

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

**RECOMENDAÇÃO DE FERTILIZANTES PARA
Eucalyptus saligna Sm. COM BASE NO BALANÇO
NUTRICIONAL NA REGIÃO DE GUAÍBA - RS**

TESE DE DOUTORADO

Rudi Witschoreck

Santa Maria, RS, Brasil

2014

**RECOMENDAÇÃO DE FERTILIZANTES PARA
Eucalyptus saligna Sm. COM BASE NO BALANÇO
NUTRICIONAL NA REGIÃO DE GUAÍBA - RS**

Rudi Witschoreck

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Silvicultura, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Florestal

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

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Witschoreck, Rudi

Recomendação de fertilizantes para *Eucalyptus saligna* Sm. com base no balanço nutricional na região de Guaíba - RS / Rudi Witschoreck.-2014.

85 f.; 30cm

Orientador: Mauro Valdir Schumacher

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2014

1. Produção de biomassa 2. Nutrição florestal 3. Ciclagem de nutrientes 4. Sustentabilidade nutricional
I. Schumacher, Mauro Valdir II. Título.

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**RECOMENDAÇÃO DE FERTILIZANTES PARA
Eucalyptus saligna Sm. COM BASE NO BALANÇO
NUTRICIONAL NA REGIÃO DE GUAÍBA - RS**

elaborada por
Rudi Witschoreck

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

COMISSÃO EXAMINADORA:

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

Francine Neves Calil, Dra. (UFG)

Hamilton Luiz Munari Vogel, Dr. (UNIPAMPA)

Márcio Viera, Dr. (UFSM)

Ivanor Müller, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 29 de agosto de 2014.

DEDICO

À minha filha, Maria Eduarda.

*Meus ramos no céu da emoção,
minhas raízes no solo da razão,
minha árvore, minha vida.*

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria, em especial ao Departamento de Ciências Florestais, onde realizei toda minha formação.

Ao Laboratório de Ecologia Florestal (LABEFLO) minha segunda casa.

Ao CNPq pela concessão de bolsa de estudos.

À Celulose Riograndense (CMPC) que possibilitou a realização deste trabalho, especialmente na pessoa do Engenheiro Florestal Elias Araújo.

Ao professor Mauro Valdir Schumacher pela orientação, amizade e constante incentivo.

Aos colegas de trabalho no Laboratório de Ecologia Florestal Vitor Hugo Braga dos Santos e Cristiano Kasdorf Giesbrecht pela amizade e companheirismo.

A todos os bolsistas, estagiários, pós-graduandos e funcionários com quem convivi no período que estive ligado ao Laboratório de Ecologia Florestal e que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação profissional e para a realização deste trabalho.

À minha família da qual tive que abrir mão do convívio em alguns momentos para realizar este trabalho.

À minha esposa Rachel Gonçalves de Oliveira pelo apoio incondicional e à minha filha Maria Eduarda Gonçalves Witschoreck que faz tudo valer a pena.

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

RECOMENDAÇÃO DE FERTILIZANTES PARA *Eucalyptus saligna* Sm. COM BASE NO BALANÇO NUTRICIONAL NA REGIÃO DE GUAÍBA - RS

AUTOR: RUDI WITSCHORECK

ORIENTADOR: Dr. rer. nat. techn. MAURO VALDIR SCHUMACHER

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 29 de agosto de 2014.

Este trabalho, realizado em povoamentos de *Eucalyptus saligna* Sm. de diferentes idades na região de Guaíba - RS, teve como objetivos: estimar e modelar a produção de biomassa; estimar o estoque de nutrientes e calibrar um sistema de recomendação de fertilização do solo baseado no balanço nutricional. Com base no inventário florestal, árvores de diâmetro médio foram coletadas e fracionadas em folha, galho, casca do tronco, madeira do tronco e raiz. A serapilheira acumulada foi avaliada com unidades amostrais de 1 m². Amostras dos componentes arbóreos e de serapilheira foram coletadas para estimativa da massa seca e da concentração de nutrientes. A modelagem de biomassa correlacionou variáveis dendrométricas com a biomassa dos componentes das árvores e a serapilheira acumulada. A biomassa por unidade de área foi estimada pelo produto entre a massa seca média de cada componente e o número de árvores por hectare, e no caso da serapilheira acumulada, em função da área das unidades amostrais. A produtividade primária líquida foi calculada contabilizando os sucessivos incrementos de biomassa acima e abaixo do solo e deposição de serapilheira. O estoque de nutrientes foi obtido pelo produto entre a biomassa média de cada componente e a concentração média de nutrientes. O sistema de recomendação de fertilização do solo foi estabelecido considerando a demanda de nutrientes em função da produtividade esperada e o suprimento de nutrientes no solo. Considerando a média dos povoamentos de diferentes idades, os principais componentes em acúmulo de biomassa foram: madeira do tronco > raiz > casca do tronco > galho > folha. Em valores relativos, somente a biomassa de madeira do tronco apresentou tendência crescente com a idade dos povoamentos. A produtividade primária líquida nos povoamentos entre 2 e 8 anos de idade foi de 40,3 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, sendo 86 % nos componentes acima do solo e 14 % abaixo do solo. Para a média dos povoamentos, o estoque de nutrientes apresentou a seguinte ordem de acúmulo: madeira do tronco > raiz > folha > casca do tronco > galho; e para nutrientes: Ca > N > K > Mg > P ~ S > Fe > Mn > B > Zn > Cu. O sistema de recomendação de fertilização para *Eucalyptus saligna* com base no balanço nutricional se mostrou eficiente no estabelecimento das doses de fertilizantes, estimando valores crescentes com a redução da fertilidade do solo e o aumento da produção esperada. Com base no sistema de recomendação de fertilizantes foi possível estabelecer a seguinte ordem de probabilidade de limitação nutricional da produtividade: P > K > N > Ca ~ Mg, nos povoamentos de *Eucalyptus saligna*.

Palavras-chave: Produção de Biomassa. Nutrição Florestal. Ciclagem de Nutrientes. Sustentabilidade Nutricional.

ABSTRACT

Doctor's Thesis
Post-Graduation Program in Forest Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

FERTILIZERS RECOMMENDATION FOR *Eucalyptus saligna* Sm. BASED ON THE NUTRITIONAL BALANCE IN THE REGION OF GUAÍBA - RS

AUTHOR: RUDI WITSCHORECK

ADVISER: Dr. rer. nat. techn. MAURO VALDIR SCHUMACHER

Date and Place of Defense: Santa Maria, August 29th, 2014.

This research conducted in different ages of *Eucalyptus saligna* Sm. stands in the region of Guaíba - RS, had as objectives: to estimate and model the biomass production; to estimate the nutrients stock and calibrate a fertilization recommendation system of soil based on the nutritional balance. On the basis of the forest inventory, trees of medium diameter were collected and fractionated in leaf, branch, bark, wood and root. The accumulated litter was evaluated with sampling units of 1 m². Samples of arboreal components and litter were collected to estimate the dry matter and nutritional content. The modeling of biomass correlated dendrometric variables with the biomass of components trees and the accumulated litter. The biomass per unit area was estimated through the product between the average dry matter of each component and the number of trees per hectare, and in the case of accumulated litter, based on area of sample units. The net primary productivity was calculated accounting for the successive increments of biomass above and below ground and litter fall. Nutrients stock was obtained through the product between the average biomass of each component and the average concentration of nutrients. The fertilization recommendation system of soil was established considering the demand of nutrients according to the expected productivity and the supply of nutrients in the soil. Considering the average of stands of different ages, the main components in biomass accumulation were: wood > root > bark > branch > leaf. In relative values, only wood showed increasing trend with age of stands. The net primary productivity in stands between 2 and 8 years of age was 40.3 Mg ha⁻¹ year⁻¹, and 80 % in the components above ground and 14 % below ground. For the average of stands, the stock of nutrients showed the following order of accumulation: wood > root > leaf > bark > branch; and for nutrients: Ca > N > K > Mg > P ~ S > Fe > Mn > B > Zn > Cu. The fertilization recommendation system for *Eucalyptus saligna* based on the nutritional balance was shown efficient in determining doses of fertilizers, estimating values increased with the reduction of soil fertility and the increase of production expected. Based on the fertilizer recommendation system was possible to establish the following order of probability of nutritional limitation productivity: P > K > N > Ca ~ Mg, in *Eucalyptus saligna* plantations.

Key-words: Biomass Production. Forestry Nutrition. Nutrient Cycling. Nutritional Sustainability.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Descrição dos procedimentos analíticos utilizados na determinação dos nutrientes, em amostras de tecido vegetal.	37
TABELA 2 – Níveis de fertilidade do solo utilizados para verificação do sistema de recomendação de fertilizantes e características dos procedimentos analíticos empregados nas análises de solo.	42
TABELA 3 – Estatísticas descritivas das variáveis dendrométricas e da biomassa individual (kg árvore^{-1}) para os povoamentos de <i>Eucalyptus saligna</i> na região de Guaíba - RS.	44
TABELA 4 – Equações de regressão para estimativa da biomassa individual dos diferentes componentes das árvores de <i>Eucalyptus saligna</i> e da serapilheira acumulada na região de Guaíba - RS.	46
TABELA 5 – Biomassa (Mg ha^{-1}) nos componentes arbóreos e na serapilheira acumulada, em povoamentos de <i>Eucalyptus saligna</i> de diferentes idades, na região de Guaíba - RS.	47
TABELA 6 – Produtividade primária líquida acima e abaixo do solo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) em povoamentos de <i>Eucalyptus saligna</i> na região de Guaíba - RS.	50
TABELA 7 – Estoque de macronutrientes (kg ha^{-1}) nos componentes arbóreos e na serapilheira acumulada, em povoamentos de <i>Eucalyptus saligna</i> de diferentes idades, na região de Guaíba - RS.	52
TABELA 8 – Estoque de micronutrientes (g ha^{-1}) nos componentes arbóreos e na serapilheira acumulada, em povoamentos de <i>Eucalyptus saligna</i> de diferentes idades, na região de Guaíba - RS.	55
TABELA 9 – Equações de regressão para estimativa da eficiência de utilização dos nutrientes no tronco em plantios de <i>Eucalyptus saligna</i> entre 2 e 7 anos de idade.	64
TABELA 10 – Equações de regressão para estimativa da biomassa individual (kg árvore^{-1}) dos diferentes componentes das árvores de <i>Eucalyptus saligna</i> e da serapilheira acumulada entre 2 e 7 anos de idade.	65
TABELA 11 – Equações de regressão para estimativa do conteúdo de nitrogênio (g árvore^{-1}) dos diferentes componentes das árvores de <i>Eucalyptus saligna</i> e da serapilheira acumulada entre 2 e 7 anos de idade.	66

- TABELA 12 – Equações de regressão para estimativa do conteúdo de fósforo (g árvore⁻¹) dos diferentes componentes das árvores de *Eucalyptus saligna* e da serapilheira acumulada entre 2 e 7 anos de idade.67
- TABELA 13 – Equações de regressão para estimativa do conteúdo de potássio (g árvore⁻¹) dos diferentes componentes das árvores de *Eucalyptus saligna* e da serapilheira acumulada entre 2 e 7 anos de idade.68
- TABELA 14 – Equações de regressão para estimativa do conteúdo de cálcio (g árvore⁻¹) dos diferentes componentes das árvores de *Eucalyptus saligna* e da serapilheira acumulada entre 2 e 7 anos de idade.69
- TABELA 15 – Equações de regressão para estimativa do conteúdo de magnésio (g árvore⁻¹) dos diferentes componentes das árvores de *Eucalyptus saligna* e da serapilheira acumulada entre 2 e 7 anos de idade.70

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Localização dos povoamentos de <i>Eucalyptus saligna</i>	32
FIGURA 2 – Principais solos representativos da área do estudo.....	33
FIGURA 3 – Organograma do modelo conceitual do sistema de recomendação de fertilização com base no balanço de nutrientes.	38
FIGURA 4 – Distribuição relativa da biomassa em função da idade dos povoamentos de <i>Eucalyptus saligna</i> na região de Guaíba - RS.	49
FIGURA 5 – Distribuição relativa de macronutrientes nos povoamentos de <i>Eucalyptus saligna</i> entre 2 e 7 anos de idade, na região de Guaíba - RS.	54
FIGURA 6 – Distribuição relativa de micronutrientes nos povoamentos de <i>Eucalyptus saligna</i> entre 2 e 7 anos de idade, na região de Guaíba - RS.	57
FIGURA 7 – Taxas de exportação de nutrientes em função do método de colheita da biomassa nos povoamentos de <i>Eucalyptus saligna</i> com 7 anos de idade, na região de Guaíba - RS.....	60
FIGURA 8 – Intervalo de confiança ($p = 0,05$) para a EUN no tronco nos povoamentos de <i>Eucalyptus saligna</i> entre 2 e 7 anos de idade, na região de Guaíba - RS.	62
FIGURA 9 – Estimativa das doses de fertilizantes (kg ha^{-1}) para <i>Eucalyptus saligna</i> na região de Guaíba - RS, em função do teor de nutrientes no solo e da produtividade esperada.	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

PPB - produtividade primária bruta (fotossíntese total)
PPL - produtividade primária líquida (fotossíntese líquida)
PLE - produtividade líquida do ecossistema
PPLAS - produtividade primária líquida acima do solo
PPLR - produtividade primária líquida de raiz
Re - respiração do ecossistema
Ra - respiração autotrófica
Rh - respiração heterotrófica
BAS - biomassa acima do solo
BT - biomassa do tronco (casca e madeira)
BR - biomassa de raiz
BS - biomassa de serapilheira (acumulada)
PS - produção de serapilheira
EUN - eficiência de utilização de nutrientes (tronco)
Mg - megagrama (1000000 g)
ha - hectare (10000 m²)
d (dap) - diâmetro à altura do peito (1,30 m em relação ao solo)
h - altura total
v - volume do tronco com casca
t - idade
C - carbono
N - nitrogênio
P - fósforo
K - potássio
Ca - cálcio
Mg - magnésio
S - enxofre
B - boro
Cu - cobre
Fe - ferro
Mn - manganês
Zn - zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Produtividade e alocação de biomassa florestal.....	16
2.2 Nutrientes na biomassa florestal	22
2.3 Ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais	24
2.4 Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilização.....	30
3 MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1 Localização da área do estudo	32
3.2 Clima e solo da área do estudo.....	32
3.3 Procedimento de campo.....	34
3.4 Estimativa de biomassa.....	35
3.5 Modelagem de equações de regressão de biomassa	36
3.6 Análise química e estimativa do estoque de nutrientes na biomassa.....	37
3.7 Modelagem do sistema de recomendação de fertilização do solo	38
3.7.1 Modelagem de equações de regressão	40
3.7.2 Verificação do sistema de recomendação de fertilizantes.....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 Produção e partição de biomassa	44
4.2 Estoque de nutrientes.....	51
4.3 Sistema de recomendação de fertilizantes	60
5 CONCLUSÕES	74
SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1 INTRODUÇÃO

A expressão do potencial produtivo de uma espécie vegetal (fixado geneticamente) depende de fatores externos de natureza edáfica, climática e biológica, passíveis ou não de manejo.

Os ecossistemas florestais, naturais ou implantados, são abertos e sujeitos a entradas e saídas de radiação, CO₂, água e nutrientes (fatores de produção), os quais determinam a produtividade vegetal (BINKLEY, 1986). Em povoamentos florestais, tanto a produção como a manutenção da capacidade produtiva depende da espécie (capacidade de obter e utilizar os recursos) associado ao manejo adequado dos fatores de produção (BINKLEY et al., 1997).

Juntamente com a água, os nutrientes são os fatores ambientais que mais limitam a produtividade primária (LAMBERS et al., 2008). A produtividade de todos os ecossistemas responde a adição de um ou mais nutrientes, o que indica uma ampla limitação nutricional (CHAPIN III et al., 2002; EPSTEIN e BLOOM, 2006; LAMBERS et al., 2008).

Diferentemente da radiação solar que tem uma entrada relativamente constante nos ecossistemas, partindo de uma fonte que pode ser convenientemente considerada inesgotável, os nutrientes são finitos e suas reservas dependem da ciclagem nos ecossistemas (KIMMINS, 1987).

Entre os fatores de produção, os aspectos ligados a nutrição certamente são os que apresentam o maior potencial de manejo, seja pela capacidade de limitar a produtividade, seja pela ampla gama de insumos industrializados e resíduos que podem ser utilizados na fertilização e correção do solo, além de as inúmeras práticas de manejo que visam a manutenção da capacidade produtiva dos sítios florestais.

Apesar do uso generalizado de fertilizantes em plantios comerciais, em muitos casos, esta prática é feita sem critérios o que além do insucesso econômico representa sérios riscos ambientais. Segundo Barros et al. (2004), mesmo para culturas agrícolas, apesar de décadas de pesquisa, o procedimento para recomendação de fertilização do solo ainda é bastante aproximativo.

Muitas questões envolvem o uso eficiente de fertilizantes minerais, entre eles: o conhecimento da demanda nutricional do genótipo (eficiência de utilização dos nutrientes), doses adequadas e nutrientes a serem aplicados, além da época e

forma de aplicação principalmente quanto à localização em relação à planta (BARROS et al., 1990a, BARROS et al., 2004).

A recomendação de fertilização para essências florestais acabou seguindo o modelo desenvolvido para as culturas agrícolas (espécies anuais). Mas segundo Attiwill e Weston (2001), existe uma diferença essencial na disponibilidade de nutrientes entre solos agrícolas e florestais. Exceto pelo nitrogênio, que tem sua disponibilidade direcionada por processos biológicos em todos os solos, a disponibilidade de nutrientes, em solos agrícolas, trata-se de uma preocupação imediata (em curto prazo), dirigida principalmente por equilíbrios inorgânicos sobre semanas ou meses. Por outro lado, em solos florestais, é uma questão de longo prazo, conduzida por processos biológicos e equilíbrios inorgânicos que decorrem em anos e séculos (ATTIWILL e WESTON, 2001).

Características como ciclo longo de cultivo, quando comparado com culturas agrícolas, o que potencializa os ciclos geoquímicos; diferentes fases nutricionais; intensa remobilização de nutrientes (ciclagem bioquímica); fluxos de nutrientes entre compartimentos (ciclagem biogeoquímica); elevado acúmulo de biomassa (que acarreta grande exportação pontual de nutrientes por ocasião da colheita florestal) e um grande volume de resíduos pós-colheita; entre outras, tornam a relação solo-planta ainda mais complexa no tocante ao manejo nutricional em povoamentos florestais (REIS e BARROS, 1990; MILLER, 1995; FÖLSTER e KHANNA, 1997; GONÇALVES et al., 2004).

Considerando a complexa dinâmica de nutrientes que se estabelece ao longo do ciclo produtivo dos povoamentos florestais, este trabalho tem como objetivo geral obter subsídios para o manejo nutricional dos plantios de *Eucalyptus saligna*, dentro de uma abordagem ecossistêmica (visando a manutenção ou o aumento da produtividade) considerando para isso os seguintes objetivos:

1. Estudar o padrão de produção de biomassa do *Eucalyptus saligna*:
 - a. Produção e partição de biomassa acima e abaixo do solo e serapilheira acumulada.
 - b. Modelagem da biomassa dos componentes arbóreos e da serapilheira acumulada, em função de variáveis dendrométricas.
 - c. Produtividade primária líquida acima e abaixo do solo.

2. Estimar o estoque de nutrientes nos componentes arbóreos e na serapilheira acumulada.
3. Calibrar um sistema de recomendação de fertilização do solo baseado no balanço nutricional, considerando a demanda em função de diferentes níveis produtivos e a oferta das diferentes fontes do sistema:
 - a. Modelagem da produção de biomassa e do acúmulo de nutrientes nos diferentes componentes arbóreos e na serapilheira acumulada em função da idade dos povoamentos.
 - b. Modelar a eficiência de utilização dos nutrientes (EUN) no tronco em função da idade dos povoamentos e dos níveis de produção.
4. Avaliar a resposta do sistema de recomendação de fertilizantes para *Eucalyptus saligna* considerando diferentes níveis de produção (demanda de nutrientes) e condições de fertilidade do solo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Produtividade e alocação de biomassa florestal

O balanço de carbono (C) da vegetação e dos ecossistemas regula a produtividade da biosfera (LARCHER, 2000; CHAPIN III et al., 2002). A pequena fração da energia radiante (2 – 4 %) que é transformada em compostos orgânicos, que perfazem em torno de 95 % da biomassa (BEGON et al., 2006), é chamada de produtividade primária bruta (PPB) ou fotossíntese total (WARING e SCHLESINGER, 1985; ODUM, 1988; BINKLEY et al., 1997).

A produtividade líquida de um ecossistema (PLE) é a diferença entre PPB e a respiração do ecossistema (Re) que inclui a respiração autotrófica (Ra) e a respiração heterotrófica (Rh) (oxidação da matéria orgânica na superfície e no interior do solo – decomposição); assumindo que não ocorram outras perdas como colheita de biomassa, fogo, lixiviação, erosão e outras exportações (WARING e SCHLESINGER, 1985; CHAPIN III et al., 2002). Quando PPB excede Re o ecossistema fixa C e atua como um dreno de C, do contrário, quando Re excede PPB, o C é liberado mais rapidamente do que é fixado, e o ecossistema é considerado fonte de C (LANDSBERG e GOWER, 1997; BEGON et al., 2006).

A produtividade primária líquida (PPL) ou fotossíntese líquida é o ganho líquido de C pela vegetação (taxa real de produção da biomassa) o que equivale à diferença entre a PPB e a respiração da vegetação (Ra) (LARCHER, 2000; SCHULZE et al., 2002), que corresponde a cerca da metade do carbono absorvido pela planta (BRESINSKY et al., 2012).

No entanto, a campo, não é possível a mensuração direta e precisa da PPB e da PPL florestal (WARING e SCHLESINGER, 1985; CLARK et al., 2001). Alternativamente, a PPL é definida como o total de matéria orgânica produzida durante um intervalo de tempo (CLARK et al., 2001), ou ainda, a biomassa remanescente após a subtração da respiração (BINKLEY et al., 1997). A PPL inclui a nova biomassa produzida pela planta e acumulada nos diferentes órgãos acima do solo, inclusive a matéria orgânica perdida (serapilheira), que compõe a PPL acima

do solo, produção e morte de raízes e compostos orgânicos solúveis que são difundidos ou secretados, o C transferido para microrganismos que estão associados simbioticamente com as raízes (micorrizas e bactérias fixadoras de nitrogênio), lixiviação e volatilização de compostos orgânicos e perdas de matéria orgânica por herbívoros acima e abaixo do solo (CLARK et al., 2001; CHAPIN III et al., 2002). Desse modo, A PPL acima do solo (PPLAS) omite a produtividade dos componentes abaixo do solo e a PPL do tronco omite a produção de folhas e galhos (BINKLEY et al., 1997).

Os valores da PPL normalmente são expressos por unidade de área e tempo ($\text{g m}^{-2} \text{ano}^{-1}$ e t ou $\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), geralmente em biomassa, C (46 – 50 % da biomassa segundo Bresinsky et al., 2012), ou energia (CHAPIN III et al., 2002; WARING e SCHLESINGER, 1985). A maioria dos estudos que estimam a PPL considera apenas a nova biomassa produzida, por isso, provavelmente ocorra uma subestimativa da verdadeira PPL de pelo menos 30 % (CHAPIN III et al., 2002). No entanto, esse desvio na estimativa da PPL não interfere nos estudos que estimam as taxas de incremento de biomassa, mas são importantes para a dinâmica global do C nos ecossistemas e pode comprometer estudos que avaliam, por exemplo, decomposição e ciclagem de nutrientes (CHAPIN III et al., 2002).

A produtividade dos plantios florestais em áreas tropicais é muito dinâmica e apresenta grandes mudanças com a idade do povoamento (estágio de desenvolvimento), fertilidade do solo, densidade de plantio e espécie (BINKLEY et al., 1997).

O padrão de crescimento e acúmulo de biomassa em povoamentos florestais caracteriza-se por um acentuado declínio na produtividade após um ponto de máximo, que ocorre relativamente cedo ao longo do ciclo produtivo. O declínio na produtividade sempre ocorre, podendo variar na intensidade e no tempo, mas, geralmente, é mais precoce e intenso em povoamentos mais produtivos (RYAN et al., 1997; BINKLEY et al., 1997). Inicialmente o crescimento é lento, aumentando com o desenvolvimento da superfície foliar (atingindo seu máximo com o ápice da área foliar) e então declina ao longo da maior parte do ciclo produtivo (RYAN et al., 1997).

Apesar da importância para o balanço global de C (florestas como dreno ou fonte de C), predição da resposta das florestas as mudanças climáticas, ciclagem de nutrientes e sustentabilidade de produção dos plantios florestais; as causas do

declínio da produtividade florestal com a idade ainda não são totalmente compreendidas (GOWER et al., 1996; RYAN et al., 1997).

Ryan et al. (1997) examinaram os processos que provocam as mudanças na produtividade com a idade dos povoamentos florestais, e consideraram as seguintes teorias: aumento da respiração com o aumento da biomassa; aumento da resistência hidráulica em grandes árvores; decréscimo do suprimento de nutrientes; redução da área foliar; incremento da mortalidade em árvores velhas; aumento do consumo de recursos para fins reprodutivos e mudanças fisiológicas associadas com a idade dos tecidos. Ryan et al. (1997) concluíram que a síndrome do declínio da produtividade com o desenvolvimento dos povoamentos florestais apresenta grande consistência com a redução da área foliar e a diminuição da capacidade fotossintética com a idade das árvores.

Os carboidratos remanescentes após a respiração (PPL) podem ser alocados para suporte (raízes grossas, madeira do tronco e galhos), captura de luz (folhas), absorção de nutrientes (raízes finas, exsudação das raízes e micorrizas), reprodução (frutos e sementes) e armazenamento (células de parênquima, raízes finas e folhas) (RYAN et al., 1997). A proporção do carbono fixado que é alocada nos diferentes componentes das árvores determina o padrão de crescimento, seu potencial para futuros crescimentos e sua habilidade para competir por recursos e tolerar estresses ambientais (LANDSBERG e GOWER, 1997).

O começo do desenvolvimento dos povoamentos florestais é marcado pela desproporcional quantidade de carboidratos alocados para a produção de folhas. Com o desenvolvimento do povoamento a biomassa relativa de tronco (madeira) aumenta, enquanto a biomassa de folhas e galhos decresce (PEREIRA et. al., 1984a; WARING e SCHLESINGER, 1985; MILLER, 1995; LARCHER, 2000, GONÇALVES et al., 2004; SCHUMACHER et al., 2011).

Schumacher et al. (2011), estudando alocação de biomassa em povoamentos de *Eucalyptus* spp. de diferentes idades, constataram aumento na alocação de biomassa na madeira do tronco, passando de 47 % aos 2 anos de idade para 74,4 % aos 8 anos, enquanto diminuiu a biomassa relativa dos demais componentes.

O desenvolvimento dos povoamentos florestais pode ser dividido em dois estágios nutricionais: antes e depois do fechamento das copas. Durante a fase de adaptação a campo, normalmente um a três meses pós-plantio, as taxas de acúmulo

de nutrientes são pequenas. Para assegurar o suprimento de água e nutrientes, as mudas alocam grande proporção de fotoassimilados e nutrientes na copa para síntese de raízes; o que pode ocasionar perda do vigor e provocar sintomas de deficiência nutricional. Após a plena adaptação das plantas no campo, segue-se uma fase de intenso crescimento e acúmulo de nutrientes, com prioridade de alocação dos fotoassimilados na copa e sistema radicular (principalmente raízes finas). Após o fechamento das copas, o acúmulo de biomassa e nutrientes ocorre com mais intensidade no tronco, uma vez que a copa atingiu uma fase de relativa estabilidade, provocada pelo autossombreamento que impõe um limite à área foliar máxima (GONÇALVES et al., 2004).

Na fase inicial de crescimento a maioria da PPL é direcionada para o crescimento de biomassa viva, especialmente o desenvolvimento da copa das árvores e a ciclagem nutricional é dominada pela absorção de nutrientes. Esta fase é seguida por um período onde os fotossintatos são direcionados primariamente para o crescimento de tecidos lenhosos e a redistribuição interna de nutrientes torna-se importante para satisfazer o requerimento de nutrientes para o crescimento. Finalmente, durante o estágio de manutenção do povoamento, a maioria da PPL é descartada na forma de serapilheira e a ciclagem biogeoquímica de nutrientes através da decomposição dos resíduos da planta torna-se cada vez mais importante para o suprimento de nutrientes das árvores (ATTIWILL e LEEPER, 1987).

O padrão de alocação de biomassa visa otimizar a distribuição entre folhas (maximizar o ganho de carbono – PPL) e raízes (maximizar a aquisição de recursos abaixo do solo) (CHAPIN III et al., 2002). Nos povoamentos florestais (árvores com a mesma idade) a prioridade no desenvolvimento é atingir o mais rápido possível a dominância, o que acarreta uma máxima produção de folhas; tecidos lenhosos somente proveem a estrutura para dispor o máximo em área foliar (WARING e SCHLESINGER, 1985; MILLER, 1995; LARCHER, 2000; GONÇALVES et al., 2004). Como um rápido crescimento em área foliar requer um suprimento adequado de água e nutrientes, é esperado um desenvolvimento paralelo da biomassa de raízes finas (MILLER, 1995), principal responsável pela absorção de água e nutrientes (LANDSBERG e GOWER, 1997).

O padrão de alocação de carbono também é afetado por vários fatores ambientais (LANDSBERG e GOWER, 1997; BINKLEY et al., 1997). A fertilidade do solo influencia fortemente o crescimento de folhas, especialmente de novas folhas. Como a concentração de nitrogênio é maior nas folhas do que nos outros tecidos da planta, a fertilização com esse nutriente tende a aumentar a alocação de carbono para esse componente (LANDSBERG e GOWER, 1997).

O ciclo do carbono é fortemente interligado com a água e a ciclagem de nutrientes e qualquer mudança na umidade do solo ou nutrição ao longo do desenvolvimento florestal pode alterar a absorção e alocação de carbono (RYAN et al., 1997).

Em geral as plantas alocam a produção para minimizar a limitação de um determinado recurso (CHAPIN III et al., 2002). Assim, as plantas alocam mais biomassa para as raízes quando água e nutrientes limitam o crescimento (RYAN et al., 1997), assim como, priorizam a formação de novas brotações quando a luz é o fator limitante. As plantas podem, por exemplo, aumentar o ganho de carbono aumentando a área foliar ou a taxa fotossintética por unidade de área foliar ou pela retenção das folhas por um maior tempo (RYAN et al., 1997; CHAPIN III et al., 2002). Do mesmo modo, a planta pode aumentar a absorção de nitrogênio pela alteração da morfologia das raízes ou pelo aumento da biomassa radicular, longevidade das raízes, absorção de nitrogênio por unidade radicular ou extensão da colonização por micorrizas (CHAPIN III et al., 2002).

A biomassa de raízes finas (geralmente classificadas como menores que 2, 3 ou 5 mm de diâmetro), responsáveis pela absorção de água e nutrientes, é grandemente afetada pela disponibilidade de água e nutrientes (GONÇALVES et al., 2004). Reis et al. (1985), em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis*, estimaram a biomassa relativa do sistema radicular, em duas áreas com diferentes níveis de produtividade (baixa fertilidade e maior deficiência hídrica), em 13,2 % e 32 %, respectivamente, para a área de maior e de menor produtividade; enquanto a biomassa de raízes finas (diâmetro menor do que 3 mm) foi 2,6 vezes maior no sítio menos produtivo. Em função da maior alocação de fotoassimilados para o sistema radicular, a biomassa de madeira do tronco foi de 62,9 % e 45,8 %, nos sítios de maior e menor produtividade, aos 73 meses e 67 meses pós-plantio, respectivamente (REIS et al., 1985).

Plantios florestais mais adensados apresentam maior produtividade em função do desenvolvimento mais rápido da área superficial de folhas e raízes, redução da competição por plantas invasoras e talvez em função dos fatores estruturais da copa (BINKLEY et al., 1997).

Leite et al. (1997) avaliaram o crescimento de *Eucalyptus grandis* em função do aumento da densidade de plantio (500 a 5000 plantas por hectare), e constataram aumento do índice de área foliar, área foliar específica ($\text{dm}^2 \text{g}^{-1}$) e densidade de fluxo de fótons fotossinteticamente ativos interceptados ($\mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$), e redução na profundidade de copa e na área foliar por planta. A maior produção de biomassa foi verificada nos povoamentos mais adensados, porém, com menor produção individual.

Ladeira et al. (2001) estudaram o efeito da densidade de plantio sobre a distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pellita* e *Eucalyptus urophylla*, aos 15, 31, 41 e 84 meses pós-plantio, nos espaçamentos 3 m x 1,5 m, 3 m x 3 m e 3 m x 4 m, e verificaram diferença em função da idade, espécies e espaçamentos. À medida que houve incremento da densidade populacional, a produção de biomassa total por planta diminuiu, mas a produção por unidade de área aumentou, com elevação da biomassa relativa de tronco. A alocação de biomassa para o tronco aumentou em função da idade em detrimento de galhos e folhas. Quanto às espécies, o *Eucalyptus camaldulensis* se mostrou a menos responsiva a mudanças no espaçamento, enquanto *Eucalyptus urophylla* apresentou maior acúmulo de biomassa total em todos os espaçamentos.

Assis et al. (1999) constataram para *Eucalyptus urophylla*, que para uma mesma densidade populacional, a biomassa das plantas diminuiu quando se combinam, em arranjos diferentes, maiores espaçamentos na entrelinha com menores espaçamentos na linha de plantio.

A diferença na produção total de biomassa entre diferentes espaçamentos apresenta tendência decrescente com a idade pós-plantio, possivelmente até atingir uma produção máxima de biomassa limitada pela capacidade produtiva do sítio (LEITE et al., 1997; LADEIRA et al., 2001).

Santana et al. (2008) constataram que a inclusão de variáveis climáticas em modelos para a estimativa de biomassa em plantios de eucalipto no Brasil foi fundamental para distinção do acúmulo de biomassa entre as diferentes regiões estudadas. Esses autores também verificaram que a produção de biomassa foi

menor nas regiões com déficit de água, sendo a maior produtividade três vezes superior a menor.

As espécies diferem na habilidade de crescerem sobre condições específicas de sítio. As causas ecofisiológicas da diferença de produtividade entre espécies provavelmente inclui a habilidade de obter recursos (luz, água e nutrientes), bem como, a eficiência de uso desses recursos para produzir biomassa (BINKLEY et al., 1997). Nesse sentido, Silva et al. (1983b), avaliaram aos 10 anos pós-plantio, um ensaio de competição envolvendo cinco espécies de eucalipto, em solo arenoso de baixa fertilidade, e constataram diferenças expressivas no estoque de nutrientes, produção e alocação de biomassa. A maior produção de biomassa de tronco, em Mg ha^{-1} , foi observada para *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*, 184,2 e 183,6, respectivamente, seguidos por *Eucalyptus dunnii* com 140,5, *Eucalyptus robusta* com 134,1 e *Eucalyptus propinqua* com apenas 103,2.

2.2 Nutrientes na biomassa florestal

Em análises detalhadas de tecido vegetal é possível detectar praticamente todos os elementos químicos de ocorrência natural, distribuídos sob diferentes concentrações, mas nem todos são considerados essenciais ao desenvolvimento das plantas (KIMMINS, 1987; EPSTEIN e BLOOM, 2006; PALLARDY, 2008). Como as plantas não realizam um controle seletivo absoluto sobre a absorção de nutrientes, é possível encontrar concentrações elevadas de elementos químicos não-essenciais e até mesmo tóxicos na biomassa vegetal (MENGEL e KIRKBY, 1982; MALAVOLTA et al., 1997; EPSTEIN e BLOOM, 2006).

Para que um nutriente seja considerado essencial, na sua ausência a planta não completa o seu estágio vegetativo ou reprodutivo de seu ciclo de vida; a essencialidade deve ser específica para o nutriente em questão (não pode ser substituído por outro com propriedades similares) e por fim, o nutriente deve estar diretamente envolvido na nutrição da planta, por exemplo, como um constituinte de um metabolito, enzima ou participando de uma reação enzimática (ARNON e STOUT, 1939; MALAVOLTA et al., 1997).

Os nutrientes essenciais, para as plantas superiores, podem ser separados em dois grupos: os macronutrientes, carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), encontrados em maior concentração no tecido vegetal e necessários em maior quantidade pelas plantas, quando comparados aos micronutrientes, boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cloro (Cl) e molibdênio (Mo) (MENGEL e KIRKBY, 1982; MARSCHNER, 1995; MALAVOLTA et al., 1997; EPSTEIN e BLOOM, 2006).

Os micronutrientes são predominantemente componentes de moléculas de enzimas; enquanto os macronutrientes, além disso, são constituintes de compostos orgânicos como açúcares, proteínas, ácidos nucleicos ou ação osmótica (MARSCHNER, 1995). Essas diferentes funções se refletem na concentração média dos nutrientes suficientes para um adequado crescimento vegetal (MARSCHNER, 1995).

A classificação em macro e micronutrientes, além de incoerente do ponto de vista fisiológico, é um pouco arbitrária, porque em muitos casos a concentração entre alguns macronutrientes e micronutrientes é praticamente a mesma (MENGEL e KIRKBY, 1982). Assim como a simples presença de um elemento químico na biomassa vegetal não garante sua essencialidade, a concentração deste não é um indicativo seguro da sua necessidade quantitativa (MENGEL e KIRKBY, 1982). Aproximadamente 95 % da biomassa das plantas (em massa seca) é composta por carbono (C), oxigênio (O) e hidrogênio (H), elementos que são abundantes como dióxido de carbono e água. O restante é composto, principalmente, pelos macro e micronutrientes (MENGEL e KIRKBY, 1982; BINKLEY, 1986). Como C, O e H são abundantes, eles geralmente não são considerados dentro da nutrição e na ciclagem de nutrientes (BINKLEY, 1986; KIMMINS, 1987). Os demais macronutrientes, na maioria das vezes, são os que limitam o crescimento vegetal, principalmente N e P, enquanto os micronutrientes, porque são utilizados em menores quantidades, geralmente só limitam o crescimento em condições especiais (WARING e SCHLESINGER, 1985; BINKLEY, 1986).

Os nutrientes são de extrema importância para o desenvolvimento vegetal porque eles possibilitam a construção da matéria orgânica (fotossíntese) (MENGEL e KIRKBY, 1982).

A concentração de nutrientes nos componentes da biomassa está relacionada com suas funções, apresentando, geralmente, o seguinte gradiente: folha > casca > ramo > tronco (alburno > cerne) (BELLOTE e SILVA, 2004). As folhas apresentam as maiores concentrações de nutrientes porque são o grande centro metabólico da planta (MARSCHNER, 1995). Por outro lado, os tecidos lenhosos (p. ex. madeira e galhos), com função estrutural e de condução, apresentam as menores concentrações nutricionais (BINKLEY, 1986).

Os principais fatores que controlam a concentração de nutrientes na biomassa são a espécie, fixado geneticamente; a disponibilidade de nutrientes no meio; tipo de tecido vegetal (órgão), partes vegetativas apresentam uma maior variação na concentração de nutrientes, quando comparadas com partes reprodutivas (frutos, sementes), prioridade de alocação; e a idade do tecido, geralmente tecidos novos apresentam maior concentração de N, K e P, enquanto tecidos velhos concentram mais Ca, Mn, Fe e B (MENGEL e KIRKBY, 1982).

2.3 Ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais

Os ecossistemas florestais, naturais e implantados, e os organismos são sistemas termodinâmicos abertos, fora do ponto de equilíbrio, que trocam continuamente energia e matéria com o ambiente (ODUM, 1988; LEUSCHNER, 2005).

Os elementos químicos e compostos inorgânicos tendem a circular na biosfera em vias características (ciclos biogeoquímicos), do ambiente aos organismos e destes, novamente, ao ambiente; o que no seu conjunto é chamado de ciclagem de nutrientes (ODUM, 1988). Odum (1988), ainda faz uma divisão dos ciclos biogeoquímicos em dois compartimentos (*pools*): o compartimento reservatório, que é maior, de movimento lento e geralmente não biológico; e o compartimento lábil ou de ciclagem, que representa uma parcela menor, porém mais ativa e permutável entre os organismos e o ambiente. Do ponto de vista global, os ciclos biogeoquímicos se classificam em dois grupos básicos: os tipos gasosos, nos quais o reservatório está situado na atmosfera ou na hidrosfera (p. ex. C, N, O); e os

tipos sedimentares, nos quais o reservatório localiza-se na crosta terrestre (p. ex. P e Fe) (ODUM, 1988).

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

Outros autores, como Waring e Schlesinger (1985), atribuem à ciência biogeoquímica, os estudos dos processos químicos que ocorrem na atmosfera, oceanos e nos ecossistemas terrestres, e a transferência de elementos químicos entre esses compartimentos. Esses autores separam em ciclos, inter e intrassistema, as transferências de nutrientes entre e dentro de um ecossistema.

A semelhança de Odum (1988), Kimmins (1987), sugere a divisão da ciclagem geoquímica (ou ciclo geológico) em ciclos gasoso e sedimentar. Segundo este, enquanto poucos elementos químicos são envolvidos no ciclo gasoso, todos os elementos químicos participam do ciclo sedimentar. Os ciclos sedimentares envolvem diferentes mecanismos de movimentação: meteorológicos, precipitações atmosfera e erosões; biológicos, resultantes da migração de animais, formação de guano e aplicação de fertilizantes; e geológicos/hidrológicos, mineralização das rochas e dissolução de nutrientes e transporte pelos cursos d'água (KIMMINS, 1987).

As entradas de nutrientes podem ser através das deposições atmosféricas, intemperismo geológico (*weathering of rock and mineral*), fixação biológica de nitrogênio e fertilização, enquanto as saídas incluem a volatilização pelas queimadas ou pela desnitrificação, lixiviação e erosão hídrica e eólica, assim como, pela colheita da biomassa (WARING e SCHLESINGER, 1985; KIMMINS, 1987; PRITCHETT, 1990; FÖLSTER e KHANNA, 1997; PALLARDY, 2008).

As florestas podem receber nutrientes por meio de deposições úmidas, dissolvidos na chuva, orvalho, nevoa e na neve; e deposições secas, na forma de aerossóis e poeira, resultantes da sedimentação gravitacional de partículas durante o período sem chuva (WARING e SCHLESINGER, 1985; PALLARDY, 2008).

Nos ambientes tropicais, em função da maior intensidade de descargas elétricas na atmosfera, há uma entrada maior de nitrogênio. Os relâmpagos contêm

a energia necessária para quebrar a ligação tripla covalente, extremamente estável do nitrogênio, presente em 78 % em volume da atmosfera (EPSTEIN e BLOOM, 2006). Segundo esses autores, da fixação natural de nitrogênio (atmosférica mais biológica), 8 % são devidas a descargas elétricas na atmosfera, 2 % são da fixação natural da reação fotoquímica entre o óxido nítrico gasoso e o ozônio, que produz ácido nítrico, e os 90 % restantes, são devidas à fixação biológica por bactérias, que convertem o nitrogênio molecular em amônia.

A atmosfera contém traços de gases, particularmente formas oxidadas de N e S, originados de atividades naturais e antrópicas, que são fontes de nutrientes para os ecossistemas terrestres. O aerossóis de origem marinha possuem importantes constituintes químicos da água do mar, especialmente Na, Mg, Cl e sulfato (WARING e SCHLESINGER, 1985). Quase toda a entrada de N, S e Cl em ecossistemas florestais são derivadas da atmosfera (LIKENS et al., 1981; WARING e SCHLESINGER, 1985).

Alguns cátions como Na tem como origem o sal marinho, particularmente em regiões costeiras, mas outros nutrientes como Ca, Mg, P, K entram no ecossistema pela deposição de poeira proveniente de desertos, áreas agrícolas e estradas não pavimentadas e da poluição industrial (LAMBERS et al., 2008). No entanto, as adições atmosféricas de Ca, K e Mg para os ecossistemas florestais tem como origem principal aerossóis formados nos oceanos e terras agrícolas (PRITCHETT, 1990).

A deposição atmosférica de P é considerada menor, mas pode ser importante em biomas com extrema limitação por esse nutriente (LAMBERS et al., 2008).

Para Fölster e Khanna (1997) as deposições atmosféricas de nutrientes podem ser afetadas por fatores ambientais como a proximidade de oceanos, vulcões e áreas com queimadas regulares, com estimativas (em $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) variando entre 2 - 10 para N, 2 - 8 para K, 2 - 12 para Ca e 1 - 5 para Mg.

Switzer e Nelson (1972) relataram uma entrada via precipitação pluviométrica em plantio de *Pinus taeda* no Mississippi de 13,3 para N, 0,3 para P, 4,0 para K, 5 para Ca e 1 para Mg, em $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$.

Segundo Waring e Schlesinger (1985) a mineralização das rochas é a fonte dominante de nutrientes como Ca, Mg, K, Fe e P. Enquanto Attiwill e Leeper (1987),

sugere que, excetuando-se o N, os nutrientes usados pelas plantas têm como principal origem a mineralização das rochas e minerais primários presentes no solo.

No entanto, de modo geral, nas regiões tropicais, a entrada de nutrientes via mineralização das rochas é tida como pouco expressiva, devido ao alto grau de intemperismo desses solos (REIS e BARROS, 1990; FÖLSTER e KHANNA, 1997).

A despeito do predomínio de N na atmosfera (aproximadamente 78 % em volume), este compartimento é composto predominantemente por N₂, forma inerte e indisponível para as plantas (KIMMINS, 1987; LEUSCHNER, 2005).

O N atmosférico para ser utilizado pelas plantas superiores deve ser fixado, o que pode ser realizada por organismos de vida livre, procariotos, bactérias aeróbias (*Azotobacter*, *Azospirillum* e *Beijerinckia*) e anaeróbias (*Clostridium*) e cianobactérias (algas azul-esverdeadas), e por associações simbióticas entre procariotos e plantas superiores, como as bactérias do gênero *Rhizobium* e *Frankia* (EPSTEIN e BLOOM, 2006).

As folhas também são capazes de absorver nutrientes, quando dissolvidos na água, ou até diretamente da atmosfera, como é o caso de alguns compostos voláteis de N e S que ocorrem de forma natural ou como poluente da atmosfera, mas a absorção de nutrientes pelas plantas terrestres ocorre predominantemente do solo, via sistema radicular (MENGEL e KIRKBY, 1982; KIMMINS, 1987; EPSTEIN e BLOOM, 2006; LAMBERS et al., 2008).

A maioria do N entra nos ecossistemas pela fixação microbiológica de N gasoso (N₂), mas a absorção de NH₃ pode suprir até 10 % do requerimento de N pela comunidade, o que pode corresponder a uma quantidade de 20 kg ha⁻¹ano⁻¹ (HUTCHINSON et al., 1972).

Segundo Pritchett (1990), a fixação biológica de nitrogênio provavelmente seja a principal forma de entrada de N nos ecossistemas florestais, mas devido as condições de acidez da maioria dos solos florestais a fixação de nitrogênio por microorganismos de vida livre não deve ser apreciável.

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

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

Uma das principais vias de exportação de nutrientes, se não a mais importante, principalmente em povoamentos florestais submetidos a curtas rotações e altas taxas de exportação de biomassa é a colheita (LANDSBERG, 1986; PRINCHETT, 1990; FÖLSTER e KHANNA, 1997).

O estoque de nutrientes na biomassa florestal é somente uma parte do total utilizado ao longo do ciclo da cultura. Uma parte dos nutrientes é perdida para o solo na forma sólida, por meio da deposição de serapilheira (*litterfall*), ou líquida, mediante a lavagem da copa das árvores pela água da chuva (*throughfall* e *stemflow*), compondo os ciclos biogeoquímicos (ATTIWILL e LEEPER, 1987).

As reservas de nutrientes nas florestas estão presentes nos vários componentes das árvores, serapilheira, solo e na vegetação de sub-bosque, sendo que, do montante, somente uma pequena fração está em fluxo entre os vários compartimentos do sistema (LANDSBERG, 1986).

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

Um dos aspectos mais característicos dos ecossistemas florestais é o desenvolvimento de uma espessa camada de resíduos sobre o solo, proveniente do descarte periódico de folhas, galhos, cascas, flores, frutos e outros resíduos orgânicos (PRITCHETT, 1990). A manta florestal ou serapilheira acumulada é o resultado do equilíbrio das taxas de deposição e de decomposição dos resíduos, e que está relacionado com a espécie florestal, idade, condições climáticas, qualidade do sítio, entre outros fatores (REIS e BARROS, 1990).

Espécies arbóreas utilizadas em plantações, como pinus e eucalipto, apresentam uma alta eficiência de utilização dos nutrientes e tipicamente, produzem serapilheira de baixa concentração nutricional. Enquanto os plantios florestais de diferentes espécies (n = 79) apresentaram uma deposição média, em kg ha⁻¹ ano⁻¹, de 25 a 50 para N e 1 a 3 de P, as florestas naturais tropicais (n = 56) exibiram aportes de 40 a 140 para N e de 3 a 8 para P (BINKLEY et al., 1997). A qualidade da

serapilheira, do ponto de vista da constituição nutricional, influencia na decomposição da biomassa, o que pode provocar imobilização dos nutrientes (REIS e BARROS, 1990; VITOUSEK, 1982). Esse processo pode evitar a saída de nutrientes do sítio, mas por outro lado, pode reduzir as taxas de suprimento de nutrientes e aumentar as necessidades de fertilização (BINKLEY et al., 1997).

Para Reis e Barros (1990), o retorno de nutrientes via deposição de serapilheira representa a via mais importante do ciclo biogeoquímico, principalmente em áreas com solos altamente intemperizados, onde a biomassa representa o maior estoque de nutrientes.

A ciclagem interna (ciclagem bioquímica) desloca nutrientes de tecidos senescentes para regiões com maior atividade metabólica (REIS e BARROS, 1990; PALLARDY, 2008), o que é especialmente importante nos tecidos lenhosos, na transformação de alburno em cerne.

A retranslocação dos nutrientes de tecidos em senescência para regiões da planta com maior atividade metabólica é um importante processo para aumentar a eficiência de utilização dos nutrientes com alta mobilidade no tecido vegetal e reduzir a saída de nutrientes por meio da deposição de serapilheira (POGGIANI e SCHUMACHER, 2004).

A manutenção de células não fotossintetizantes no tronco, galhos e raízes em árvores adultas representa uma grande demanda por carboidratos, à medida que as árvores crescem o volume total de alburno aumenta, mas o percentual na secção transversal do tronco diminui (WARING e SCHLESINGER, 1985), o que eleva a eficiência de utilização dos nutrientes.

Segundo Burger e Richter (1991), o alburno, localizado nas camadas mais periféricas do tronco, constitui-se em tecido mais ativo fisiologicamente que o cerne (parte central do tronco) e diferentemente do cerne, o alburno é constituído por células parenquimáticas vivas que encerram substâncias nutritivas como amido, açúcares, proteínas, entre outros; o que lhe confere maior concentração de nutrientes.

Gonçalves et al. (2004), ao estudar um povoamento de *Eucalyptus saligna*, constataram que a retranslocação média de nutrientes, das folhas decíduas para outros drenos das árvores, entre o oitavo e o nono ano de idade, foi da seguinte ordem: 79 % do N, 67 % do P, 81 % do K, 51 % do Mg, 18 % do B, 79 % do Zn, 37 % do Cu, 28 % do Fe e 14 % do Mn, e para os galhos decíduos: 67 % do N, 66 %

do P, 87 % do K, 48 % do Mg, 38 % do B, 66% do Zn, 17 % do Cu, 30 % do Fe e 52 % do Mn. A partir disso, esses pesquisadores concluíram que, em povoamentos adultos, grande parte da demanda anual de nutrientes é suprida pela ciclagem de nutrientes.

2.4 Recomendação de fertilização do solo

O princípio básico da fertilização mineral consiste em dimensionar a demanda da planta para atingir a produção esperada e a quantidade de nutrientes que pode ser suprida pelo solo. Quando a demanda da planta não é totalmente satisfeita pelo solo, a fertilização é necessária (BARROS et al., 2004).

A estimativa da demanda de nutrientes pela planta é relativamente fácil de se obter. A etapa mais complexa do processo é estimar as reservas de nutrientes disponíveis no solo, ou ainda, prever o comportamento dos nutrientes aplicados aos solo na forma de fertilizantes (BARROS et al., 2004).

Apesar de algumas aplicações específicas para culturas perenes ou de ciclo longo (MALAVOLTA et al., 1997; MALAVOLTA, 2006), devido aos limites de absorção dos nutrientes pelas plantas, além de outros fatores que afetam as quantidades de nutrientes que entram nas plantas, como teor de água no solo, aeração, compactação, acidez, moléstias, reações de antagonismo e sinergismo entre nutrientes, efeitos de diluição e concentração, a análise de tecido vegetal não pode ser utilizada para recomendação de fertilização do solo (BARROS et al., 1990a; RAIJ, 1991; CANTARUTTI et al., 2007).

A análise química de tecido vegetal pode ser utilizada para diagnosticar ou confirmar sintomas de deficiência de nutrientes, identificar o nutriente que está prejudicando a planta (toxidez ou deficiência), verificar se determinado nutriente foi absorvido pela planta, indicar interações e antagonismos entre nutrientes, avaliar o estado nutricional e a probabilidade de resposta às adubações, verificar o equilíbrio nutricional, avaliar e ajustar os programas de adubação (CANTARUTTI et al., 2007; BOARETTO et al., 2009), mas de acordo com Raij (1991), apesar de refletir a fertilidade do solo, ela não permite avaliá-la.

A análise de solo é a única técnica disponível para avaliação direta da fertilidade do solo, e é insubstituível para avaliar a reação do solo e problemas associados a ela, tais como acidez, alcalinidade e salinidade, bem como para servir de base para determinar, de forma quantitativa, medidas corretivas (RAIJ, 1991).

O modelo mais difundido na recomendação de corretivos e fertilizantes utiliza a análise de solo como técnica de diagnóstico e consiste na identificação de classes de fertilidade e no uso de tabelas para a recomendação de fertilização (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO-CQFS-RS/SC, 2004; CANTARUTTI et al., 2007).

Mais recentemente os modelos que fundamentam-se no balanço nutricional têm sido utilizados na recomendação de fertilizantes. Basicamente, esses modelos consideram a demanda de nutrientes em função de diferentes níveis de produção (produtividade esperada) e o suprimento no solo, restos culturais e outras fontes naturais (CANTARUTTI et al., 2007).

No Brasil, na área florestal, o primeiro modelo de recomendação de fertilizantes baseado no balanço de nutrientes foi idealizado por Barros et al. (1995), para a cultura do eucalipto (NUTRICALC). Posteriormente, o mesmo sistema de recomendação de fertilizantes foi aplicado em plantações de *Pinus taeda* na região nordeste do estado do Paraná (BARROS FILHO, 2003).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização da área do estudo

O estudo foi realizado em plantios de *Eucalyptus saligna* (material genético 32864) de propriedade da empresa CMPC – Celulose Riograndense (área em cores no mapa), com sede em Guaíba – RS (Figura 1).

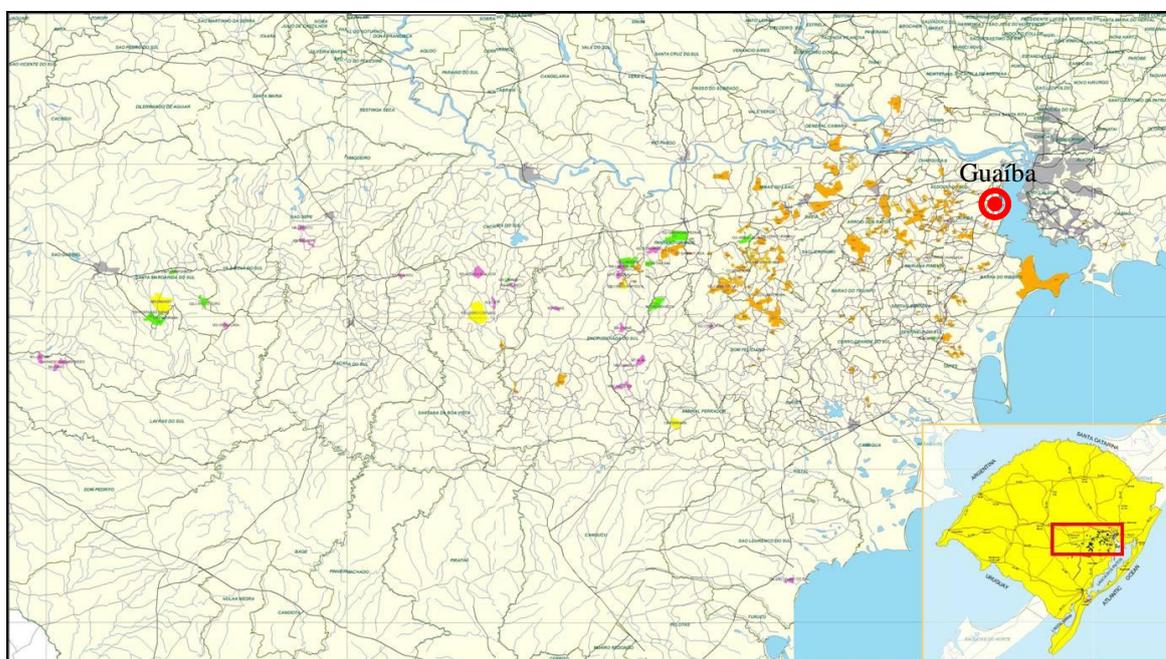


Figura 1 – Localização dos povoamentos de *Eucalyptus saligna*.

Fonte: Araújo (2010).

3.2 Clima e solo da área do estudo

Segundo a classificação de Köppen a região pertence ao tipo climático Cfa (subtropical), que se caracteriza por chuvas bem distribuídas durante o ano, temperatura média das máximas superior a 22 °C e média das mínimas variando entre - 3 e 18 °C. Ou ainda, com base na classificação de Maluf (2000), a área do estudo está compreendida nos tipos climáticos subtropical úmido e subtemperado

úmido, com temperaturas médias anuais entre 18,1 °C e 22 °C e temperatura média do mês mais frio, respectivamente, entre 13 °C e 20 °C e ≤ 13 °C.

A maioria dos povoamentos florestais envolvidos no estudo está localizada na Depressão Central do Rio Grande do Sul. Essa região corresponde à área da bacia sedimentar do Paraná não coberta pelo derrame de lavas do Planalto (basáltica e riolito) e limitada ao sul pelo Escudo Sul-rio-grandense, composto por rochas graníticas (VIEIRA, 1984). Essa condição permite a formação de uma grande diversidade de solos que na área do estudo destacam-se as seguintes classes: Argissolos, Neossolos e Planossolos (Figura 2).

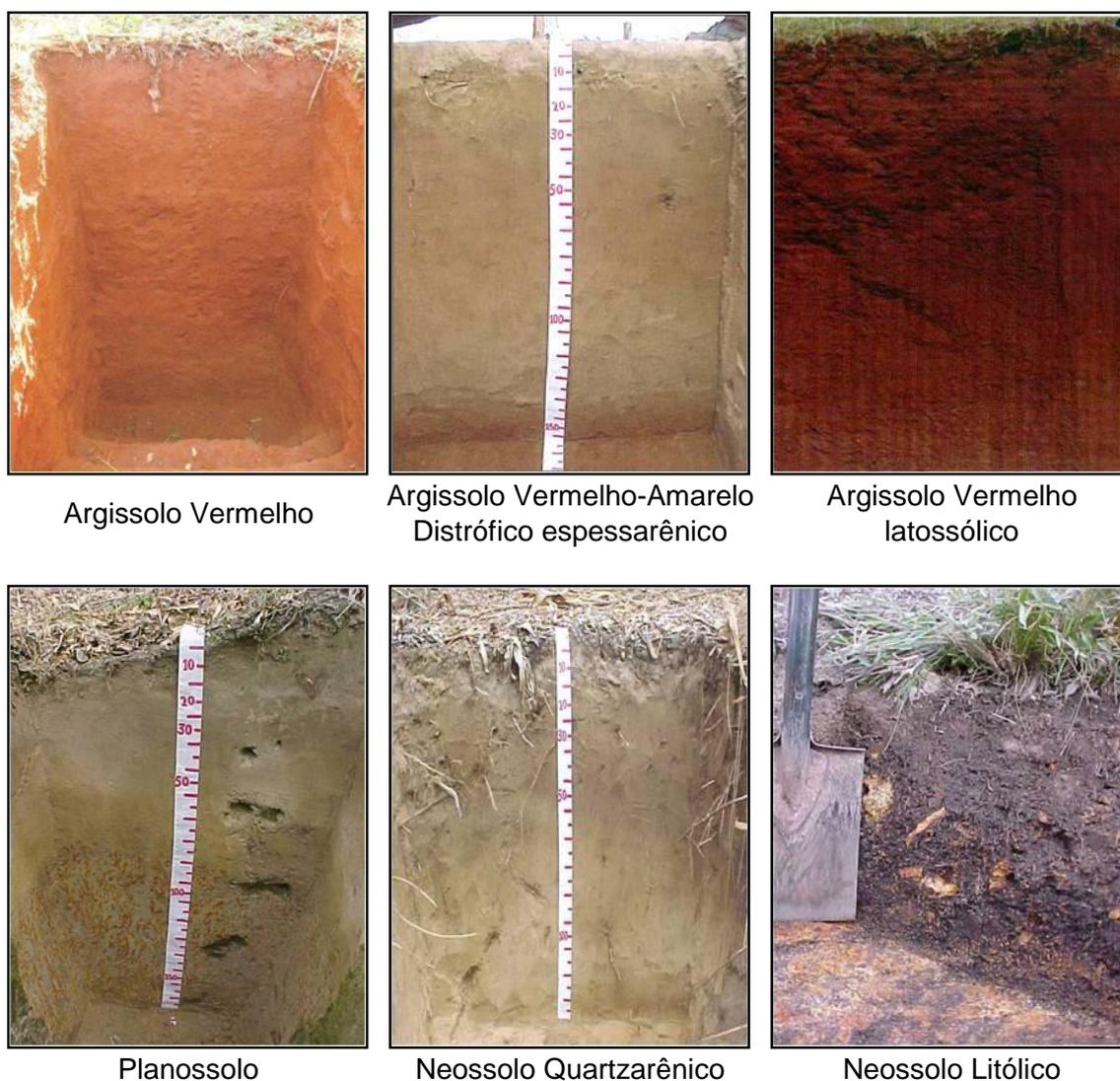


Figura 2 – Principais solos representativos da área do estudo.

Fonte: Araújo (2010).

3.3 Procedimento de campo

Inicialmente, foi realizado um inventário florestal com o objetivo de caracterizar os povoamentos quanto às variáveis dendrométricas, diâmetro à altura do peito (1,30 m de altura em relação ao solo) e altura total. Em cada povoamento foram avaliadas três árvores-amostra: uma árvore de diâmetro médio; uma árvore de diâmetro médio mais um desvio padrão e uma árvore de diâmetro médio menos um desvio padrão. As árvores selecionadas com base nesse critério foram seccionadas ao nível do solo e a biomassa foi fracionada nos seguintes componentes: folha, galho, madeira do tronco, casca do tronco e raízes.

A biomassa dos componentes acima do solo (folha, galho, casca e madeira do tronco) foi coletada em 195 árvores-amostra em povoamentos com idades entre 1 e 8 anos pós-plantio. Para o componente raiz, em função da dificuldade de amostragem, foram amostradas 20 árvores-amostra com idades entre 2 e 8 anos pós-plantio.

A biomassa de cada componente foi pesada e amostrada. As amostras coletadas foram pesadas em balança de precisão, identificadas e acondicionadas em sacos de papel. No caso da madeira e casca do tronco, foram coletadas três subamostras ao longo do tronco, correspondendo ao ponto médio de três secções equivalentes a um terço da altura total das árvores-amostra. A biomassa de raiz foi obtida mediante escavação manual de um bloco de solo estabelecido pela área útil de cada árvore-amostra (definida pelo espaçamento entre árvores) e profundidade de um metro. A separação do solo das raízes foi realizado com o uso de peneira com malha de 7 mm.

A serapilheira acumulada foi coletada com o uso de um gabarito de 1 m x 1 m em povoamentos com idades entre 2 e 8 anos pós-plantio. Foram coletadas cinco amostras distribuídas aleatoriamente no interior de cada povoamento, em dois povoamentos por idade, evitando-se condições de bordadura ou qualquer outra situação atípica (não representativa).

Cada árvore-amostra foi cubada com medição de diâmetro com casca, nas seguintes posições ao longo do tronco: 10 %, 30 %, 50 %, 70 % e 90 % da altura total.

3.4 Estimativa de biomassa

No Laboratório de Ecologia Florestal do Departamento de Ciências Florestais/UFSM, as amostras de biomassa foram secas a 70 °C, em estufa de circulação e renovação de ar, até a estabilização do peso, e pesadas em balança de precisão para determinação da massa seca. A biomassa seca foi determinada com base no teor de umidade por componente e por árvore-amostra. A estimativa de biomassa por unidade de área (Mg ha^{-1}) e por povoamento foi obtida pelo produto entre a biomassa seca média de cada componente e o número de árvores por hectare. A biomassa de serapilheira acumulada (Mg ha^{-1}) foi estimada por extrapolação com base na área da unidade amostral (1 m^2).

A produtividade primária líquida foi calculada com base no incremento de biomassa em anos subsequentes (biomassa média dos povoamentos com mesma idade). Na estimativa da produtividade primária líquida acima do solo (Equação 1), considerou-se os incrementos sucessivos de biomassa nos componentes folha, galho, casca e madeira do tronco e produção de serapilheira (litter fall); enquanto na produtividade primária líquida abaixo do solo foi computada apenas a biomassa do sistema radicular (Equação 2).

$$\text{PPLAS} = ((\text{BAS}_t - \text{BAS}_{(t-1)}) + \text{PS}) \quad (1)$$

$$\text{PPLR} = (\text{BR}_t - \text{BR}_{(t-1)}) \quad (2)$$

Em que:

PPLAS = produtividade primária líquida acima do solo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)

PPLR = produtividade primária líquida de raiz ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$)

BAS = biomassa acima do solo (Mg ha^{-1})

BR = biomassa de raiz (Mg ha^{-1})

PS = produção de serapilheira (Mg ha^{-1})

t = idade (anos)

As informações sobre produção de serapilheira foram obtidas em experimentos realizados pela CMPC. Esses experimentos consistiram na avaliação da deposição mensal de serapilheira, em povoamentos de diferentes idades, em coletores com $0,5 \text{ m}^2$, com fundo de tela fina de “nylon”, dispostos a 0,5 m de altura em relação à superfície do solo. Os coletores foram distribuídos em diferentes posições em relação ao tronco das árvores: linha de plantio, entrelinha de plantio, diagonal e junto ao tronco.

3.5 Modelagem de equações de regressão de biomassa

Após a determinação da biomassa seca, foram ajustadas equações de regressão tendo como variáveis dependentes a biomassa individual dos componentes arbóreos: folha, galho, casca do tronco, madeira do tronco e raiz, por árvore, em kg, e a serapilheira acumulada, por povoamento, em Mg ha^{-1} ; e as seguintes variáveis independentes: dap (diâmetro à altura do peito), em cm, h (altura total), em m, t (idade), em anos, e outras variantes aritméticas e logarítmicas (logaritmo natural) das variáveis dependentes e independentes.

A modelagem de regressões seguiu o procedimento “forward” (proc stepwise e opção forward) do pacote SAS (1985), com verificação da normalidade da distribuição dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk, homogeneidade da variância pelo teste de White e independência dos resíduos pela estatística de Durbin-Watson (SCHNEIDER et al., 2009).

As estatísticas utilizadas para verificação da qualidade de ajuste das equações de regressão foram: o coeficiente de determinação ajustado em função do número de coeficientes do modelo (R^2 ajustado), o erro padrão da estimativa absoluto (Syx) e o erro padrão da estimativa relativo (Syx %).

3.6 Análise química e estimativa do estoque de nutrientes na biomassa

Após a secagem, as amostras foram moídas em moinho de lâminas do tipo Wiley com peneira de 20 mesh. As determinações analíticas dos macronutrientes: N, P, K, Ca, Mg e S, e dos micronutrientes: B, Cu, Fe, Mn e Zn, foram realizadas no Laboratório de Ecologia Florestal do Departamento de Ciências Florestais/UFSM, segundo a metodologia sugerida por Tedesco et al. (1995) e Miyazawa et al. (1999), de acordo com a Tabela 1. Para quantificação dos nutrientes foram analisadas amostras de biomassa de povoamentos entre 2 e 7 anos de idade.

O conteúdo nutricional foi estimado com base na biomassa seca de cada componente e na concentração de nutrientes. O estoque de nutrientes na serapilheira acumulada, em kg ha^{-1} , foi obtido pelo produto entre a biomassa média em Mg ha^{-1} e a concentração média de nutrientes.

A estimativa do estoque de nutrientes por unidade de área, em kg ha^{-1} para os macronutrientes e em g ha^{-1} para os micronutrientes, foi obtida pelo produto entre a biomassa média e o conteúdo médio de nutrientes em cada componente ou compartimento analisado.

Tabela 1 – Descrição dos procedimentos analíticos utilizados na determinação dos nutrientes, em amostras de tecido vegetal.

Nutriente	Digestão	Método	Comprimento de onda (nm)
N	Sulfúrica ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$)	Kjeldahl	—
Ca	Nítrica-perclórica ($\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$) [3:1]	Espectrofotometria de absorção atômica	422,67
Mg			285,21
Cu			324,75
Fe			248,33
Mn			279,48
Zn			213,86
K		Fotometria de chama	—
P	Espectrofotometria	660,00	
S	Turbidimetria	420,00	
B	Seca	Espectrofotometria	460,00

3.7 Modelagem do sistema de recomendação de fertilização do solo

O sistema de recomendação de fertilizantes tem como base o modelo conceitual desenvolvido por Barros et al. (1995) que considera o balanço de nutrientes para estimar as doses de fertilizantes ou corretivos (Figura 3). O balanço nutricional é estabelecido entre a demanda de nutrientes para atingir uma determinada produção de biomassa e as diferentes fontes de nutrientes.

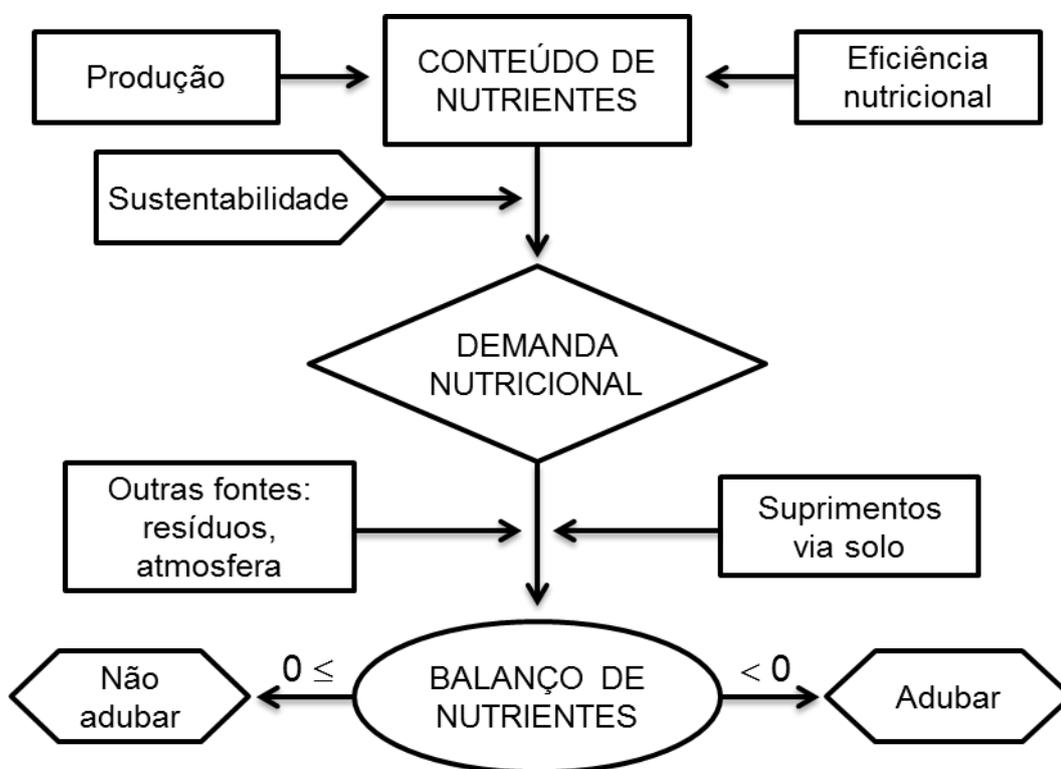


Figura 3 – Organograma do modelo conceitual do sistema de recomendação de fertilização com base no balanço de nutrientes (adaptado de BARROS et al., 1995; BARROS FILHO, 2003).

O cálculo da demanda de nutrientes é determinado com base na produção esperada e na eficiência de utilização dos nutrientes (EUN), como pode ser observado na Figura 3. Desse modo, quanto maior a produção esperada maior será a demanda por nutrientes, por outro lado, quanto maior a eficiência de utilização dos

nutrientes pelo genótipo (que consiste na capacidade de converter nutriente em biomassa), menor será a demanda nutricional.

A estimativa de biomassa e do conteúdo de nutrientes é obtida mediante o ajuste de equações de regressão. A eficiência de utilização dos nutrientes é obtida pelo quociente entre a produção de biomassa e o conteúdo de nutrientes, e também deve ser modelada (BARROS et al., 1986; BARROS FILHO, 2003).

O modelo apresenta um fator de sustentabilidade que pode ser considerado na estimativa da demanda nutricional (Figura 3). Esse fator é um percentual que é acrescido ao valor da demanda real com o objetivo de gerar um excedente de nutriente no sítio.

O estoque de nutrientes no solo é determinado com base nos teores disponíveis ou trocáveis e considerando o volume de solo explorável pelo sistema radicular. As amostras de solo para análise química devem ser coletadas a intervalos de 20 cm até a profundidade efetivamente explorada pelo sistema radicular das plantas, de acordo com o perfil de solo e a profundidade do sistema radicular. O estoque de nutrientes presente na primeira camada de solo (0 – 20 cm) deve ser considerado como passível de total absorção pelas plantas. Para a camada de 20 – 40 cm devem ser considerados apenas 75 % do total dos nutrientes disponíveis, e abaixo de 40 cm, apenas 50 % (BARROS FILHO, 2003).

Como outras fontes de nutrientes, podem ser incluídas as entradas via deposição atmosférica e, principalmente, os nutrientes presentes em resíduos de colheita, sempre que presentes, no estabelecimento de novos plantios em áreas já cultivadas com espécies florestais.

Quando forem considerados os nutrientes presentes nos resíduos de colheita florestal (no caso de replantios) esses devem ser considerados como totalmente disponíveis.

No caso do solo, em função de diferentes taxas de recuperação dos nutrientes pelas plantas, deve-se considerar que nem todos os nutrientes aplicados ao solo, na forma de fertilizante, serão absorvidos pelas plantas. Para K, Ca e Mg, deve-se considerar que apenas 80 % do total aplicado como fertilizantes pode ser utilizado pelas plantas. Para N considera-se um valor de 60 %. Para P, o valor varia em função da textura do solo e da solubilidade dos fertilizantes. Em solos arenosos e fontes solúveis de P, o valor deve ser de 40 %, e se a fonte for de baixa solubilidade (fosfatos naturais), o percentual cai para 35 %. Para solos de textura

média, a recuperação deve ser de 35 % e 30 %, respectivamente, para fontes solúveis e fontes pouco solúveis. E quando os solos forem argilosos, para fontes solúveis e pouco solúveis, respectivamente, 30 % e 25 % (BARROS FILHO, 2003).

Para estabelecer as doses de fertilizantes, no final do processo de estimativa, o sistema de recomendação estabelece um balanço de nutrientes considerando a demanda nutricional decorrente da produção desejada e as diferentes fontes que podem ser via solo, resíduos vegetais e entradas via atmosfera, dependendo do caso. Quando o balanço for negativo, ou seja, a demanda maior do que o suprimento das diferentes fontes, a diferença deve ser compensada na forma de fertilizantes, do contrário, a fertilização do solo é desnecessária.

3.7.1 Modelagem de equações de regressão

No caso da biomassa, após a determinação da massa seca, foram ajustadas equações de regressão, tendo como variáveis dependentes a biomassa de cada componente (folha, galho, casca do tronco, madeira do tronco e raiz), por árvore, em kg, e as seguintes variáveis independentes: v (volume com casca do troco), em m^3 e t (idade), em anos, bem como, variantes aritméticas e logarítmicas (logaritmo natural) das variáveis dependentes e independentes. Para serapilheira acumulada por povoamento, em $Mg\ ha^{-1}$, além da idade, foram testadas como variáveis explicativas a biomassa média, em kg por árvore, de folha, galho e tronco (madeira e casca), além de transformações aritméticas e logarítmicas das variáveis dependentes e independentes.

A eficiência de utilização dos nutrientes no tronco, que corresponde à razão entre a biomassa e o conteúdo de cada nutriente na casca e na madeira do tronco na mesma unidade de massa (Equação 3), foi modelada tendo como variáveis independentes BT (biomassa do tronco, madeira mais casca), em kg por árvore e t (idade), em anos, bem como, variantes aritméticas e logarítmicas (logaritmo natural) das variáveis dependentes e independentes.

$$EUN = \frac{\text{biomassa do tronco}}{\text{conteúdo de nutriente}} \quad (3)$$

A relação dos nutrientes e as variáveis preditivas nos diferentes componentes da biomassa arbórea foi estudada correlacionando o conteúdo nutricional (N, P, K, Ca e Mg), em g por árvore, como variável dependente, e t (idade), em anos, BT (biomassa do tronco), em kg por árvore, e a eficiência de utilização do respectivo nutriente no tronco, como variáveis independentes; além de variantes aritméticas e logarítmicas (logaritmo natural) das variáveis dependentes e independentes. Para a serapilheira acumulada, o estoque de nutrientes por povoamento, em kg ha⁻¹, foi modelado considerando como variáveis explicativas a idade do povoamento (t) e a biomassa média do tronco (BT), em kg por árvore e a biomassa de serapilheira acumulada (BS), em Mg ha⁻¹, além de suas variações aritméticas e logarítmicas.

A modelagem de regressões seguiu o procedimento “forward” (proc stepwise e opção forward) do pacote SAS (1985), com verificação da normalidade da distribuição dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk, homogeneidade da variância pelo teste de White e independência dos resíduos pela estatística de Durbin-Watson (SCHNEIDER et al., 2009).

As estatísticas utilizadas para verificação da qualidade de ajuste das equações de regressão foram: o coeficiente de determinação ajustado em função do número de coeficientes do modelo (R² ajustado), o erro padrão da estimativa absoluto (Syx) e o erro padrão da estimativa relativo (Syx %).

3.7.2 Verificação do sistema de recomendação de fertilizantes

Para verificar a sensibilidade do sistema de recomendação de fertilização do solo foi realizada uma simulação considerando um intervalo amplo e representativo para as variáveis de entrada.

Em uma condição de implantação florestal, com ausência de resíduos de colheita e sem contar outras entradas de nutrientes, os diferentes níveis de

demanda de nutrientes (produção esperada) foram simulados considerando incrementos médios anuais (IMA) de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ de madeira com casca.

O suprimento de nutrientes no solo foi estimado dentro de uma ampla variação nos níveis de fertilidade, até uma profundidade de um metro, considerando teores disponíveis ou trocáveis de P, K, Ca e Mg, como descrito na Tabela 2.

Tabela 2 – Níveis de fertilidade do solo utilizados para verificação do sistema de recomendação de fertilizantes e características dos procedimentos analíticos empregados nas análises de solo.

Nutriente	Forma do nutriente no solo ⁽¹⁾	Níveis de fertilidade (teores na camada de 0 – 20 cm)	Forma do nutriente na recomendação
N	M.O. (%)	1, 2, 3, 4, 5 e 6	N
P	P disponível (mg dm ⁻³)	2, 4, 6, 8, 10 e 12	P ₂ O ₅
K	K trocável (mg dm ⁻³)	20, 40, 60, 80, 100 e 120	K ₂ O
Ca	Ca e Mg trocável (cmol _c dm ⁻³)	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0	CaO
Mg		0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 e 1,2	MgO

(1) P e K: extração com solução Mehlich-1 (HCl + H₂SO₄); Ca e Mg: extraídos com solução de KCl (1 mol L⁻¹); M.O.: digestão por combustão úmida (K₂Cr₂O₇ + H₂SO₄).

Devido a grande dinâmica do N no solo, sua disponibilidade foi avaliada com base na matéria orgânica (M.O.), considerando-se 5 % como N total (TOMÉ JUNIOR, 1997). Como a maioria do N total está contida em formas pouco ou não-disponíveis (frações húmicas muito estáveis), para efeito de cálculo, foi considerado apenas 10 % como disponível para as plantas (GONÇALVES et al., 2001).

Os teores de nutrientes no solo na camada de 0 – 20 cm foram selecionados com base nas faixas de interpretação da fertilidade do solo estabelecidas pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo-CQFS-RS/SC, 2004. Para efeito de cálculo, e simular a redução natural dos teores de nutrientes com a profundidade do solo, os teores de nutrientes nas camadas de 20 – 40 cm e 40 – 100 cm foram definidos como equivalentes a 60 % e 40 % dos valores na camada de 0 – 20 cm, respectivamente.

Na estimativa das doses de fertilizantes para P, foram consideradas taxas de recuperação para um solo de textura média e fontes solúveis de nutrientes.

Os vários níveis de demanda de nutrientes, estabelecidos em função da produtividade esperada, foram correlacionados com as diferentes condições de fertilidade (suprimento de nutrientes no solo) para estabelecer as doses de fertilizantes na forma de N, P_2O_5 , K_2O , CaO e MgO (Tabela 2).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Produção e partição de biomassa

Na Tabela 3 apresenta-se as estatísticas descritivas que caracterizam o universo amostral, e principalmente, definem os limites para os quais as inferências estatísticas são válidas. Verifica-se que houve número desigual de repetição entre os componentes da biomassa. Devido ao tamanho da amostra o intervalo válido para as inferências estatísticas para raiz foi menor em relação aos demais componentes da biomassa. Por ocasião das estimativas é importante observar a idade do povoamento, bem como, as variáveis dendrométricas envolvidas na estimativa. No caso de extrapolações com os modelos de regressão, por exemplo, é preciso fazer uma verificação dos modelos, e se necessário, novas amostragens com recalibração das equações ou nova modelagem.

Tabela 3 – Estatísticas descritivas das variáveis dendrométricas e da biomassa individual (kg árvore^{-1}) para os povoamentos de *Eucalyptus saligna* na região de Guaíba - RS.

Componentes / variáveis		n	Média	Desvio padrão	CV (%)	Mínimo	Máximo
Componentes acima do solo	Dap (cm)	195	15,3	4,50	29,5	3,9	26,1
	Altura total (m)	195	19,3	6,46	33,4	4,0	32,9
	Volume com casca (m^3)	195	0,2011	0,1506	74,9	0,0027	0,7794
	Nº de árvores ha^{-1}	195	1375,6	192,62	14,0	1067	1700
	Folha	195	4,42	1,90	42,9	0,67	9,34
	Galho	195	6,51	3,47	53,4	0,84	16,05
	Casca do tronco	195	7,35	4,81	65,5	0,16	23,80
	Madeira do tronco	195	79,62	63,22	79,4	0,84	320,87
Raiz	Dap (cm)	20	15,6	4,18	26,9	8,1	21,3
	Altura total (m)	20	22,4	6,49	29,0	8,8	31,3
	Volume com casca (m^3)	20	0,1886	0,1262	66,9	0,0277	0,3978
	Nº de árvores ha^{-1}	20	1407,6	180,82	12,8	1133	1700
	Biomassa	20	24,21	10,25	42,4	7,79	39,80

Outra variável importante é o número de árvores por hectare. A densidade populacional pode causar alteração na proporção de biomassa entre os componentes acima do solo (LEITE et al., 1997; ASSIS et al., 1999; LADEIRA et al., 2001), e entre estes e o sistema radicular (LELES et al., 1998; LADEIRA et al., 2001). Segundo Ladeira et al. (2001) e Leite et al. (1997), à medida que aumenta a densidade populacional a biomassa total por unidade de área aumenta, ao passo que a produção de biomassa total por indivíduo diminui, com aumento da alocação de biomassa no tronco em detrimento dos componentes da copa.

Considerando-se que as estimativas envolvem povoamentos com diferentes idades e condições de sítio, os modelos selecionados são altamente significativos e apresentam boa capacidade preditiva, o que pode ser comprovada pelos valores das estatísticas de ajuste, como coeficiente de determinação e erro-padrão (Tabela 4). Como é comum observar, devido a menor variabilidade, os componentes do tronco, principalmente madeira, apresentaram melhor ajuste das equações. Os modelos logarítmicos mostraram-se mais eficientes para descrever a relação entre as variáveis dendrométricas e a biomassa dos diferentes componentes das árvores. A prevalência das equações de regressão com transformação logarítmica pode estar associada a problemas de heterogeneidade de variância (KOEHLER et al., 2002; SCHNEIDER et al., 2009).

Os pressupostos de normalidade, homogeneidade e independência dos resíduos, foram atendidos, como se verifica, respectivamente, pelos testes de Shapiro-Wilk, White e Durbin-Watson (Tabela 4). Com base nos valores de probabilidade ($> 0,05$) associados aos testes de Shapiro-Wilk e de White, é possível afirmar que os resíduos apresentam distribuição normal e têm variância semelhante nos diferentes níveis dos previsores (homocedasticidade). A estatística de Durbin-Watson, com variação entre 0 e 4 indica se os resíduos estão correlacionados em série (dependentes). Valores iguais a 2 indicam independência total dos resíduos, enquanto escores menores do que 1 ou maiores do que 3 são tidos como problemáticos (FIELD e MILES, 2010).

Tabela 4 – Equações de regressão para estimativa da biomassa individual dos diferentes componentes das árvores de *Eucalyptus saligna* e da serapilheira acumulada na região de Guaíba - RS.

Componente da biomassa		Equações de regressão
1	Folha (F)	$y = 1,573135^{**} + 1,161802^{**} \cdot d - 0,81948^{**} \cdot h + 0,001205^{**} \cdot (h^2 \cdot t) - 0,000240^{**} \cdot (d \cdot t)^2$
2	Galho (G)	$\ln y = - 5,653120^{**} - 0,098110^{**} \cdot h + 1,444204^{**} \cdot (t^3)^{-1} + 1,147043^{**} \cdot \ln d^3$
3	Casca do tronco (C)	$\ln y = - 4,105380^{**} + 0,253389^{**} \cdot \ln(d^2 \cdot t) + 0,487856^{**} \cdot \ln(d \cdot h^2)$
4	Madeira do tronco (M)	$\ln y = - 3,114040^{**} + 0,063062^{**} \cdot d + 0,721934^{**} \cdot \ln(d \cdot h^2)$
5	Raiz (R)	$\ln y = - 6,484810^{**} + 622,336800^{**} \cdot (d^3)^{-1} - 0,372010^{**} \cdot \ln(d \cdot t^3) - 0,085560^{**} \cdot \ln(d \cdot h)^{-1}$
6	Copa (F + G)	$\ln y = - 0,40430^{ns} - 40,62760^{**} \cdot (h^2)^{-1} + 8,660962^{**} \cdot (d \cdot t)^{-1} + 6,235724^{**} \cdot \ln d - 2,519760^{**} \cdot \ln(d \cdot h)$
7	Tronco (C + M)	$\ln y = - 2,869010^{**} + 0,060144^{**} \cdot d + 0,710685^{**} \cdot \ln(d \cdot h^2)$
8	Serapilheira acumulada	$y = 8,875950^{**} + 0,100160^{**} \cdot (d \cdot t)$

Estatísticas de ajuste e condicionantes das regressões

	Prob. > F	R ² ajust.	Syx	Syx (%)	Shapiro-Wilk		White		D. Watson	
					Valor	Prob.	Valor	Prob.	Valor	α
1	0,0001	0,749	0,9118	16,5	0,98	0,293	22,03	0,078	1,72	0,01
2	0,0001	0,802	0,2653	15,4	0,97	0,089	3,94	0,915	1,64	0,01
3	0,0001	0,975	0,1403	13,1	0,97	0,208	9,53	0,090	2,00	0,05
4	0,0001	0,992	0,0968	8,0	0,97	0,293	4,65	0,461	1,77	0,05
5	0,0001	0,927	0,1317	10,5	0,94	0,234	4,04	0,909	1,70	0,05
6	0,0001	0,772	0,2327	15,8	0,96	0,075	10,11	0,754	1,66	0,01
7	0,0001	0,993	0,0913	7,6	0,98	0,804	6,62	0,251	1,79	0,05
8	0,0001	0,688	3,1607	15,4	0,98	0,824	2,49	0,287	1,69	0,05

Em que: ln = logaritmo natural; y = biomassa de folha, galho, casca do tronco, madeira do tronco e raiz, em kg árvore⁻¹, ou serapilheira acumulada, em Mg ha⁻¹; d = dap (diâmetro à altura do peito, em cm), no caso da serapilheira acumulada, diâmetro da árvore média, em cm; h = altura total, em m; t = idade do povoamento, em anos; ns, * e ** = significância estatística dos coeficientes das equações: não significativo, e significativo em nível de 5 % e 1 % de probabilidade de erro, respectivamente; Prob. = nível de significância para a estatística; R² ajust. = coeficiente de determinação ajustado em função do número de coeficientes da equação; Syx = erro-padrão da estimativa absoluto; Syx (%) = erro-padrão da estimativa relativo; α = nível de probabilidade associado ao teste.

Considerando-se os valores médios entre os povoamentos de diferentes idades, a distribuição de biomassa apresentou a seguinte ordem de acúmulo: madeira do tronco > raiz > casca do tronco > galho > folha (Tabela 5).

Tabela 5 – Biomassa (Mg ha^{-1}) nos componentes arbóreos e na serapilheira acumulada, em povoamentos de *Eucalyptus saligna* de diferentes idades, na região de Guaíba - RS.

Componentes da biomassa	Idade pós-plantio (anos)							Média
	2	3	4	5	6	7	8	
Copa (C)	12,82	15,95	18,04	14,11	12,35	13,53	13,68	14,35
Folha (F)	6,43	7,09	6,87	5,74	4,79	4,65	4,09	5,67
Galho	6,39	8,86	11,17	8,37	7,56	8,88	9,59	8,69
Tronco (T)	25,07	61,53	97,12	125,70	167,19	193,95	217,74	126,90
Casca	3,38	6,24	8,95	10,38	13,23	15,25	17,33	10,68
Madeira (M)	21,69	55,29	88,17	115,32	153,96	178,70	200,41	116,22
Raiz (R)	12,94	21,37	28,90	40,37	43,10	32,50	45,65	32,12
Acima do solo (AS)	37,89	77,48	115,16	139,81	179,54	207,48	231,42	141,25
Biomassa arbórea total	50,83	98,85	144,06	180,18	222,64	239,98	277,07	173,37
Serapilheira acumulada	10,00	14,89	14,71	16,57	17,74	23,72	26,59	17,75
Biomassa total	60,83	113,74	158,77	196,75	240,38	263,70	303,66	191,12
Relação (M/F)	3,4	7,8	12,8	20,1	32,1	38,4	49,0	23,4
Relação (T/C)	2,0	3,9	5,4	8,9	13,5	14,3	15,9	9,1
Relação (AS/R)	2,9	3,6	4,0	3,5	4,2	6,4	5,1	4,2

No entanto, ao longo do ciclo produtivo, verificou-se comportamentos distintos, o que pode ser constatado pelo valor individual de biomassa ou pelas relações entre os componentes: M/F, T/C e AS/R.

Casca e madeira, e conseqüentemente o compartimento tronco, apresentaram tendência crescente para o acúmulo de biomassa em função da idade.

De modo geral, o componente raiz também apresentou tendência crescente para a biomassa em função da idade, pelo menos até os cinco anos de idade quando demonstrou uma relativa estabilização nos valores. A biomassa de raiz pode ser bastante sensível a variações na qualidade do sítio (características químicas e físicas), principalmente no que diz respeito à disponibilidade de nutrientes (REIS et al., 1985; REIS et al., 1987). É possível que a intensidade amostral não tenha sido

suficiente para cobrir todas as variações de sítio e assim estabelecer um padrão mais constante para o acúmulo de biomassa do sistema radicular.

Por outro lado, os componentes da copa, folha e galho, após apresentarem picos de acúmulo de biomassa aos 3 e 4 anos de idade, respectivamente, decresceram ao longo da rotação. De acordo com Binkley et al. (1997), esse padrão é bem mais evidente na folha e o ápice de acúmulo de biomassa pode variar em função da espécie, qualidade do sítio e condições de desenvolvimento, como espaçamento entre plantas. A biomassa de galho apresentou uma pequena elevação nas idades mais avançadas, o que pode estar relacionada com a abertura da copa nessas idades (o que estimula o crescimento de galhos) e com o engrossamento natural dos galhos devido ao aumento do diâmetro do tronco.

As taxas de deposição e decomposição ainda não estabilizaram e os valores de serapilheira acumulada apresentaram tendência crescente em função da idade dos povoamentos.

Os resultados observados estão de acordo com os padrões de produção e alocação de biomassa descritos por Waring e Schlesinger (1985); Miller (1995); Larcher (2000); Gonçalves et al. (2004). Em síntese, no período inicial de desenvolvimento dos povoamentos florestais, a prioridade de alocação de biomassa é para copa (expansão da área foliar) e sistema radicular, até o pleno desenvolvimento das copas; o que precede um período de intenso acúmulo de biomassa no tronco, especialmente madeira (GONÇALVES et al., 2004).

Apesar de ter havido aumento absoluto da biomassa da maioria dos componentes das árvores de *Eucalyptus saligna*, em valores relativos isso não foi demonstrado devido a grande elevação da biomassa de madeira do tronco (Figura 4). Dessa forma, somente a madeira do tronco apresentou elevação da biomassa relativa em função da idade, passando de 42 % aos 2 anos para 74 % aos 8 anos. A biomassa de folha, galho, casca do tronco e raiz, reduziu de 12 % para 2 %, 12 % para 3 %, 7 % para 6 % e 27 % para 15 %, respectivamente, entre as idades de 2 e 8 anos.

A casca do tronco é o componente que apresenta a menor variabilidade na biomassa relativa, podendo aumentar ou diminuir os valores em função da idade dos povoamentos (PEREIRA et al., 1984a; REIS et al., 1987; LADEIRA et al., 2001; SCHUMACHER et al., 2011).

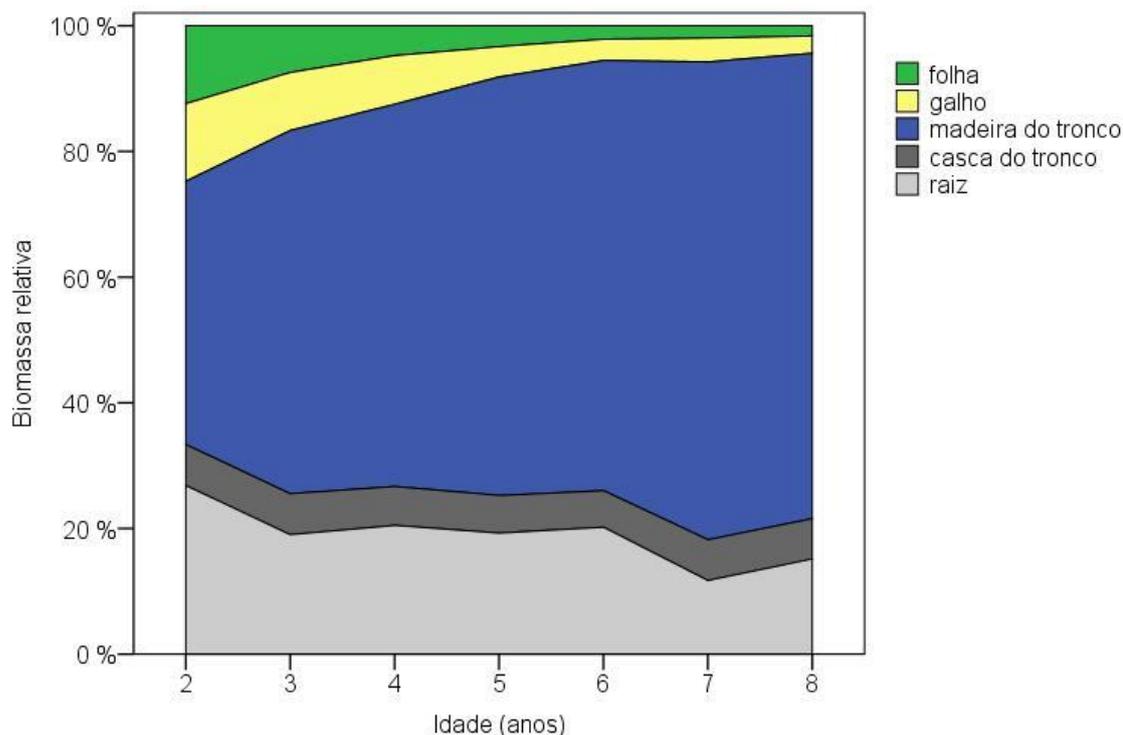


Figura 4 – Distribuição relativa da biomassa em função da idade dos povoamentos de *Eucalyptus saligna* na região de Guaíba - RS.

Schumacher et al. (2011) verificaram uma variação na partição de biomassa (%) entre povoamentos de *Eucalyptus* spp. de 2 e 8 anos de idade, para folha, galho, casca e madeira do tronco e raiz, de 10,1 a 2,9; 20,3 a 5,9; 7,9 a 6,0; 47,0 a 74,4 e 12,6 a 10,8, respectivamente, considerando uma biomassa total de 26,70 e 232,93 Mg ha⁻¹.

Pereira et al. (1984a) estudaram povoamentos de *Eucalyptus grandis* entre 1 e 7 anos de idade, plantados em solo de cerrado de baixa fertilidade, e observaram a seguinte variação na biomassa acima do solo: folhas de 12 % para 3,1 %; galhos de 30,6 % para 7,3 %; casca 24,6 % para 6,1 % e madeira de 32,8 % para 83,5 %.

Em valores absolutos, Santana et al. (1999) avaliaram produção de biomassa de procedências de *Eucalyptus saligna* em sítios de diferentes produtividades no Estado de São Paulo, e estimaram aos 6,5 anos pós-plantio, produções acima do solo entre 92,0 e 234,0 Mg ha⁻¹, sendo: folhas 2,9 a 6,2; galhos 6,9 a 14,2; casca 8,0 a 19,0; lenho 72 a 195.

Na Tabela 6 verifica-se a produtividade primária líquida acima e abaixo do solo nos povoamentos de *Eucalyptus saligna* com idades entre 2 e 8 anos pós-plantio.

Tabela 6 – Produtividade primária líquida acima e abaixo do solo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) em povoamentos de *Eucalyptus saligna* na região de Guaíba - RS.

Variáveis	Intervalo de idade (anos)						Média
	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	
PPLAS	41,5	40,4	27,8	42,6	30,2	26,3	34,8 (86 %)
PPLR	8,4	7,5	11,4	2,7	-10,6	13,1	5,5 (14 %)
PPL total	49,9	47,9	39,3	45,3	19,6	39,5	40,3

Em que: PPLAS = produtividade primária líquida acima do solo; PPLR = produtividade primária líquida de raiz.

Nos valores de PPLR observou-se uma certa inconsistência em função da idade, inclusive com um valor negativo entre 6 e 7 anos, mas é preciso considerar que são avaliações feitas em diferentes sítios e a grande variabilidade da biomassa do sistema radicular, associada à baixa intensidade amostral, provavelmente, contribuíram para esse resultado. No entanto, os valores médios permitiram uma boa caracterização da produtividade primária nos diferentes compartimentos estudados, com valores médios de 86 % nos componentes da biomassa acima do solo (PPLAS) e 14 % para o sistema radicular (PPLR) (Tabela 6).

Considerando-se a PPL total média, os plantios de *Eucalyptus saligna* apresentaram uma taxa anual de fixação de carbono de aproximadamente $18,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ (com base em uma concentração de C na biomassa de 46 %, segundo Bresinsky et al., 2012), ou ainda, na forma de CO_2 , o equivalente a $68,0 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Esses resultados estão de acordo com a literatura e confirmam que os plantios florestais tropicais estão entre os ecossistemas mais produtivos da Terra, com PPLAS muitas vezes superior a $40 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (LUGO et al., 1988; BINKLEY et al. 1997; BINKLEY e RYAN, 1998).

4.2 Estoque de nutrientes

Nas Tabelas 7 e 8 e Figuras 5 e 6, é apresentado o estoque de nutrientes nos componentes da biomassa de *Eucalyptus saligna* nos povoamentos de diferentes idades, em valores absolutos e relativos, para macro e micronutrientes, respectivamente.

O estoque de nutrientes nos povoamentos florestais tende a apresentar um comportamento assintótico ao longo do ciclo produtivo, alcançando um estado de equilíbrio, onde os incrementos na biomassa são contrabalançados com a morte de indivíduos, deposição de serapilheira e ciclagem interna de nutrientes (WARING e SCHLESINGER, 1985; ATTIWILL e LEEPER, 1987), como pôde ser observado para alguns componentes da biomassa nas Tabela 7 e 8.

Considerando-se os valores médios, os principais componentes da biomassa arbórea em acúmulo de nutrientes foram: madeira do tronco > raiz > folha > casca do tronco > galho; enquanto os nutrientes, apresentaram a seguinte ordem Ca > N > K > Mg > P ~ S > Fe > Mn > B > Zn > Cu.

Como foi constatado, a distribuição de nutrientes difere do padrão observado para a biomassa, o que decorre da grande diferença na concentração de nutrientes entre os componentes (REIS e BARROS, 1990; MENGEL e KIRKBY, 1982). O principal exemplo disso são as folhas, consideradas o centro metabólico da planta, é o componente com a maior concentração para a maioria dos nutrientes, (MARSCHNER, 1995) e geralmente apresenta o menor acúmulo de biomassa, principalmente em povoamentos adultos.

A despeito da pequena biomassa relativa (apenas 2 %), considerando-se os povoamentos com 7 anos (possível idade de colheita), o componente folha representou 15 % do N, 9 % do P, 8 % do K, S e Mn, 7 % do Mg e B, 5 % do Ca, 4 % do Cu, 3 % do Zn e 1 % do Fe, do estoque total nos componentes arbóreos. Por outro lado, na mesma idade, a madeira do tronco, com 74 % da biomassa total, acumulou 61 % do Cu, 56 % do P, 53 % do K, 48 % do N, 47 % do B e Zn, 44 % do S, 34 % do Mg, 25 % do Mn, 24 % do Ca e 13 % do Fe.

Tabela 7 – Estoque de macronutrientes (kg ha⁻¹) nos componentes arbóreos e na serapilheira acumulada, em povoamentos de *Eucalyptus saligna* de diferentes idades, na região de Guaíba - RS.

Componentes da biomassa	Idade pós-plantio (anos)						Média
	2	3	4	5	6	7	
Nitrogênio (N)							
Copa	123,44	174,93	168,82	157,33	132,22	111,40	144,86
Folha	102,72	143,32	131,15	124,19	101,30	76,86	113,26
Galho	20,72	31,61	38,67	33,14	30,92	34,54	31,60
Tronco	50,29	124,52	167,65	209,42	318,75	307,17	196,30
Casca	14,00	27,95	31,07	38,90	53,08	54,54	36,59
Madeira	36,29	96,57	136,58	170,52	265,67	252,63	159,71
Raízes	38,32	71,07	90,96	127,33	130,55	110,31	94,76
Acima do solo	173,73	299,45	337,47	366,75	450,97	418,57	341,16
Total arbóreo	212,05	370,52	428,43	494,08	581,52	528,88	435,91
Serapilheira	88,32	88,35	85,85	120,88	113,78	139,10	106,16
Estoque total	300,37	458,87	514,28	614,96	695,30	668,66	542,07
Fósforo (P)							
Copa	14,16	16,61	15,91	17,74	10,89	8,49	13,97
Folha	9,20	11,38	10,69	11,57	6,77	5,04	9,11
Galho	4,96	5,23	5,22	6,17	4,12	3,45	4,86
Tronco	8,26	18,66	23,66	29,86	34,45	39,57	25,74
Casca	2,01	3,55	4,35	6,72	7,08	7,41	5,19
Madeira	6,25	15,11	19,31	23,14	27,37	32,16	20,56
Raízes	2,87	5,16	6,38	10,06	10,50	8,98	7,33
Acima do solo	22,42	35,27	39,57	47,60	45,34	48,06	39,71
Total arbóreo	25,29	40,43	45,95	57,66	55,84	57,04	47,04
Serapilheira	4,92	5,10	5,83	7,35	5,53	7,14	5,98
Estoque total	30,21	45,53	51,78	65,01	61,37	64,18	53,01
Potássio (K)							
Copa	67,57	90,42	85,53	66,43	62,52	68,82	73,55
Folha	44,73	57,59	50,23	35,75	32,85	30,85	42,00
Galho	22,84	32,83	35,30	30,68	29,67	37,97	31,55
Tronco	60,06	147,60	179,11	175,98	244,40	274,41	180,26
Casca	13,83	30,89	34,64	36,72	49,77	55,04	36,82
Madeira	46,23	116,71	144,47	139,26	194,63	209,86	141,86
Raízes	38,32	68,44	71,21	80,54	80,90	60,46	66,65
Acima do solo	127,63	238,02	264,64	242,41	306,92	343,23	253,81
Total arbóreo	165,95	306,46	335,85	322,95	387,82	403,69	320,45
Serapilheira	16,62	22,18	19,74	23,62	20,17	22,69	20,84
Estoque total	182,57	328,64	355,59	346,57	407,99	416,87	339,71

(continua)

(conclusão)

Tabela 7 – Estoque de macronutrientes (kg ha⁻¹) nos componentes arbóreos e na serapilheira acumulada, em povoamentos de *Eucalyptus saligna* de diferentes idades, na região de Guaíba - RS.

Componentes da biomassa	Idade pós-plantio (anos)						Média
	2	3	4	5	6	7	
Cálcio (Ca)							
Copa	160,62	180,55	165,28	122,06	93,95	96,87	136,56
Folha	68,03	73,26	59,08	47,80	30,05	30,80	51,50
Galho	92,59	107,29	106,20	74,26	63,90	66,07	85,05
Tronco	84,74	213,70	281,31	267,74	364,80	404,31	269,43
Casca	58,94	150,91	192,95	195,78	195,29	241,03	172,48
Madeira	25,80	62,79	88,36	71,96	169,51	163,28	96,95
Raízes	86,21	177,96	182,17	202,27	221,24	170,87	173,45
Acima do solo	245,36	394,25	446,59	389,80	458,75	501,18	405,99
Total arbóreo	331,57	572,21	628,76	592,07	679,99	672,05	579,44
Serapilheira	107,97	177,52	193,44	238,22	142,83	242,99	183,83
Estoque total	439,54	749,73	822,20	830,29	822,82	915,04	763,27
Magnésio (Mg)							
Copa	29,52	39,44	44,36	29,62	28,52	29,12	33,43
Folha	17,07	21,70	21,57	14,97	13,49	12,10	16,82
Galho	12,45	17,74	22,79	14,65	15,03	17,02	16,61
Tronco	21,95	45,90	69,37	66,12	97,41	111,36	68,69
Casca	12,63	21,64	31,68	34,58	51,37	53,66	34,26
Madeira	9,32	24,26	37,69	31,54	46,04	57,70	34,43
Raízes	14,37	25,71	26,92	34,28	45,57	27,17	29,00
Acima do solo	51,47	85,34	113,73	95,74	125,93	140,48	102,12
Total arbóreo	65,84	111,05	140,65	130,02	171,50	167,65	131,12
Serapilheira	15,19	22,95	27,32	33,43	23,63	35,16	26,28
Estoque total	81,03	134,00	167,97	163,45	195,136	202,81	157,40
Enxofre (S)							
Copa	8,67	12,52	15,00	11,46	7,80	6,56	10,34
Folha	6,79	10,05	10,80	8,88	5,71	4,22	7,74
Galho	1,88	2,47	3,20	2,58	2,09	2,34	2,43
Tronco	5,36	13,84	23,38	20,22	31,62	25,47	19,98
Casca	1,10	2,45	3,93	3,37	3,68	3,62	3,03
Madeira	4,26	11,39	19,45	16,85	27,94	21,85	16,96
Raízes	4,79	5,69	11,73	18,21	17,73	17,98	12,69
Acima do solo	14,03	26,36	38,38	31,68	39,42	32,03	30,32
Total arbóreo	18,82	32,05	50,11	53,84	57,15	50,01	43,66
Serapilheira	5,50	8,07	7,89	10,33	8,06	10,54	8,40
Estoque total	24,32	40,12	57,00	60,22	65,21	60,55	51,24

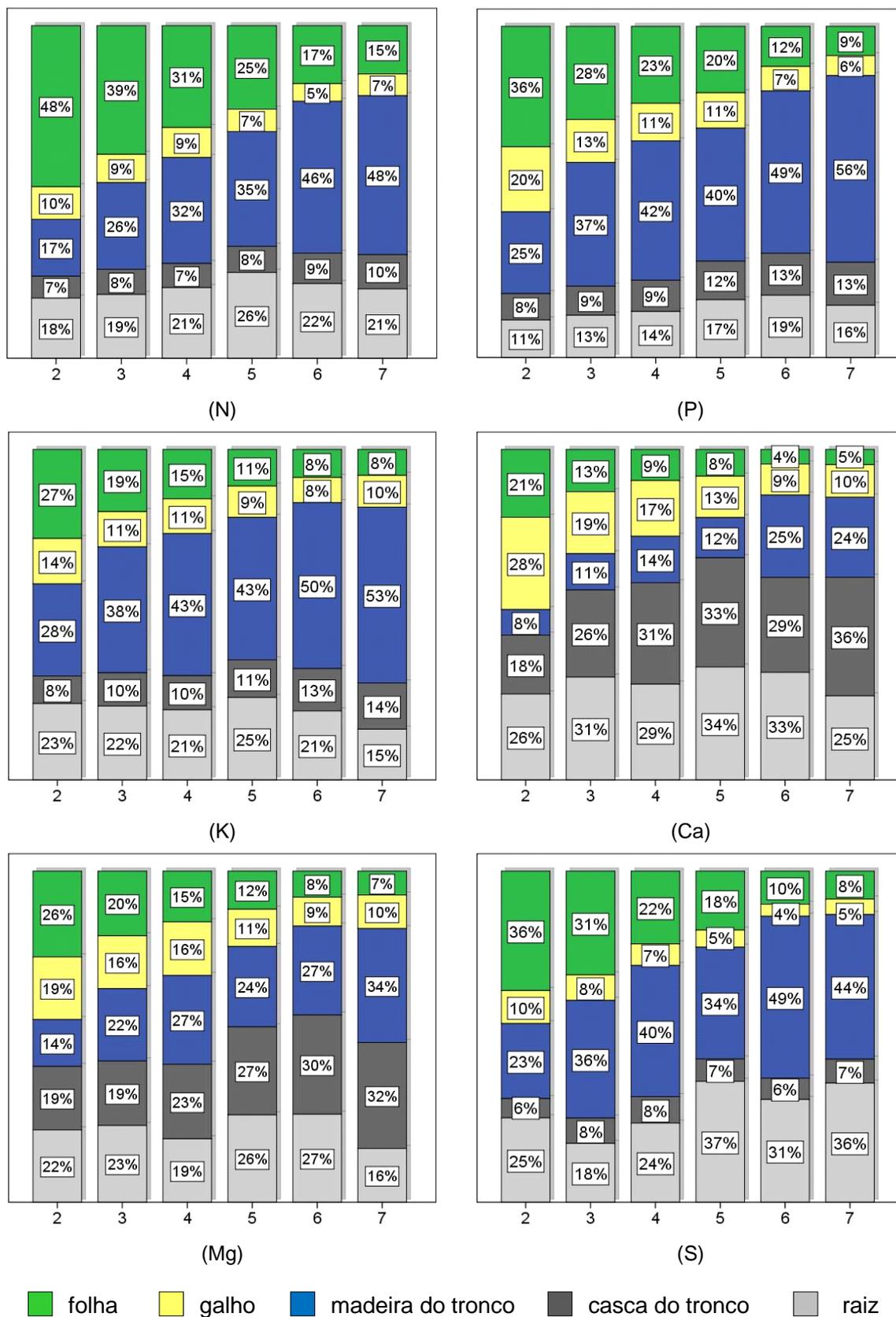


Figura 5 – Distribuição relativa de macronutrientes nos povoamentos de *Eucalyptus saligna* entre 2 e 7 anos de idade, na região de Guaíba - RS.

Tabela 8 – Estoque de micronutrientes (g ha⁻¹) nos componentes arbóreos e na serapilheira acumulada, em povoamentos de *Eucalyptus saligna* de diferentes idades, na região de Guaíba - RS.

Componentes da biomassa	Idade pós-plantio (anos)						Média
	2	3	4	5	6	7	
Boro (B)							
Copa	367,69	390,22	362,15	267,85	289,33	224,32	316,93
Folha	258,66	284,64	241,22	184,45	177,12	123,85	211,66
Galho	109,03	105,58	120,93	83,40	112,21	100,47	105,27
Tronco	320,78	440,75	719,19	535,35	877,12	1108,81	667,05
Casca	78,09	127,79	138,65	140,98	184,80	225,50	149,30
Madeira	242,69	312,96	580,84	394,37	692,32	883,31	517,75
Raízes	191,58	403,91	597,56	540,68	618,77	535,47	481,33
Acima do solo	688,47	830,97	1081,64	803,20	1166,45	1333,13	983,98
Total arbóreo	880,05	1234,88	1679,20	1343,88	1785,22	1868,60	1465,31
Serapilheira	229,40	321,18	317,44	369,62	226,68	366,10	305,07
Estoque total	1109,45	1556,06	1996,64	1713,50	2011,90	2234,70	1770,38
Cobre (Cu)							
Copa	67,74	94,63	115,34	87,00	91,03	71,64	87,90
Folha	34,37	44,30	44,77	39,34	34,61	25,23	37,10
Galho	33,37	50,33	70,57	47,66	56,42	46,41	50,79
Tronco	77,74	198,78	300,36	394,91	481,22	441,58	315,77
Casca	10,83	21,36	32,99	43,06	60,00	52,36	36,77
Madeira	66,91	177,42	267,37	351,85	421,22	389,22	279,00
Raízes	47,90	103,24	90,95	112,03	162,85	122,87	106,64
Acima do solo	145,48	293,41	415,70	481,91	572,25	513,22	403,66
Total arbóreo	193,38	396,65	506,65	593,94	735,10	636,09	510,30
Serapilheira	66,10	78,61	83,25	93,76	103,72	125,13	91,76
Estoque total	259,48	475,26	589,90	687,70	838,82	761,22	602,06
Ferro (Fe)							
Copa	957,51	1150,24	980,55	731,88	715,87	693,67	871,62
Folha	632,42	707,36	588,39	469,68	408,93	353,71	526,75
Galho	325,09	442,88	392,16	262,20	306,94	339,96	344,87
Tronco	822,25	2639,42	3299,69	3800,63	4770,41	5040,32	3395,45
Casca	161,57	527,21	282,04	267,67	628,47	581,00	407,99
Madeira	660,68	2112,21	3017,65	3532,96	4141,94	4459,32	2987,46
Raízes	5747,43	20861,59	34456,71	29986,92	51634,76	28047,56	28455,83
Acima do solo	1779,76	3789,66	4280,24	4532,51	5486,28	5733,99	4267,07
Total arbóreo	7527,19	24651,25	38736,95	34519,43	57121,04	33781,55	32722,90
Serapilheira	14052,87	26254,76	26772,69	16510,72	42025,16	31928,07	26257,38
Estoque total	21580,06	50906,01	65509,64	51030,15	99146,20	65709,62	58980,28

(continua)

(conclusão)

Tabela 8 – Estoque de micronutrientes (g ha^{-1}) nos componentes arbóreos e na serapilheira acumulada, em povoamentos de *Eucalyptus saligna* de diferentes idades, na região de Guaíba - RS.

Componentes da biomassa	Idade pós-plantio (anos)						Média
	2	3	4	5	6	7	
Manganês (Mn)							
Copa	10325,11	10120,95	8930,84	7798,49	3628,53	5661,59	7744,25
Folha	6498,96	5937,56	3668,09	3977,31	1503,95	2013,41	3933,21
Galho	3826,15	4183,39	5262,75	3821,18	2124,58	3648,18	3811,04
Tronco	3298,68	8523,88	11153,43	10805,39	8895,56	16873,40	9925,06
Casca	2341,32	5874,99	7508,70	7088,69	5369,63	10505,82	6448,19
Madeira	957,36	2648,89	3644,73	3716,70	3525,93	6367,58	3476,87
Raízes	383,16	964,91	544,96	2712,14	1222,02	2938,65	1460,97
Acima do solo	13623,79	18644,83	20084,27	18603,88	12524,09	22534,99	17669,31
Total arbóreo	14006,95	19609,74	20629,23	21316,02	13746,11	25473,64	19130,28
Serapilheira	7928,55	14028,16	11380,90	15364,36	19244,34	21404,55	14891,81
Estoque total	21935,50	33637,90	32010,13	36680,38	32990,45	46878,19	34022,09
Zinco (Zn)							
Copa	185,57	193,85	190,42	147,83	145,03	133,63	166,06
Folha	105,12	103,86	90,63	65,86	64,53	46,89	79,48
Galho	80,45	89,99	99,79	81,97	80,50	86,74	86,57
Tronco	138,65	360,13	466,07	522,90	862,21	761,43	518,58
Casca	23,46	53,86	56,68	66,57	84,52	86,41	61,92
Madeira	115,19	306,27	409,39	456,33	777,79	675,02	456,67
Raízes	191,58	356,13	376,15	512,89	595,62	534,85	427,87
Acima do solo	324,22	553,98	656,49	670,73	1007,34	895,06	684,64
Total arbóreo	515,80	910,11	1032,64	1183,62	1602,96	1429,91	1112,51
Serapilheira	201,59	200,87	213,88	257,04	244,37	261,77	229,92
Estoque total	717,39	1110,98	1246,52	1440,66	1847,33	1691,68	1342,43

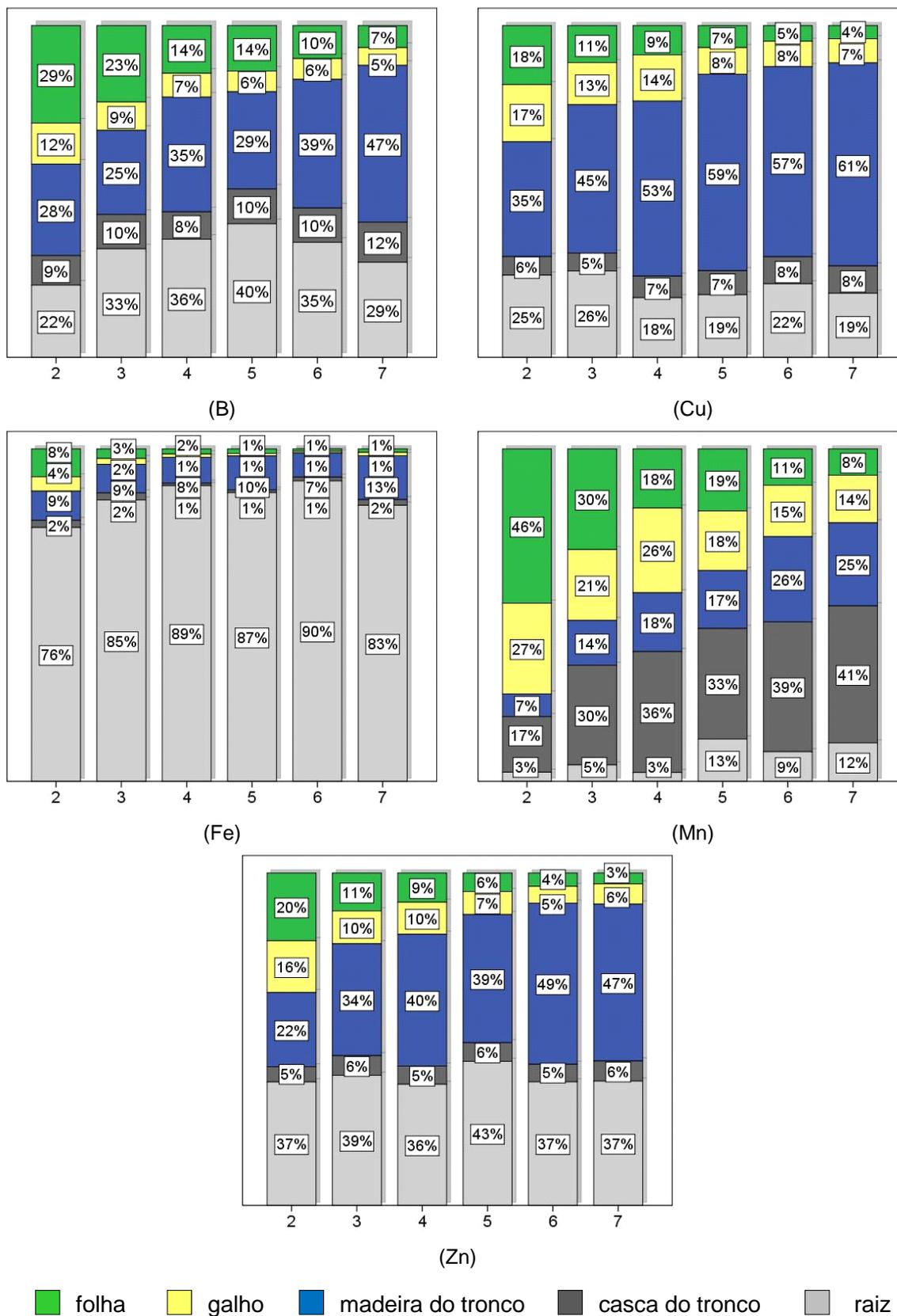


Figura 6 – Distribuição relativa de micronutrientes nos povoamentos de *Eucalyptus saligna* entre 2 e 7 anos de idade, na região de Guaíba - RS.

Os macronutrientes presentes em menores quantidades relativas na folha e na madeira do tronco foram os mais abundantes na casca do tronco, o que é amplamente relatado na literatura científica para o eucalipto (PEREIRA et al., 1984a; PEREIRA et al., 1984b; FÖLSTER e KHANNA, 1997; SANTANA et al., 1999; NEVES, 2000; SANTANA et al., 2008). A casca, apesar de ter representado somente 6 % da biomassa média nos povoamentos com 7 anos de idade, acumulou 41 % do Mn, 36 % do Ca, 32 % do Mg, 14 % do K, 13 % do P, 12 % do B, 10 % do N, 8 % do Cu, 7 % do S, 6 % do Zn e 2 % do Fe.

O componente galho apresentou acúmulo de nutriente mais proporcional à sua biomassa relativa de 4 %, ou seja: 14 % do Mn, 10 % do K, Ca e Mg, 7 % do N e Cu, 6 % do P e Zn, 5 % do S e B, e 1 % do Fe, considerando-se os povoamentos de 7 anos de idade.

Devido, principalmente, à inerente dificuldade de amostragem da biomassa abaixo do solo, alguns estudos não consideram esse componente, mas ficou evidente a importância das raízes, sobretudo para o estoque de nutrientes (Tabelas 7 e 8 e Figuras 5 e 6). Com biomassa relativa média de 14 % nos plantios de *Eucalyptus saligna* de 7 anos de idade, o sistema radicular representou 83 % do Fe, 37 % do Zn, 36 % do S, 29 % do B, 25 % do Ca, 21 % do N, 19 % do Cu, 16 % do P e Mg, 15 % do K e 12 % do Mn. A biomassa de raiz apresentou quantidades expressivas de nutrientes, no entanto, no caso do Fe, é preciso considerar uma possível contaminação pelo solo.

Reis e Barros (1990) salientaram a importância de se considerar o sistema radicular nos estudos que avaliam a demanda de nutrientes por espécies florestais, bem como, quando o objetivo for analisar diferentes métodos de manejo sobre a produtividade de futuras rotações, especialmente no caso de espécies que se regeneram por brotação.

Assim como observado para a biomassa de serapilheira acumulada, de modo geral, o estoque de nutriente também apresentou tendência crescente em função da idade dos povoamentos de *Eucalyptus saligna*. A remoção ou queima desse compartimento tem implicações importantes para o balanço de nutrientes. Se considerarmos os valores médios para os povoamentos com 7 anos de idade, a serapilheira acumulada representou 716 % do Fe, 336 % do Mn, 149 % do Ca, 61 % do Mg, 55 % do N, 48 % do S, 41 % do B, 39 % do Zn, 32 % do Cu, 22% do P e 11 % do K, estocados na madeira do tronco.

Verifica-se que os estoques na serapilheira são mais expressivos para nutrientes com baixa mobilidade no tecido vegetal. Os nutrientes com alta mobilidade no floema são retranslocados para partes da planta com maior atividade metabólica o que reduz suas concentrações nos tecidos senescentes e aumenta a concentração dos demais (REIS e BARROS, 1990; PALLARDY, 2008). De acordo com Poggiani e Schumacher (2004), a ciclagem interna é um importante processo para a manutenção dos nutrientes no interior da planta, e é mais importante para nutrientes como N, P, K e Mg, e menos importante para Ca, S e micronutrientes.

Quanto ao elevado estoque de Fe na serapilheira acumulada, é preciso considerar que os resíduos em contato com o solo estão sujeitos à contaminação, principalmente por óxidos de ferro, o que eleva substancialmente a concentração desse nutriente. Os teores de N também podem sofrer alteração, devido à atividade de microorganismos que fixam N atmosférico, enquanto utilizam uma fonte de carboidrato da serapilheira (MASON, 1980).

A manutenção dos fluxos de nutrientes nos ecossistemas florestais é indispensável para a sustentabilidade nutricional. O conhecimento da distribuição dos nutrientes nos diferentes componentes da biomassa florestal, ao longo do ciclo produtivo, é um importante subsídio para a tomada de decisões com o objetivo de manter a capacidade produtiva dos sítios florestais (REIS e BARROS, 1990; SANTANA et al., 1999; SANTANA et al., 2002; SCHUMACHER et al., 2011).

Uma das medidas mais simples dentro dos princípios da sustentabilidade nutricional consiste na reposição dos nutrientes que são exportados por meio da remoção da biomassa na colheita, denominada de adubação de restituição (MALAVOLTA, 1989). Dentro dessa abordagem, considerando-se a colheita do tronco nos povoamentos com 7 anos de idade, as taxas de exportação de nutrientes (com base na biomassa arbórea total) ficaram acima de 50 %, ou seja: 69 % para o P, 67 % para o K, 66 % para o Mg, 60 % para o Ca, 58 % para o N e 51 % para o S (Figura 7).

Principalmente quando analisado em longo prazo, um simples ajuste na intensidade de colheita da biomassa pode representar a diferença entre um manejo nutricional sustentável e um deletério às reservas de nutrientes do sistema. Tomando-se como base os valores médios dos povoamentos com 7 anos de idade, o descasque no campo pode representar uma redução nas taxas de exportação de nutrientes de 60 % para Ca, 48 % para Mg, 21 % para K, 19 % para P, 18 % para N

e 14 % para S, mesmo que a casca tenha representado apenas 8 % da biomassa do tronco (Figura 7).

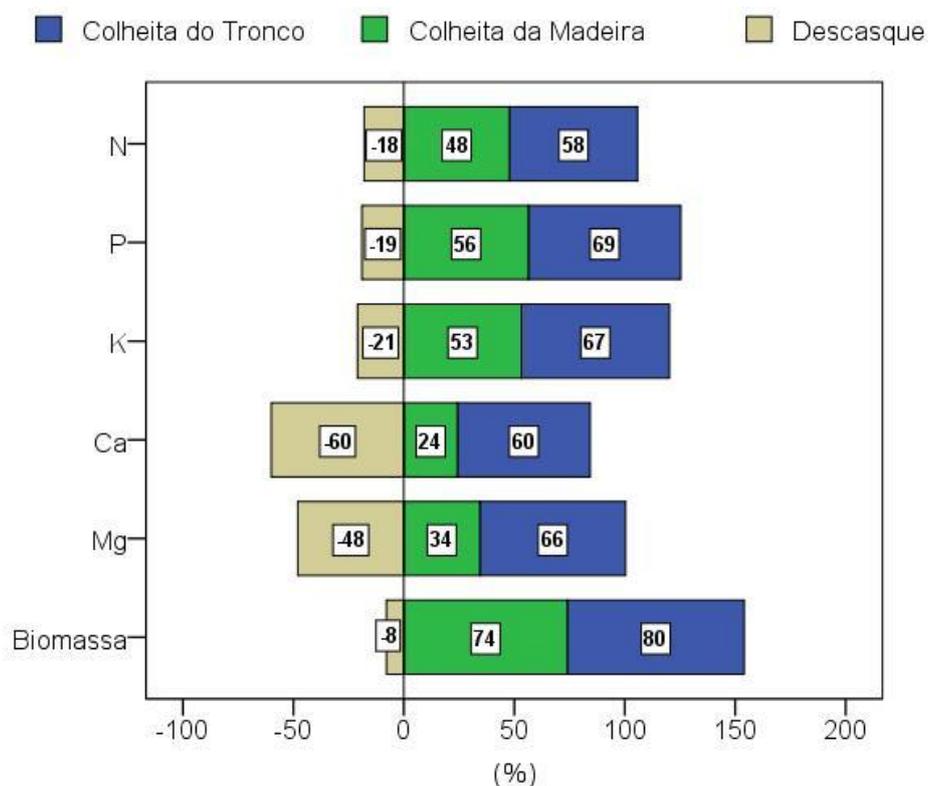


Figura 7 – Taxas de exportação de nutrientes em função do método de colheita da biomassa nos povoamentos de *Eucalyptus saligna* com 7 anos de idade, na região de Guaíba - RS.

4.3 Sistema de recomendação de fertilizantes

A taxa de exportação de nutrientes é diretamente proporcional à quantidade de biomassa e ao teor nutricional dos componentes envolvidos na colheita florestal. Os teores de nutrientes variam em função de fatores como: espécie (capacidade de absorção, distribuição e utilização dos nutrientes); época do ano; componente da biomassa; solo (fertilidade); idade da floresta e condições de desenvolvimento

(densidade de plantio, competição) (BINKLEY, 1986; REIS e BARROS, 1990; PALLARDY, 2008).

Uma forma de expressar conjuntamente os diversos fatores que condicionam a concentração nutricional no tecido vegetal é a eficiência de utilização de nutrientes (EUN) (BARROS et al., 1986, BARROS FILHO, 2003). A EUN representa quantas unidades de biomassa são formadas por unidade de nutriente, ou seja, quanto maior o valor mais eficiente é a conversão dos nutrientes em biomassa.

A EUN no tronco para os povoamentos de *Eucalyptus saligna* apresentou grande variação entre os diferentes nutrientes e para um mesmo nutriente, os valores demonstraram tendência crescente em função da idade, pelo menos até os 6 anos pós-plantio (Figura 8).

A diferenciação na concentração de nutrientes, entre componentes da biomassa, e dentro de um mesmo componente, tende a se intensificar com a idade, em decorrência da ciclagem interna, que desloca nutrientes de tecidos senescentes para regiões com maior atividade metabólica, causando diluição dos nutrientes e aumento da EUN, o que é mais acentuado para nutrientes de alta mobilidade no tecido vegetal (REIS e BARROS, 1990; BARROS et al., 2004; PALLARDY, 2008).

A EUN é mais elevada nos tecidos lenhosos, principalmente na madeira do tronco, o que está relacionado com o processo de diferenciação de alburno em cerne, o que promove a ciclagem interna de nutrientes (REIS e BARROS, 1990). Por apresentar menor concentração nutricional, e como a proporção de cerne aumenta com a idade do povoamento (WARING e SCHLESINGER, 1985), a exportação de nutrientes com uma unidade de biomassa de madeira do tronco, geralmente, é menor em povoamentos mais velhos.

Em termos práticos, do ponto de vista da sustentabilidade nutricional, o valor da EUN deve ser o maior possível, com isso, será exportado menos nutriente por unidade de biomassa, reduzindo o impacto nutricional da colheita florestal.

Em ambiente nativo, nas florestas naturais na Austrália, o *Eucalyptus saligna* ocupa os sítios de melhor qualidade (classificados como florestas pluviais ou subtropicais), juntamente com *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus torelliana* e um ecótipo de *Eucalyptus clöeziana* (BARROS et al., 1990b). Esse comportamento indica uma maior exigência nutricional e possivelmente uma menor EUN, já que geralmente a EUN aumenta com a diminuição da disponibilidade do nutriente no solo (BARROS et al., 1986).

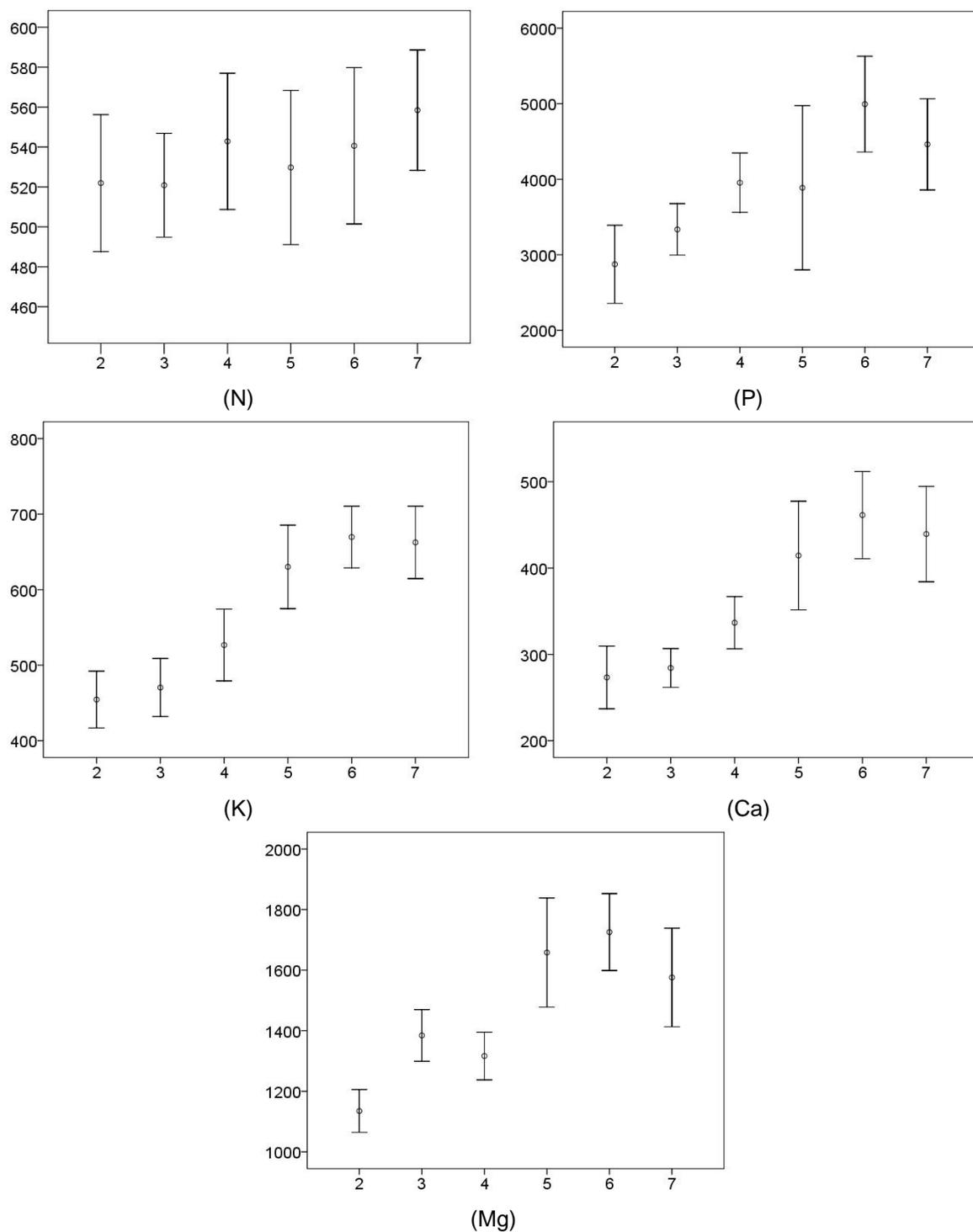


Figura 8 – Intervalo de confiança ($p = 0,05$) para a EUN no tronco nos povoamentos de *Eucalyptus saligna* entre 2 e 7 anos de idade, na região de Guaíba - RS.

Em condições de plantio, sob diferentes idades e situações edafoclimáticas Rezende et al. (1983); Silva et al. (1983a) e Santana et al. (2002), referiram superioridade na EUN por parte do *Eucalyptus grandis* em relação ao *Eucalyptus saligna*.

Em um teste de procedência no Estado de São Paulo, Silva et al. (1983a) verificaram maior EUN do *Eucalyptus grandis* em comparação ao *Eucalyptus saligna* e deste, em relação ao *Eucalyptus propinqua*, *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus robusta*.

Considerando-se os povoamentos de *Eucalyptus saligna* nas idades mais avançadas (fase de colheita), a EUN no tronco apresentou a seguinte ordem (média): P (5.000), Mg (1.700), K (650), N (550) e Ca (450); o que está de acordo com os resultados obtidos por Silva et al. (1983a) e Santana et al. (2002). No entanto, esse padrão pode ser alterado tanto na ordem como na grandeza, como foi demonstrado por Rezende et al. (1983), Pereira et al. (1984b) e Teixeira et al. (1989), para a mesma espécie, principalmente em função das características edáficas.

No Estado de São Paulo, em uma avaliação de procedências aos 6,5 anos de idade, Santana et al. (2002) encontraram a mesma ordem decrescente para a EUN no tronco e com os seguintes intervalos de variação: 9.211 a 4.148 para P, 3.748 a 1.241 para Mg, 3.078 a 358 para K, 938 a 455 para N e 723 a 202 para Ca, para o *Eucalyptus saligna*.

Na Tabela 9 são apresentadas as equações que descrevem a variação da EUN no tronco nos plantios de *Eucalyptus saligna* em função da idade e da biomassa no tronco, bem como as estatísticas de ajuste e as condicionantes de regressão. Entre os componentes do modelo de recomendação de fertilizantes a EUN no tronco foi o que apresentou maior dificuldade de modelagem, sendo que as variáveis preditivas utilizadas explicaram menos de 60 % da variação, com erros relativos entre 10,6 e 23,3.

Na Tabela 10 verificam-se as equações que estimam a biomassa individual dos diferentes componentes das árvores, em função da idade e do volume com casca; e da serapilheira acumulada, com base na biomassa do tronco da árvore média e da idade do povoamento.

E finalmente, nas Tabelas 11, 12, 13, 14 e 15 apresentam-se as equações para estimativa do conteúdo de N, P, K, Ca e Mg, respectivamente, nos

componentes da biomassa de *Eucalyptus saligna*; e do estoque desses nutrientes na serapilheira acumulada.

Tanto para a biomassa como para os nutrientes, em função da menor variabilidade dos componentes do tronco, de modo geral, casca e madeira apresentaram os maiores valores para as estatísticas que avaliam o ajuste das equações de regressão. Para todas as variáveis dependentes das equações do sistema de recomendação de fertilizantes (EUN, biomassa e nutrientes) as condicionantes das regressões foram atendidas. Com base nos valores de probabilidade ($> 0,05$) associados aos testes de Shapiro-Wilk e de White, é possível afirmar que os resíduos apresentam distribuição normal e têm variância homogênea nos diferentes níveis dos previsores (homocedásticos); assim como os resíduos não apresentam correlação em série, como se comprova pelo nível de probabilidade associado ao teste de Durbin-Watson.

Tabela 9 – Equações de regressão para estimativa da eficiência de utilização dos nutrientes no tronco em plantios de *Eucalyptus saligna* entre 2 e 7 anos de idade.

Nutrientes		Equações de regressão									
1	N	$\ln y = 6,511180^{**} - 0,780540^{**} \cdot (t^2)^{-1} + 0,014195^* \cdot (BT^3)^{-1}$									
2	P	$y = 2500,3720^{**} + 19,959020^{**} \cdot BT$									
3	K	$y = 186,221340^{**} + 44,412140^{**} \cdot \ln(BT \cdot t^3)$									
4	Ca	$\ln y = 5,619659^{**} + 0,001143^* \cdot BT + 0,006961^{**} \cdot t^2$									
5	Mg	$\ln y = 6,834485^{**} + 0,05206^{**} \cdot \ln(BT \cdot t^3)$									
Estatísticas de ajuste e condicionantes das regressões											
	Prob.> F	R ² ajust.	Syx	Syx (%)	Shapiro-Wilk		White		D. Watson		
					Valor	Prob.	Valor	Prob.	Valor	α	
1	0,0001	0,569	0,1306	10,6	0,98	0,516	3,52	0,621	1,87	0,05	
2	0,0001	0,506	973,10	23,3	0,97	0,545	1,84	0,399	1,59	0,01	
3	0,0001	0,547	101,90	15,0	0,95	0,118	1,98	0,371	1,77	0,05	
4	0,0001	0,351	0,2243	18,2	0,97	0,105	0,95	0,966	1,63	0,01	
5	0,0001	0,437	0,1543	13,6	0,96	0,233	1,86	0,395	1,73	0,05	

Em que: ln = logaritmo natural; y = eficiência de utilização do respectivo nutriente (N, P, K, Ca e Mg) no tronco (madeira e casca); BT = biomassa do tronco, em kg árvore⁻¹ e no caso da serapilheira acumulada, biomassa do tronco da árvore média, em kg; t = idade do povoamento, em anos; ns, * e ** = significância estatística dos coeficientes da equação: não significativo e significativo em nível de 5 % e 1 % de probabilidade de erro, respectivamente; Prob. = nível de significância para a estatística; R² ajust. = coeficiente de determinação ajustado em função do número de coeficientes da equação; Syx = erro-padrão da estimativa absoluto; Syx (%) = erro-padrão da estimativa relativo; α = nível de probabilidade associado ao teste.

Tabela 10 – Equações de regressão para estimativa da biomassa individual (kg árvore⁻¹) dos diferentes componentes das árvores de *Eucalyptus saligna* e da serapilheira acumulada entre 2 e 7 anos de idade.

Componente da biomassa		Equações de regressão								
1	Folha	$\ln y = 1,735355^{**} - 0,053240^{**} \cdot t^2 + 1,063916^{**} \cdot (v \cdot t) - 0,679510^{**} \cdot (v^2 \cdot t) - 0,003790^{**} \cdot v^{-1}$								
2	Galho	$\ln y = 3,961808^{**} + 2,056488^{**} \cdot \ln v - 0,710420^{**} \cdot \ln(v^2 \cdot t)$								
3	Casca do tronco	$\ln y = 2,569383^{**} - 0,00190^{**} \cdot v^{-1} + 0,314905^{**} \cdot \ln(v^2 \cdot t)$								
4	Madeira do tronco	$\ln y = 5,608587^{**} - 0,005120^{**} \cdot t^2 + 0,344767^{**} \cdot \ln(v^3 \cdot t) + 0,418502^{**} \cdot (t^3)^{-1}$								
5	Raiz	$\ln y = 3,548986^{**} + 0,192595^{**} \cdot \ln(v^2 \cdot t)$								
6	Serapilheira acumulada	$y = 34,69970^{**} + 0,436462^{**} \cdot t^2 - 2662,640^{**} \cdot (BT^2)^{-1} - 3,741720^{**} \cdot \ln(BT \cdot t^2)$								
Estatísticas de ajuste e condicionantes das regressões										
	Prob. > F	R ² ajust.	Syx	Syx (%)	Shapiro-Wilk		White		D. Watson	
					Valor	Prob.	Valor	Prob.	Valor	α
1	0,0001	0,532	0,3773	23,6	0,95	0,081	13,71	0,152	1,65	0,01
2	0,0001	0,648	0,3008	28,3	0,96	0,198	3,03	0,695	2,03	0,05
3	0,0001	0,979	0,1271	12,0	0,96	0,089	2,27	0,811	1,80	0,05
4	0,0001	0,995	0,0782	6,1	0,98	0,614	11,10	0,268	2,03	0,05
5	0,0001	0,778	0,2291	17,3	0,97	0,826	0,68	0,713	1,62	0,01
6	0,0001	0,712	3,1049	13,7	0,97	0,415	5,81	0,444	2,06	0,05

Em que: ln = logaritmo natural; y = biomassa de folha, galho, casca do tronco, madeira do tronco e raiz, em kg árvore⁻¹, ou serapilheira acumulada em Mg ha⁻¹; v = volume do tronco com casca, em m³; t = idade do povoamento, em anos; BT = biomassa do tronco (madeira e casca), em kg árvore⁻¹, no caso da serapilheira acumulada, biomassa do tronco da árvore média, em kg; ns, * e ** = significância estatística dos coeficientes da equação: não significativo e significativo em nível de 5 % e 1 % de probabilidade de erro, respectivamente; Prob. = nível de significância para a estatística; R² ajust. = coeficiente de determinação ajustado em função do número de coeficientes da equação; Syx = erro-padrão da estimativa, absoluto; Syx (%) = erro-padrão da estimativa, relativo; α = nível de probabilidade associado ao teste.

Tabela 11 – Equações de regressão para estimativa do conteúdo de nitrogênio (g árvore⁻¹) dos diferentes componentes das árvores de *Eucalyptus saligna* e da serapilheira acumulada entre 2 e 7 anos de idade.

Componente da biomassa		Equações de regressão								
1	Folha	$\ln y = 4,276977^{**} + 0,015011^{**} \cdot BT - 0,040810^{**} \cdot t^2 - 0,000020^{**} \cdot BT^2 - 0,812990^{**} \cdot (BT^3)^{-1}$								
2	Galho	$\ln y = 4,717067^{**} + 0,523418^{**} \cdot \ln BT^3 - 0,742980^{**} \cdot \ln(BT \cdot t) + 0,210205 \cdot \ln(EUN)^{-1}$								
3	Casca do tronco	$\ln y = 0,106571^{ns} - 0,662460^{**} \cdot \ln(BT^3)^{-1} - 0,476250^{**} \cdot \ln(BT^2 \cdot t) - 0,00110 \cdot EUN$								
4	Madeira do tronco	$\ln y = -0,620040^{**} - 0,393850^{**} \cdot t^1 - 0,336970^{**} \cdot \ln(BT^3)^{-1} + 568,69730^{**} \cdot EUN^{-1}$								
5	Raiz	$\ln y = 2,522794^{**} + 0,131996^{**} \cdot \ln BT^3$								
6	Serapilheira acumulada	$\ln y = 0,688497^{ns} + 2666,3070^{**} \cdot (BT^3)^{-1} - 0,08065^{**} \cdot \ln(BT^3)^{-1} - 0,000020 \cdot BS^3 - 1,057290^{**} \cdot \ln BS^{-1}$								
Estatísticas de ajuste e condicionantes das regressões										
	Prob. > F	R ² ajust.	Syx	Syx (%)	Shapiro-Wilk		White		D. Watson	
					Valor	Prob.	Valor	Prob.	Valor	α
1	0,0001	0,690	0,3085	20,4	0,98	0,358	19,77	0,137	1,71	0,01
2	0,0001	0,723	0,3124	26,1	0,96	0,234	7,59	0,576	2,20	0,01
3	0,0001	0,927	0,2420	18,6	0,96	0,155	13,71	0,133	1,67	0,01
4	0,0001	0,997	0,0542	4,1	0,98	0,811	9,98	0,352	1,76	0,05
5	0,0001	0,858	0,1528	12,7	0,96	0,588	1,39	0,498	1,79	0,05
6	0,0001	0,684	0,2085	13,6	0,97	0,290	4,76	0,989	2,35	0,01

Em que: ln = logaritmo natural; y = conteúdo de nitrogênio na folha, galho, casca do tronco, madeira do tronco e raiz, em g por árvore, ou serapilheira acumulada em kg ha⁻¹; t = idade do povoamento, em anos; BT = biomassa do tronco (madeira e casca), em kg árvore⁻¹, no caso da serapilheira acumulada, biomassa do tronco da árvore média, em kg; BS = biomassa de serapilheira, em Mg ha⁻¹; EUN = eficiência de utilização de nitrogênio no tronco; ns, * e ** = significância estatística dos coeficientes das equações: não significativo, e significativo em nível de 5 % e 1 % de probabilidade de erro, respectivamente; Prob. = nível de significância para a estatística; R²ajust. = coeficiente de determinação ajustado em função do número de coeficientes da equação; Syx = erro-padrão da estimativa, absoluto; Syx (%) = erro-padrão da estimativa, relativo; α = nível de probabilidade associado ao teste.

Tabela 12 – Equações de regressão para estimativa do conteúdo de fósforo (g árvore^{-1}) dos diferentes componentes das árvores de *Eucalyptus saligna* e da serapilheira acumulada entre 2 e 7 anos de idade.

Componente da biomassa		Equações de regressão								
1	Folha	$\ln y = 1,590634^{**} + 0,008624^{**} \cdot \text{BT} - 0,005170^{**} \cdot t^3 + 7,293714 \cdot \text{BT}^{-1} - 8,013260^{**} \cdot (\text{BT} \cdot t)^{-1}$								
2	Galho	$\ln y = 1,118826^{**} + 0,005950^{**} \cdot \text{BT} - 0,003340^{**} \cdot t^3 - 3,65650^{**} \cdot \text{BT}^{-1} + 1,868147 \cdot (\text{BT}^3)^{-1}$								
3	Casca do tronco	$\ln y = 6,205140^{**} - 2,007180^{**} \cdot t^1 + 0,199562^{**} \cdot \ln(\text{BT}^3) - 0,282590^{**} \cdot \ln(\text{EUN}^3)$								
4	Madeira do tronco	$\ln y = 6,402393^{**} + 0,581422^{**} \cdot t^1 + 0,372486^{**} \cdot \ln(\text{BT}^3) - 0,348130^{**} \cdot \ln(\text{EUN}^3)$								
5	Raiz	$y = 2,474838^{**} - 0,026860^{**} \cdot t^3 + 0,014097^{**} \cdot \text{BT} \cdot t$								
6	Serapilheira acumulada	$y = 8,494797^{**} + 13929,920^{**} \cdot (\text{BT}^3)^{-1} - 137,3360^{**} \cdot (\text{BS} \cdot t)^{-1}$								
Estatísticas de ajuste e condicionantes das regressões										
	Prob. > F	R ² ajust.	Syx	Syx (%)	Shapiro-Wilk		White		D. Watson	
					Valor	Prob.	Valor	Prob.	Valor	α
1	0,0001	0,574	0,3844	26,5	0,98	0,262	19,27	0,155	1,68	0,01
2	0,0001	0,478	0,5033	34,7	0,98	0,3266	8,08	0,779	1,76	0,05
3	0,0001	0,907	0,2885	5,9	0,97	0,405	7,42	0,594	1,66	0,01
4	0,0001	0,995	0,0684	23,4	0,98	0,771	9,38	0,403	1,80	0,05
5	0,0001	0,937	0,6479	7,3	0,91	0,087	6,46	0,264	2,18	0,05
6	0,0001	0,507	1,4111	19,5	0,96	0,243	5,33	0,376	1,98	0,05

Em que: \ln = logaritmo natural; y = conteúdo de fósforo na folha, galho, casca do tronco, madeira do tronco e raiz, em g por árvore, ou serapilheira acumulada em kg ha^{-1} ; t = idade do povoamento, em anos; BT = biomassa do tronco (madeira e casca), em kg árvore^{-1} , no caso da serapilheira acumulada, biomassa do tronco da árvore média, em kg; BS = biomassa de serapilheira, em Mg ha^{-1} ; EUN = eficiência de utilização de nitrogênio no tronco; ns, * e ** = significância estatística dos coeficientes das equações: não significativo, e significativo em nível de 5 % e 1 % de probabilidade de erro, respectivamente; Prob. = nível de significância para a estatística; R²ajust. = coeficiente de determinação ajustado em função do número de coeficientes da equação; Syx = erro-padrão da estimativa, absoluto; Syx (%) = erro-padrão da estimativa, relativo; α = nível de probabilidade associado ao teste.

Tabela 13 – Equações de regressão para estimativa do conteúdo de potássio (g árvore⁻¹) dos diferentes componentes das árvores de *Eucalyptus saligna* e da serapilheira acumulada entre 2 e 7 anos de idade.

Componente da biomassa		Equações de regressão								
1	Folha	$\ln y = 2,736124^{**} + 0,005282^{**} \cdot BT - 0,118480^{**} \cdot t^2 + 0,009997^{**} \cdot t^3 - 0,199370^{**} \cdot \ln(BT^2)^{-1}$								
2	Galho	$\ln y = 0,554540^{**} + 0,423252^{**} \cdot \ln BT^2 - 0,438410^{**} \cdot \ln t^2 + 144,86740^{**} \cdot EUN^{-1}$								
3	Casca do tronco	$\ln y = 0,149827^{ns} - 0,312490^{**} \cdot \ln(BT^3)^{-1} - 0,001530^{**} \cdot EUN$								
4	Madeira do tronco	$\ln y = -0,731740^{**} - 0,007650^{**} \cdot t^2 + 0,325413^{**} \cdot \ln(BT^3 \cdot t) + 476,40940^{**} \cdot EUN^{-1}$								
5	Raiz	$y = 29,793540^{**} + 0,432712^{**} \cdot BT - 0,135110^{**} \cdot t^3$								
6	Serapilheira acumulada	$y = 45,467760^{**} - 5,940720^{**} \cdot \ln t - 233,7650^{**} \cdot BS^{-1}$								
Estatísticas de ajuste e condicionantes das regressões										
	Prob. > F	R ² ajust.	Syx	Syx (%)	Shapiro-Wilk		White		D. Watson	
					Valor	Prob.	Valor	Prob.	Valor	α
1	0,0001	0,746	0,2585	19,5	0,99	0,886	19,08	0,102	1,72	0,01
2	0,0001	0,757	0,3120	24,2	0,98	0,373	10,91	0,282	1,68	0,01
3	0,0001	0,956	0,1890	18,0	0,98	0,716	5,85	0,321	1,75	0,05
4	0,0001	0,994	0,0685	6,2	0,96	0,210	13,68	0,134	1,89	0,05
5	0,0010	0,552	12,092	18,3	0,99	0,996	2,88	0,718	2,16	0,05
6	0,0001	0,612	3,8964	12,7	0,95	0,087	2,28	0,809	1,95	0,05

Em que: ln = logaritmo natural; y = conteúdo de potássio na folha, galho, casca do tronco, madeira do tronco e raiz, em g por árvore, ou serapilheira acumulada em kg ha⁻¹; t = idade do povoamento, em anos; BT = biomassa do tronco (madeira e casca), em kg árvore⁻¹; BS = biomassa de serapilheira, em Mg ha⁻¹; EUN = eficiência de utilização de nitrogênio no tronco; ns, * e ** = significância estatística dos coeficientes das equações: não significativo, e significativo em nível de 5 % e 1 % de probabilidade de erro, respectivamente; Prob. = nível de significância para a estatística; R²ajust. = coeficiente de determinação ajustado em função do número de coeficientes da equação; Syx = erro-padrão da estimativa, absoluto; Syx (%) = erro-padrão da estimativa, relativo; α = nível de probabilidade associado ao teste.

Tabela 14 – Equações de regressão para estimativa do conteúdo de cálcio (g árvore^{-1}) dos diferentes componentes das árvores de *Eucalyptus saligna* e da serapilheira acumulada entre 2 e 7 anos de idade.

Componente da biomassa		Equações de regressão									
1	Folha	$\ln y = 3,084464^{**} + 0,008372^{**} \cdot \text{BT} - 0,038050^{**} \cdot t^2 - 1,720190^{**} \cdot (\text{BT}^3)^{-1} + 201,12090^{**} \cdot \text{EUN}^{-1}$									
2	Galho	$\ln y = 6,746411^{**} - 0,313720^{**} \cdot t - 0,421120^{**} \cdot \ln(\text{BT}^2)^{-1} + 0,409429^{**} \cdot \ln(\text{EUN}^2)^{-1}$									
3	Casca do tronco	$\ln y = 7,045577^{**} - 0,00250^{**} \cdot \text{BT} + 0,352520^{**} \cdot \ln \text{BT}^3 + 1,102721^{**} \cdot \ln \text{EUN}^{-1}$									
4	Madeira do tronco	$\ln y = -2,118260^{**} + 3,087816^{**} \cdot t^1 + 1,135638^{**} \cdot \ln(\text{BT} \cdot t) - 0,002650^{**} \cdot \text{EUN}$									
5	Raiz	$y = 72,743780^{**} + 0,745343^{**} \cdot \text{BT}$									
6	Serapilheira acumulada	$\ln y = 5,655103^{**} - 89,51340^{**} \cdot (\text{BS}^2)^{-1}$									
Estatísticas de ajuste e condicionantes das regressões											
	Prob. > F	R ² ajust.	Syx	Syx (%)	Shapiro-Wilk		White		D. Watson		
					Valor	Prob.	Valor	Prob.	Valor	α	
1	0,0001	0,570	0,4082	30,0	0,98	0,314	14,04	0,446	1,66	0,01	
2	0,0001	0,705	0,3926	29,2	0,98	0,304	14,38	0,103	1,83	0,05	
3	0,0001	0,985	0,1167	12,4	0,98	0,598	7,00	0,638	1,68	0,01	
4	0,0001	0,942	0,2665	20,4	0,96	0,214	9,43	0,398	1,69	0,01	
5	0,0001	0,723	34,8832	19,7	0,96	0,571	2,41	0,300	2,08	0,05	
6	0,0001	0,697	0,2879	22,5	0,95	0,071	0,97	0,617	1,82	0,05	

Em que: ln = logaritmo natural; y = conteúdo de cálcio na folha, galho, casca do tronco, madeira do tronco e raiz, em g por árvore, ou serapilheira acumulada em kg ha^{-1} ; t = idade do povoamento, em anos; BT = biomassa do tronco (madeira e casca), em kg árvore^{-1} ; BS = biomassa de serapilheira, em Mg ha^{-1} ; EUN = eficiência de utilização de nitrogênio no tronco; ns, * e ** = significância estatística dos coeficientes das equações: não significativo, e significativo em nível de 5 % e 1 % de probabilidade de erro, respectivamente; Prob. = nível de significância para a estatística; R²ajust. = coeficiente de determinação ajustado em função do número de coeficientes da equação; Syx = erro-padrão da estimativa, absoluto; Syx (%) = erro-padrão da estimativa, relativo; α = nível de probabilidade associado ao teste.

Tabela 15 – Equações de regressão para estimativa do conteúdo de magnésio (g árvore^{-1}) dos diferentes componentes das árvores de *Eucalyptus saligna* e da serapilheira acumulada entre 2 e 7 anos de idade.

Componente da biomassa		Equações de regressão								
1	Folha	$\ln y = 6,366563^{**} + 0,009122^{**} \cdot \text{BT} - 0,004640^{**} \cdot t^3 - 1,346410^{**} \cdot (\text{BT}^2)^{-1} + 0,186726^{**} \cdot \ln(\text{EUN}^3)^{-1}$								
2	Galho	$\ln y = 0,549293^{**} - 0,324570^{**} \cdot t + 0,00000843^{**} \cdot (\text{BT} \cdot t^3) - 0,381950^{**} \cdot \ln(\text{BT}^2)^{-1}$								
3	Casca do tronco	$\ln y = 0,225845^{\text{ns}} - 0,477630^{**} \cdot (\text{BT}^2)^{-1} - 0,855440^{**} \cdot \ln \text{BT}^{-1} - 0,000430^{**} \cdot \text{EUN}$								
4	Madeira do tronco	$\ln y = - 3,098590^{**} + 0,47871^{**} \cdot (t^2)^{-1} + 1,151559^{**} \cdot \ln \text{BT} + 1896,17350^{**} \cdot \text{EUN}^{-1}$								
5	Raiz	$y = 11,451890^{**} + 0,132033^{**} \cdot \text{BT}$								
6	Serapilheira acumulada	$y = - 29,6110^{**} + 8,433383^{**} \cdot \ln(\text{BS}^2 \cdot t)$								
Estatísticas de ajuste e condicionantes das regressões										
	Prob. > F	R ² ajust.	Syx	Syx (%)	Shapiro-Wilk		White		D. Watson	
					Valor	Prob.	Valor	Prob.	Valor	α
1	0,0001	0,650	0,3205	21,2	0,97	0,135	21,33	0,378	1,68	0,01
2	0,0001	0,831	0,2896	25,4	0,97	0,088	10,61	0,303	1,72	0,01
3	0,0001	0,983	0,1266	10,6	0,95	0,102	5,32	0,801	1,82	0,05
4	0,0001	0,985	0,1232	10,4	0,96	0,272	8,78	0,458	1,78	0,05
5	0,0001	0,675	6,9225	22,6	0,92	0,167	2,69	0,261	1,54	0,05
6	0,0001	0,683	6,8299	21,3	0,98	0,667	4,62	0,099	1,94	0,05

Em que: \ln = logaritmo natural; y = conteúdo de magnésio na folha, galho, casca do tronco, madeira do tronco e raiz, em g por árvore, ou serapilheira acumulada em kg ha^{-1} ; t = idade do povoamento, em anos; BT = biomassa do tronco (madeira e casca), em kg árvore^{-1} ; BS = biomassa de serapilheira, em Mg ha^{-1} ; EUN = eficiência de utilização de nitrogênio no tronco; ns, * e ** = significância estatística dos coeficientes das equações: não significativo, e significativo em nível de 5 % e 1 % de probabilidade de erro, respectivamente; Prob. = nível de significância para a estatística; R²ajust. = coeficiente de determinação ajustado em função do número de coeficientes da equação; Syx = erro-padrão da estimativa, absoluto; Syx (%) = erro-padrão da estimativa, relativo; α = nível de probabilidade associado ao teste.

Na Figura 9 estão indicadas as doses de fertilizantes (kg ha^{-1}) na forma de N, P_2O_5 , K_2O , CaO e MgO , em função da produtividade esperada ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) e do teor de N (%), P e K (mg dm^{-3}) e Ca e Mg ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) no solo, considerando-se um cenário de implantação florestal (ausência de resíduos de colheita) e desconsiderando outras entradas e saídas de nutrientes do sistema.

Verifica-se que o sistema de recomendação de fertilização para *Eucalyptus saligna*, com base no balanço de nutrientes, mostrou-se eficiente no estabelecimento das doses de fertilizantes, demonstrando sensibilidade às variáveis de entrada e estimando doses crescentes com a redução da fertilidade do solo e o aumento da produção esperada.

Para as condições de verificação do sistema de recomendação de fertilização, produtividades a partir de 10 ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$) para P, 20 para K e N, 30 para Ca e 40 para Mg, exigem a aplicação de fertilizantes, as quais correspondem aos seguintes teores no solo: 2 mg dm^{-3} de P, 20 mg dm^{-3} de K, 1 % de M.O., 0,5 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Ca e 0,2 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Mg. Por outro lado, considerando-se o maior nível produtivo (60 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), os valores críticos para os teores de nutrientes no solo, para atingir tal produtividade, foram: 3 % para M.O., 12 mg dm^{-3} para P, 100 mg dm^{-3} para K, 1 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para Ca e 0,4 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para Mg.

Tendo como base o número de casos em que a fertilização foi necessária (balanços negativos), foi possível estabelecer a seguinte ordem de probabilidade de limitação nutricional da produtividade: $\text{P} > \text{K} > \text{N} > \text{Ca} \sim \text{Mg}$.

Em função da maior concentração nutricional na biomassa, as maiores doses de fertilizante, levando em conta os menores níveis de fertilidade, obedeceram a seguinte ordem decrescente: $\text{N} > \text{Ca} \sim \text{K} > \text{P} > \text{Mg}$.

Como foi verificado, os nutrientes Ca e Mg têm menor probabilidade de limitar a produtividade, no entanto, altas intensidades de exportação de biomassa podem alterar este cenário, principalmente para o Ca que foi o nutriente em maior quantidade na biomassa.

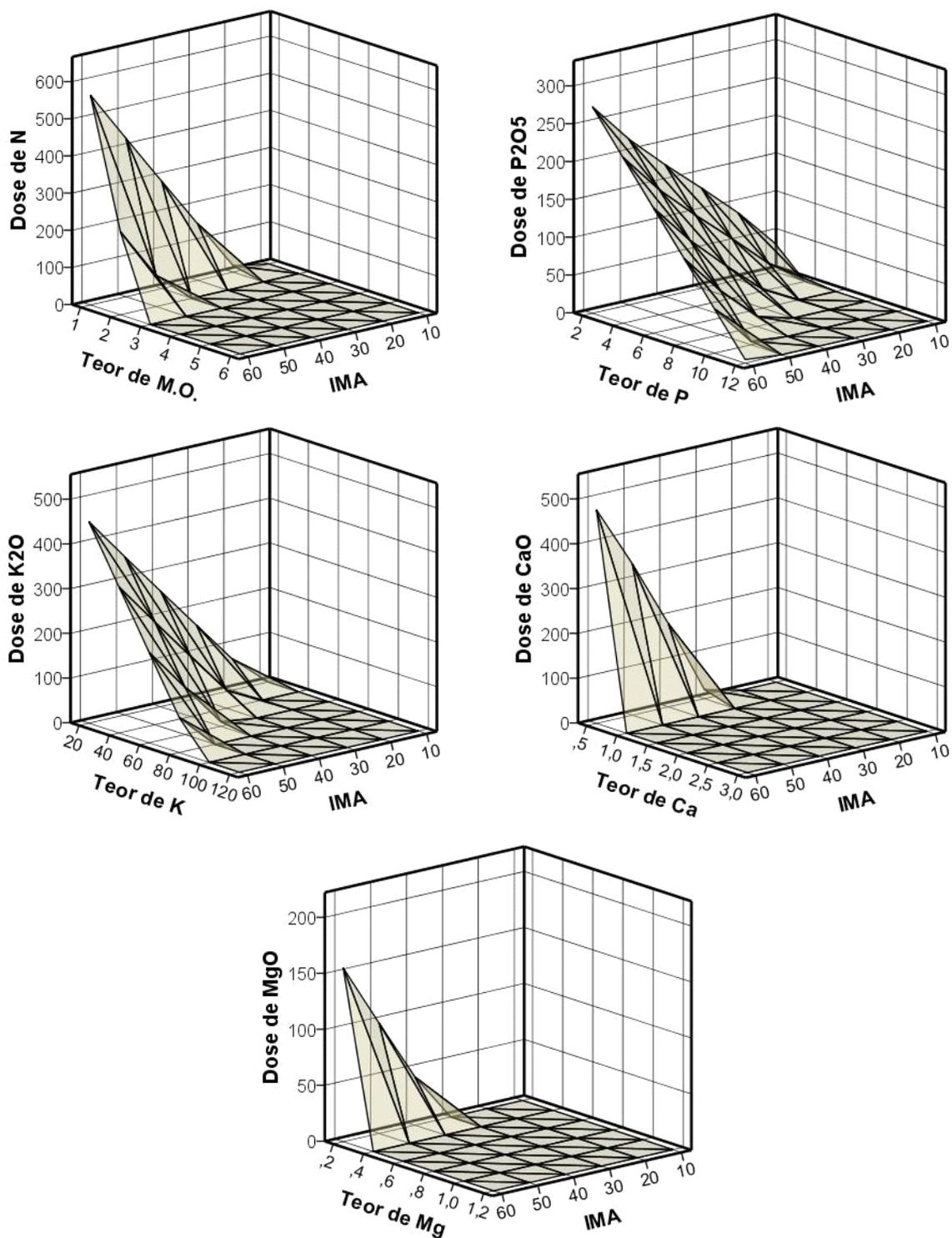


Figura 9 – Estimativa das doses de fertilizantes (kg ha⁻¹) para *Eucalyptus saligna* na região de Guaíba - RS, em função do teor de nutrientes no solo e da produtividade esperada.

O sistema de recomendação de fertilização estima doses de fertilizantes em função da produtividade esperada e das reservas de nutriente no solo, portanto, para as condições de fertilidade de solo mais desfavoráveis (teores de nutrientes no solo extremamente baixos), onde as doses de fertilizantes podem ser extremamente elevadas, é preciso adotar níveis de produção realísticos, pelo menos em curto prazo de tempo (primeiras rotações).

A recomendação de fertilizantes com base no balanço nutricional representa uma alternativa promissora para o manejo nutricional de plantios de *Eucalyptus saligna*. Para eventuais ajustes e melhorias do modelo, o sistema de recomendação de fertilizantes deve ser testado a campo em condições variadas de produtividade e fertilidade de solo, assim como em cenários mais complexos, envolvendo outros fluxos de nutrientes como: deposição atmosférica, decomposição de resíduos de colheita (replantio), mineralização de rochas, erosão do solo, entre outros.

5 CONCLUSÕES

De modo geral, os povoamentos estudados apresentaram a seguinte sequência de acúmulo de biomassa: madeira do tronco > raiz > casca do tronco > galhos > folhas, sendo que a madeira do tronco foi o único componente que apresentou tendência crescente para a biomassa relativa em função da idade dos povoamento.

A produtividade primária líquida nos povoamentos entre 2 e 8 anos de idade foi de $40,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, sendo 86 % nos componentes acima do solo e 14 % no sistema radicular.

Para uma condição média, o estoque de nutrientes apresentou a seguinte ordem de acúmulo, para componentes da biomassa: madeira do tronco > raiz > folhas > casca do tronco > galhos; e para nutrientes: $\text{Ca} > \text{N} > \text{K} > \text{Mg} > \text{P} \sim \text{S} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{B} > \text{Zn} > \text{Cu}$.

A eficiência de utilização dos nutrientes (EUN) no tronco apresentou tendência crescente, pelo menos até os 6 anos pós-plantio, e se considerados os povoamentos nas idades mais avançadas foi estabelecida a seguinte ordem decrescente: $\text{P} > \text{Mg} > \text{K} > \text{N} > \text{Ca}$.

A colheita florestal mesmo que restrita apenas ao tronco (casca e madeira) representou taxas de exportação de nutrientes acima de 50 % dos macronutrientes contidos na biomassa arbórea dos povoamentos com 7 anos de idade.

O descasque no campo representou uma redução na exportação de macronutrientes na colheita do tronco de 19 a 60 %, nos povoamentos com 7 anos de idade.

O sistema de recomendação de fertilizantes com base no balanço nutricional em plantios de *Eucalyptus saligna* se mostrou eficiente no estabelecimento das doses de nutrientes, estimando valores crescentes com a redução da fertilidade do solo e o aumento da produção esperada.

Com base no sistema de recomendação de fertilizantes foi possível estabelecer a seguinte ordem de probabilidade de limitação nutricional da produtividade: $P > K > N > Ca \sim Mg$.

SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Devido ao grande acúmulo de nutrientes na biomassa do tronco dos povoamentos de *Eucalyptus saligna*, recomenda-se a restrição, sempre que possível, da colheita florestal apenas à madeira, o que acarreta substancial redução da exportação de nutrientes, principalmente de Ca e Mg.

Sugere-se sempre que possível a adoção de rotações mais longas, o que favorece a ciclagem interna de nutrientes, aumentando a eficiência de utilização de nutrientes e conseqüentemente reduzindo a exportação relativa de nutrientes pela colheita florestal.

Para melhorar a acurácia do sistema de recomendação de fertilizantes, sugere-se a obtenção de valores locais (representativos dos solos da região) para as taxas de recuperação de nutrientes aplicados ao solo.

Para melhorar as estimativas de biomassa e nutrientes no componente raiz, recomenda-se novas amostragens do sistema radicular, cobrindo as variações de sítio, principalmente em relação às características edáficas.

Para aprimorar as estimativas do efetivo estoque de nutrientes no solo, sugere-se estudos de caracterização da distribuição de biomassa do sistema radicular em profundidade, sobretudo de raízes finas.

Para melhorar a acurácia do sistema de recomendação de fertilizantes recomenda-se o avanço das pesquisas na classificação de sítios e na obtenção de valores específicos para cada condição.

Como complementação do sistema de recomendação de fertilização do solo, sugere-se a avaliação da contribuição da entrada de nutrientes de outras vias, como deposição atmosférica, decomposição de resíduos de colheita florestal, mineralização das rochas, entre outras.

Sugere-se a implantação de experimentos a campo, em condições amplas de fertilidade de solo e produtividade, para verificação das recomendações de fertilizantes (feedback), e com base nessas informações proceder com os ajustes e refinamentos, quando necessários, do modelo de fertilização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, E. F. [Sem título]. 2010. Imagem formato png.

ARNON, D.I.; STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. **Plant Physiology**, v. 14, p. 371-375, Apr. 1939.

ASSIS, R. L. et al. Produção de biomassa de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake sob diferentes espaçamentos na região de cerrado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 23, n. 2, p. 152-156, abr./jun. 1999.

ATTIWILL, P. M.; LEEPER, G. W. **Forest soils and nutrient cycles**. Melbourne: Melbourne University Press, 1987. 202 p.

ATTIWILL, P. M.; WESTON, C. J. Forest soil. In: EVANS, J. (Ed.). **The Forests Handbook**. Oxford: Blackwell Science Ltd, 2001, p. 156-187.

BARROS, N. F. et al. Classificação nutricional de sítios florestais: descrição de uma metodologia. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 10, n. 1, p. 112-120, jan./jun. 1986.

BARROS, N. F. et al. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. In: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. (Ed.). **Relação solo eucalipto**. Viçosa - MG: Ed. Folha de Viçosa, 1990a. p. 127-186.

BARROS, N. F. et al. Algumas relações solo-espécies de eucalipto em suas condições naturais. In: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. (Ed.). **Relação solo eucalipto**. Viçosa - MG: Ed. Folha de Viçosa, 1990b. p. 1-22.

BARROS, N. F. et al. NUTRICALC 2.0 – Sistema para calculo del balance nutricional y recomendacion de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. **Bosque**, v. 16, no. 1, p. 129-131, 1995.

BARROS, N. F. et al. Mineral fertilizer recommendations for eucalypt plantations. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Forest nutrition and fertilization**. Translation: Ken McNabb. Piracicaba: IPEF, 2004, p. 269-284.

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

BEGON, M. et al. **Ecology**: from individuals to ecosystems. 4th ed. Malden: Blackwell Publishing, 2006. 746 p.

BELLOTE, A. F. J.; SILVA, H.D. Sampling techniques and nutritional evaluations in eucalypt plantations. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Forest nutrition and fertilization**. Translation: Ken McNabb. Piracicaba: IPEF, 2004, p. 113-140.

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

BINKLEY, D. et al. Stand development and productivity. In: NAMBIAR, E. K. S.; BROWN, A. G. (Ed.). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR Australia, CSIRO Australia, CIFOR Indonesia, 1997. p. 339-378.

BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Net primary production and nutrient cycling in replicated stands of *Eucalyptus saligna* and *Albizia facaltaria*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.112, p. 79-85, Dec. 1998.

BOARETTO, A. E. et al. Amostragem acondicionamento e preparo de amostras de plantas para análise química. In: SILVA, F. C. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. rev. ampl. Brasília - DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2009, cap. 2, p. 59-85.

BRESINSKY, A. et al. **Tratado de botânica de Strasburger**. 36. ed. Tradução: Alessandra Fidelis et al. Revisão técnica: Paulo Luiz de Oliveira. Porto Alegre: Artmed, 2012. 1166 p.

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

CANTARUTTI, R. B. et al. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa - MG: SBCS, 2007. p. 769-850.

CHAPIN III, F. S.; MATSON, P. A.; MOONEY, H. A. **Principles of terrestrial ecosystem ecology**. New York: Springer-Verlag, 2002. 396 p.

CLARK, D. A. et al. Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. **Ecological Applications**, v. 11, no. 2, p. 356-370, Apr. 2001.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO-CQFS-RS / SC. Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10. ed. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo / Núcleo Regional Sul, 2004. 400 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2. ed. Tradução: Maria Edna Tenório Nunes. Londrina - PR: Editora Planta, 2006. 403 p.

FIELD, A.; MILES, J. **Discovering statistics using SAS**. London: SAGE Publications Ltd, 2010. 752 p.

FÖLSTER, H.; KHANNA, P. K. Dynamics of nutrient supply in plantation soil. In: NAMBIAR, E. K. S.; BROWN, A. G. (Ed.). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR Australia, CSIRO Australia, CIFOR Indonesia, 1997. p. 339-378.

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, sin mes, 2001.

GONÇALVES, J. L. M. et al. An evaluation of minimum and intensive soil preparation regarding fertility and tree nutrition. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Forest nutrition and fertilization**. Translation: Ken McNabb. Piracicaba: IPEF, 2004. p.13-64.

GOWER, S. T. et al. Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes. **TREE**, v. 11, no. 9, p. 378-382, Sept. 1996.

HUTCHINSON, G. L. et al. Atmospheric ammonia: absorption by plant leaves. **Science**, v.175, p. 771-772, Feb. 1972.

KIMMINS, J. P. **Forest Ecology**. New York: Macmillan Publishing Company, 1987. 531 p.

KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F. Fontes e níveis de erros nas estimativas do potencial de fixação de carbono. In: SANQUETTA, C. R. et al. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, 2002. cap. 13, p. 251-264.

LADEIRA, B. C. et al. Produção de biomassa de eucalipto sob três espaçamentos em uma seqüência de idade. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 25, n. 1, p. 69-78, jan./mar. 2001.

LAMBERS, H.; CHAPIN III, F. S.; PONTS, T. L. **Plant physiological ecology**. 2nd ed. New York: Springer, 2008. 604 p.

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

LANDSBERG, J. J.; GOWER, S. T. **Applications of physiological ecology to forest management**. San Diego: Academic Press, 1997. 349 p.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos - SP: Rima, 2000. 531p.

LEITE, F. P. et al. Crescimento de *Eucalyptus grandis* em diferentes densidades populacionais. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 21, n. 3, p. 313-321, jul./set. 1997.

LELES, P. S. S. et al. Relações hídricas e crescimento de árvores de *Eucalyptus camaldulensis* e *Eucalyptus pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 22, n. 1, p. 41-50, jan./mar. 1998.

LEUSCHNER, C. Vegetation and ecosystems. In: van der MAAREL, E. (Ed.). **Vegetation ecology**. Malden: Blackwell Publishing, 2005. p. 85-105.

LIKENS, G. E. et al. Interactions between major biogeochemical cycles in terrestrial ecosystems. In: LIKENS, G. E. (Ed.). **Some perspectives of the major biogeochemical cycles**. New York: Wiley, 1981. p. 93-112.

LUGO, A. E.; BROWN, S.; CHAPMAN, J. An analytical review of production rates and stemwood biomass of tropical forest plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.23, p. 179-200, Feb. 1988.

MALAVOLTA, E. **Abc da adubação**. 5. ed. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1989. 292 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1997. 319 p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MALUF, J. R. T. Nova classificação climática do estado do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 141-150, jan./mar. 2000.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London, Academic Press, 1995. 889 p.

MASON, C. F. **Decomposição**. São Paulo: EPU, 1980. 63 p.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 3rd ed. Bern: International Potash Institute, 1982. 655 p.

MILLER, H. G. The influence of stand development on nutrient demand, growth and allocation. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 168/169, p 225-232, Jan. 1995.

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

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

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

PALLARDY, S. **Physiology of woody plants**. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2008. 454 p.

PEREIRA, A. R. et al. Concentração e distribuição de nutrientes em *Eucalyptus grandis* em função da idade, cultivado na região do cerrado. **Brasil Florestal**, Brasília, n. 59, p. 27-37, jul./set. 1984a.

PEREIRA, A. R. et al. Produção de biomassa e remoção de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus saligna* cultivados na região de cerrado de Minas Gerais. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 15, n. 1/2, p. 8-16, jan./dez. 1984b.

POGGIANI, F.; SCHUMACHER, M.V. Nutrient cycling in native forests. In: GONÇALVES, J.L. M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Forest nutrition and fertilization**. Translation: Ken McNabb. Piracicaba: IPEF, 2004, p. 287-305.

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

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, Potafos, 1991. 343 p.

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

REIS, M. G. F. et al. Acúmulo de biomassa em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no cerrado, em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 9, n. 2, p. 149-162, jul./dez. 1985.

REIS, M. G. F. et al. Acúmulo de nutrientes em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis* W. Hill (ex - Maiden) plantado no cerrado, em duas áreas com diferentes produtividades, em Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 11, n. 1, p. 1-15, jan./jun. 1987.

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: Ed. Folha de Viçosa, 1990. p. 265-302.

REZENDE, G. C. et al. Produção e macronutrientes em florestas de eucalipto sob duas densidades de plantio. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 7, n. 2, p. 165-176, jul./dez. 1983.

- RYAN, M. G. et al. Age-related decline in forest productivity: pattern and process. **Advances in Ecological Research**, v. 27, p. 213-262, 1997.
- SANTANA, R. C. et al. Biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do Estado de São Paulo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba - SP, n. 56, p. 155-169, dez. 1999.
- SANTANA, R. C. et al. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do estado de São Paulo. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 26, n. 4, p. 447-457, out./dez. 2002.
- SANTANA, R. C. et al. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa - MG, v. 32, n. 4, p. 697-706, out./dez. 2008.
- SAS. **User's guide**: statistics. Cary, North Carolina, Institute Inc., 1985, 956 p.
- SCHNEIDER, P. R. et al. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal**. 2. ed. Santa Maria: FACOS - UFSM, 2009. 294 p.
- SCHULZE, E. D. et al. **Plant ecology**. Berlin: Springer, 2002. 702 p.
- SCHUMACHER, M. V. et al. Biomassa em povoamentos de *Eucalyptus* spp. de pequenas propriedades rurais em Vera Cruz - RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria - RS, v. 21, n. 1, p. 17-22, jan./mar., 2011.
- SILVA, H. D.; POGGIANI, F.; COELHO, L. C. Eficiência de utilização de nutrientes em cinco espécies de *Eucalyptus*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo - PR, n. 6/7, p. 1-8, jun./dez. 1983a.
- SILVA, H. D.; POGGIANI, F.; COELHO, L. C. Biomassa, concentração e conteúdo de nutrientes em cinco espécies de *Eucalyptus* plantadas em solos de baixa fertilidade. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo - PR, n. 6/7, p. 9-25, jun./dez. 1983b.
- SWITZER, G. L.; NELSON, L. E. Nutrient accumulation and cycling in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation ecosystems: the first twenty years. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 36, p. 143-147, Jan./Mar. 1972.

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

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

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

VIEIRA, E. F. **Rio Grande de Sul: geografia física e vegetação**. Porto Alegre: Sagra, 1984. 184 p.

VITOUSEK, P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. **Am. Nat.** v. 119, no. 4, pp. 553-572, Apr. 1982.

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