO RIO DE JANEIRO. 2 ed. 2010. **Anais...** Rio de Janeiro: SIMADERJ, 2010. ISSN 1984-1310.

LOPES, M.I.M.S.; GARRIDO, M.A.O.; MELLO, F.A.F. Influência do cultivo de pinus sobre a manta orgânica e propriedades químicas em um latossolo vermelho escuro primitivamente sob a vegetação de cerrado. **Silvicultura em São Paulo**, São Paulo, v.17-19, p.25-29, 1983.

MACHADO, F.B.; MOREIRA, C.A. ; GODOY, A.M.; ZANARDO, A.; NARDY, A.J.R. Modernização da litoteca e do museu de minerais e rochas prof. Dr. Heinz ebert através de um banco de dados para consulta local e remota . Rio de Janeiro :Universidade Estadual do Rio de Janeiro, v. 1., 2001. p. 204-204.

MALAVOLTA,E.;VITTI,G.C.; OLIVEIRA,S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1989. 211p.

McCOLL, J.G. Soil-Plant Relationships in a Eucalyptus Forest on the South Coast of New South Wales. **Ecology**, Portland, v. 50, n. 3, p.354-361,1969.

MELO,V.F.; CRUZ,C.D.; BARROS,N.F.; NOVAIS,R.F.; COSTA,L.M. Utilização de técnicas multivariadas no estudo das relações entre atributos químicos do solo e a produtividade do eucalipto no Rio Grande do Sul. **IPEF**, Piracicaba, n.48/49, p.38-49, 1995.

MELLO,S.L.M.; GONÇALVES,J.L.M.; OLIVEIRA,L.E.G. Características do sistema radicular em povoamentos de eucaliptos propagados por sementes e estacas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.54, p.17-28, 1998.

MELLO,S.L.M.; GONÇALVES,J.L.M. Equações para estimar a biomassa da parte aérea e do sistema radicular em povoamentos de *Eucalyptus grandis* em sítios com produtividades distintas. **Revista Árvore**, Viçosa, v.32, n.1, p.101-111, 2008.

MENCUCCINI, M.; GRACE, J. Hydraulic conductance, light interception and needle nutrient concentration in Scots pine stands and their relations with net primary productivity. **Tree Physiology**, Victoria, v. 16, p. 459-468, 1996.

MENEGOI, O. **Índice de sítio e relação entre altura dominante e teores nutricionais das acículas em povoamentos de *Pinus elliottii* var. *elliottii* no segundo planalto**.1991. 86p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1991.

MICHELON, C.R. **Balanço químico em seis conjuntos solo-saprolito do Rio Grande do Sul**. 2006. 68p. Dissertação (Mestrado em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

MILLER, H.G. Nutrient cycles in forest plantations, their change with age and consequences for fertilizer practice. In: AUSTRALIAN FOREST NUTRITION WORKSHOP, 1981 Canberra. **Proceedings...** Canberra: CSIRO, Productivity in perpetuity, 1981. p. 187-189.

MOCHIUTTI, S.; QUEIROZ, J.A.L.; MELÉM JUNIOR, N.J. Produção de serapilheira e retorno de nutrientes de um povoamento de táxi-branco e de uma Floresta Secundária no Amapá. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.52, p.3-20, 2006.

MOORE, D.M.; REYNOLDS, R.C. **X-ray Diffraction and the Identification and analysis of clay minerals**. 2nd ed. New York; Oxford: University Press, 1997. 378p.

MOREIRA, P.R.; SILVA, O.A. Produção de serapilheira em área reflorestada. **Revista Árvore**, Viçosa, v.28, n.1, p.49-59, 2004.

MORI, P.; REEVES, S.; CORREIA, C.T.; HAUKKA, M. Development of a fused glass disc XRF facility and comparison with the pressed powder pellet technique at Instituto de Geociências, Sao Paulo University. **Revista Brasileira de Geociência**, Curitiba, v. 29, p. 441-446, 1999.

MORO, L. Exportação de nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* l. Baseada em volume estimado pelo sistema *sispinus*. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 3, p. 465-477, 2008.

NAMBIAR, E.K.S.; FIFE, D.N. Growth and nutrient retranslocation in needles of *Radiata* Pine in relation to nitrogen supply. **Annals of Botany**, London, v. 60, n. 2, p.147-156, 1987.

NAMBIAR,E.K.S.; BROWN,A.G. **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR, 1997. p. 213-246.

NAMBIAR, E.K.S. Productivity and sustainability of plantation forests. **Bosque**, Valdivia, v.20, n.1, p. 9-21, 1999.

NORRISH, K. Forces between clayparticles. In: SERRATOSA, J.M. (Ed.). INTERNATIONAL CLAY CONFERENCE, 1972. Madrid., June 1972. **Proceedings...** Madrid: Div. de Ciencias,CSIA, 1973. p.375-383.

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. 69p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

OLSON, J.S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. **Ecology**, Durham, v. 44, n. 2, p. 322–331, 1963.

PEREZ-MARIN, A.M.; MENEZES, R.S.C. Ciclagem de nutrientes via precipitação pluvial total, interna e escoamento pelo tronco em sistema agroflorestal com Gliricidia. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.6, p. 2573-2579, 2008.

PEDRON, F.A. **Mineralogia, morfologia e classificação de saprolitos e neossolos derivados de rochas vulcânicas no Rio Grande do Sul**. 2007. 160p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa, Santa Maria, 2007.

POGGIANI, F. Florestas para fins energéticos e ciclagem de nutrientes. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v.1, n.2, p.1 -11, 1980.

POGGIANI, F. Ciclagem de nutrientes e manutenção da produtividade da floresta plantada. In:_____ **Gaseificação de madeira e carvão vegetal**. Belo Horizonte: FUNDAÇÃO CETEC, 1981. p.25-33.

POGGIANI, F.; COUTO, H.T.Z.; SUITER FILHO, W. Biomass and nutrient estimates removal in short rotation intensively cultured plantation of *Eucalyptus grandis*. **Silvicultura**, Piracicaba, v.8, n.32, p.648-651, 1983.

POGGIANI, F. **Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de plantações florestais de *Eucalyptus* e *Pinus*: implicações silviculturais**. 1985. 229p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

POGGIANI, F. Monitoramento ambiental de plantações florestais e áreas naturais adjacentes. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v.10, n.29, p. 22-35, 1996.

POGGIANI, F.; SCHUMACHER, M.V. Atmospheric inputs compared with nutrient removed by harvesting from Eucalyptus plantation: implications for sustainability. In: IUFRO Conference on silviculture and improvement of eucalypts, Salvador, 1997. **Anais..** Colombo: EMBRAPA;CNPQ, 1997. v.4, p.68-74.

POGGIANI, F.; SCHUMACHER, M.V. Ciclagem de nutrientes em florestas nativas. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**, Piracicaba: IPEF, 2000. p.287-308.

POGGIANI, F.; STAPE, J.L.; GONÇALVES, J.L.M. Indicadores de sustentabilidade das plantações florestais. **Série Técnica IPEF**, v. 12, n. 31, p. 33-44, 1998.

POGGIANI, F.; ZAMBERLAN, E.; MONTEIRO, E.; GAVA, I.C. Quantificação da deposição de folheto em talhões experimentais de *Pinus taeda*, *Eucalyptus viminalis* e *Mimosa scabrella* plantados em uma área degradada pela mineração do xisto betuminoso. **IPEF**, cidade, v.47, p. 21-29, 1987.

POTTER, R.O.; KÄMPF, N. Argilo-minerais e óxidos de ferro em Cambissolos e Latossolos sob regime climático térmico údico no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.5, p. 153-159, 1981.

PRITCHETT, W.L. **Properties and management of forest soils**. New York: John Wiley, 1979. 500p.

PRITCHETT, W.L. FISHER, R.F. **Properties and management of forest soils**. 2nd ed. New York: John Wiley, 1987. 510p.

PROMAB - Programa de Monitoramento Ambiental em Microbacias. **Relatório Técnico Anual**. Piracicaba, 2011. 26p.

RAIJ, B.V.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. ; QUAGGIO, J.A. **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285p.

RANGER, J.; TURPAULT, M. Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable Forest management. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 122, p.139-154, 1999.

REIS, M.G.F.; BARROS, N.F. Ciclagem de Nutrientes em Plantios de Eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. 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**, Viçosa, v.9, n.2, p.149-162, 1985.

REISSMANN, C.B. ; RODERJAN, C.V. ; KUNIYOSHI, Y.S. Análise Química do Humus Em Povoamento de Araucaria Angustifolia (Bert.) O. Ktze.. **Revista do Instituto Florestal de São Paulo**, São Paulo, v. 16a, p. 575-578, 1982.

REISSMANN,C.B.; ZOTTL,H.W. Problemas nutricionais em povoamentos de *Pinus taeda* em áreas do arenito da formação rio Bonito - grupo guata. **Revista Setor de Ciências Agrárias**, Recife, v.9, n.1/2, p.75-80, 1987.

REISSMANN,C.B.; WISNEWSKI,C. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. In: GONÇALVES,J.L.M.; BENEDETTI,V. **Nutrição e fertilização florestal**, Piracicaba: IPEF, 2000. p.134-165.

RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J.C.; REZENDE, S.B. **Mineralogia de solos brasileiros**: Interpretações e aplicações. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2005. 192p.

RIGATTO, P.A.; DEDECEK, R.A.; MATTOS, J.L.M. de. Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 701-709, 2005.

ROLIM, G.S.; SENTELHAS, P.C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente excel para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, p. 133-137, 1998.

SAINJU, U.M.; GOOD, R.E. Vertical root distribution in relation to soil properties in New Jersey Pinelands forests. **Plant and Soil**, New York, v. 150, p. 87-97, 1993.

SANTA CATARINA. **Atlas de Santa Catarina**. Gabinete de Planejamento e coordenação Geral. Subchefia de Estatística, Geografia e Informática. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 1986. 176p.

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

SANTOS-PINTO, M. Mineralogia silicática das frações silte e argila dos cambissolos e neossolos do distrito de Jaguará - Feira de Santana, semi-árido baiano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2007. Gramado. **Anais...**Gramado: SBCS, 1985. 190p.

SAR. **Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de Santa Catarina**. Inventário Florístico Florestal de Santa Catarina. Relatório do Projeto Piloto. Florianópolis, 2005. 170p.

SHANKS, R.; OLSON, J.S. First year breakdown of leaf litter in Southern Appalachia. **Forest Science**, Washington, v.134, p.194-195, 1961.

SHEER, B.M. Fluxo de nutrientes pela precipitação pluviométrica em dois trechos de floresta ombrófila densa em Guaraqueçaba, Paraná. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 39, n. 1, p. 117-130, 2009.

SCHUMACHER, M.V. **Aspectos da ciclagem de nutrientes e do microclima em talhões de *Eucalyptus camaldulensis*, *E. grandis* e *E. torelliana***. 1992. 104p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1992.

SCHUMACHER, M. V.; POGGIANI, F. Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, *Eucalyptus grandis* hill ex Maiden e *Eucalyptus torelliana* F. Muell, plantados em Anhembi, SP. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.3, n.1, p. 21-34, 1993.

SCHUMACHER, M.V.; HOPPE, J.M. **A complexidade dos ecossistemas**. Porto Alegre: Pallotti, 1997. 50p.

SCHUMACHER, M.V.; WITSCHORECK, R.; BARBIERI, S.J. Quantificação da serapilheira e dos nutrientes em um povoamento de Araucária angustifolia (Bert.) O. Ktze na região de Quedas do Iguazu/PR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL, 2., 2002, Viçosa. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 1 CD ROM.

SCHRUMPF, M.; ZACH, W.; AXMACHER, J.C.; LYARUU, H.V.M. Biogeochemistry of an afrotropical montane rain forest on Mt. Kilimanjaro, Tanzania. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v.22, p. 77-89, 2006.

SEIXAS, F.; SOUZA, C.R. Avaliação e efeito da compactação do solo, devido à frequência de tráfego, na produção de madeira de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v.31, n.6, p.1047-1052, 2007.

SILVA, E.J. **Aspectos da região serrana catarinense e a influência da empresa Klabin**. 2010. 65p. Monografia (Bacharelado em Ciências Econômicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

SILVA, E.V. **Desenvolvimento de raiz fina em povoamentos mono específicos e mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium***. 2007. 54p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SOARES, C.P.B.; LEITE, H.G.; GÖRGENS, E. B. Equações para estimar o estoque de carbono no fuste de árvores individuais e em plantios comerciais de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. i-f., 2005.

SOARES, R.V.; HOSOKAWA, R.T. Estimativa da Biomassa Energetica de Arvores de Bracatinga (*Mimosa Scabrella* Benth). **Boletim Técnico**, Brasília, v. 8, n. 1, p. 37-48, 1984.

STAPE, J.L. **Florestas plantadas: situação de cultivo, manejo e tendências**. In: Workshop on the sustainability of the brazilian pulp and paper industry. São Paulo: Ministério das Relações Exteriores, BRACELPA, 1997. (Palestra)

STATISTICAL PACKAGE FOR THE SOCIAL SCIENCE, **SigmaPlot for Windows**: version 2010. Chicago, USA. 2006.

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 Proceedings**. Madison, v.36, n.1, p. 143-147, 1972.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed., 2009. 819p.

THANACHIT, S; SUDDHIPRAKARN, A; KHEORUENROMNE, I, GILKES, R.J. The geochemistry of soils on a catena on basalt at Khon Buri, northeast Thailand. **Geoderma**, Amsterdam, 2005.p 81-96.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p.

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

TONINI, H. **Crescimento em altura de *Pinus elliottii* engelm., em três unidades de mapeamento de solo, nas regiões da serra do sudeste e litoral, no estado do Rio Grande do Sul**. 2000. 113p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2000.

TREVISAN, E.; REISSMANN, C. B.; KOEHLER, C. W.; LIMA, J. M. J. C. Morfologia dos horizontes orgânicos acumulados sob povoamento de *Pinus taeda* L., em três sítios distintos. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, Recife, v.9, n.1, p.59-62, 1987.

TREVISAN, E. **Classificação e Caracterização de Horizontes Orgânicos sob Povoamentos de *Pinus taeda* L na Região de Ponta Grossa - PR - 1ª Aproximação**. 1992. 111p. Dissertação (Mestre em Ciências) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1992.

VASQUES, A.G.; NOGUEIRA, A.S.; KIRCHNER, F.F.; BERGER, R. Uma síntese da contribuição do gênero pinus para o desenvolvimento sustentável no sul do Brasil. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 37, n. 3, p. 445-450, 2007.

VALE, A.T.; BRASIL, M.A.M.; CARVALGO, C.M.; VEIGA, R.A.A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. **Revista Cerne**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 33-88, 2000.

VALERI, S.V.; SOARES, R. do V.; MONTEIRO, R.F.F. Exportação de biomassa de povoamentos de *Pinus taeda* L. desbastados em diferentes idades. **Floresta**, Curitiba, v. 19, n. 1/2, p. 23-29, 1989.

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

VALERI, S.V.; REISSMANN, C.B. Composição da manta florestal sob povoamentos de *Pinus taeda* na região de Telêmaco Borba, PR. **Floresta**, Curitiba, v.19, n.1/2, p.55-61, 1989.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M.V. Concentração e retranslocação de nutrientes em acículas de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 375-382, 2009.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M.V. Teores e aporte de nutrientes na serapilheira de *Pinus taeda* L., e sua relação com a temperatura do ar e pluviosidade. **Revista Árvore**, Viçosa, v.34, n.1, p. 85-94, 2010.

VITAL, R.T. **Efeito do corte raso no balanço hídrico e na ciclagem de nutrientes em uma microbacia reflorestada com eucalipto**. 1996. 105p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

VITAL, A.R.T.; LIMA, W.P.; CAMARGO, F.R.A. Efeitos do corte raso de plantações de *Eucalyptus* sobre o balanço hídrico, a qualidade da água e as perdas de solo e de nutrientes em uma microbacia do Vale do Paraíba, SP. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.55, p.5-16, 1999.

VITOUSEK, P.M. Nutrient cycling and nutrient efficiency. **American Naturalist**, Chicago, n. 119, p. 553-572, 1982.

VITOUSEK, P.M.; SANFORD, R.L. Nutrient cycling in moist tropical forest. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Palo Alto, v. 17, p. 137-167, 1986.

VOGEL, H.L.M.; SCHUMACHER, M.V.; STORCK, L.; WITSCHORECK, R. Crescimento inicial de *Pinus taeda* L. relacionado a doses de N, P e K. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.15, n.1/2, p.199-206, 2005.

VOIGTLAENDER, M. **Caracterização hidrológica e biogeoquímica de microbacias: uma comparação entre Mata Atlântica e *Pinus taeda* L.** 2007. 74p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

WELTER, C.A. ; SCHUMACHER, M.V. ; MARAFIGA, J.A.S. ; SZYMCZAK, D.A. ; LOPES, V.G. ; VIERA, M. Produção de serapilheira em povoamento de *pinus taeda* no município de Quedas do Iguaçu - Pr. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 29., 2010, Guarapari. 1 CD-ROM (ISSN 0100-0683) / FERTBIO 2010: Fontes de nutrientes e produção agrícola: modelando o futuro, 2010.

WITSCHORECK, R. **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.** 2008. 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Santa Maria. Santa Maria, 2008.

ZAIA, F.C.; GAMA-RODRIGUES, A.C. Ciclagem e balanço de nutrientes em povoamentos de eucalipto na região norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.5, p.843-852, 2004.

ZEN, S.; YONEZAWA, J.T.; FELDEBERG, J.E. Implantação de florestas no sistema de cultivo mínimo. In: SEMINARIO SOBRE CULTIVO MINIMO NO SOLO EM FLORESTAS, 1., Curitiba, 1995. **Anais...**Piracicaba: NPF/IPEF/UNESP/SIF/FUPEF, 1995. p.65-72.

ZIEGLER, K; CHADWICH, O.A.; BRZEZINSKI, M.A.; KELLY, E.F. Natural variations of ^{30}Si ratios during progressive basalt weathering, Hawaiian Islands. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, London, v. 69,p. 4597-4610 2005.

ZOBEL,B.J.; VAN WYK,G.; STAHL,P. **Growing exotic plants**. New York: Wiley-Interscience, 1987. 528p.