

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

Nutrição, crescimento, eficiência de uso de água e de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus grandis* fertilizados com potássio e sódio

Julio Cesar Raposo de Almeida

Tese apresentada, para obtenção do título de Doutor em Recursos Florestais, com opção em Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2009

Julio Cesar Raposo de Almeida
Engenheiro Agrônomo

Nutrição, crescimento, eficiência de uso de água e de nutrientes em povoamentos de
***Eucalyptus grandis* fertilizados com potássio e sódio**

Orientador:
Prof. Dr. JOSÉ LEONARDO DE MORAES GONÇALVES

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Recursos Florestais, com opção em Silvicultura e Manejo
Florestal

Piracicaba
2009

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

Almeida, Julio Cesar Raposo de
Nutrição, crescimento, eficiência de uso de água e de nutrientes em povoamentos
de *Eucalyptus grandis* fertilizados com potássio e sódio / Julio Cesar Raposo de
Almeida. - - Piracicaba, 2009.
112 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2009.
Bibliografia.

1. Adubação 2. Biogeoquímica 3. Biomassa 4. Eucalipto 5. Fertilizantes potássicos
6. Nutrição vegetal 7. Sódio I. Título

CDD 634.9734
A447n

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

Aos meus pais Anésio e Cirlenedine
pelo amor e educação

Às minhas avós Nininha e Liliana (*in memoriam*)
pelo afeto e carinho

Aos meus irmãos Paulo e Anésio
pela amizade

À minha Ana por tornar minha vida mais doce e
à nossa Ana Clara que ilumina nossa vida com seu sorriso

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade de Taubaté (UNITAU) pelo incentivo ao aprimoramento científico e investimento no programa de bolsa para capacitação docente.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo (ESALQ/USP) pela contribuição à minha formação profissional e ao desenvolvimento da ciência brasileira.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio financeiro que permitiu a implantação do experimento em campo, a aquisição de equipamentos, reagentes para a realização de análises de solos e tecidos vegetais.

Ao Centre de cooperation internationale em recherche agronomique pour le developpement (CIRAD – Forêt) pelo apoio financeiro para a aquisição dos instrumentos para avaliação do fluxo de seiva.

Ao Prof. Dr. José Leonardo Moraes Gonçalves pelos ensinamentos, orientação, confiança e, sobretudo pela serenidade e bom senso, mesmo nas horas nas adversas.

Ao Pesquisador Dr. Jean-Paul Laclau pelos ensinamentos, orientação e amizade construída.

Ao Pesquisador Dr. Laurent Saint-André pelo apoio no ajuste das equações alométricas.

Ao Pesquisador Dr. Juan Sinforiano Delgado Rojas pela amizade, por todo o trabalho e conhecimento compartilhado desde a construção de sensores às análises dos dados meteorológicos e de fluxo de seiva.

Aos Professores Dr. Marcelo dos Santos Targa, Getúlio Teixeira Batista e Carlos Moure Cícero pela amizade, incentivo e conselhos decisivos para a escolha do caminho a trilhar.

Ao Eng. Florestal Rildo Moreira e Moreira e a todos os funcionários da Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga pelo apoio irrestrito para o desenvolvimento do experimento.

À Química Alba Valéria Mansetto e ao corpo técnico do Laboratório de Ecologia Aplicada (LEA) do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ pela realização das análises de tecidos vegetais.

Ao Professor Dr. João Luis Gadioli e, aos técnicos Maurício Cesar Jofre e Erlandsen M. da Silva pelas análises de solo realizadas no Laboratório de Solos e Plantas do Departamento de Ciências Agrárias da UNITAU.

À Sra. Catarina Germuts secretária do Programa de Pós-graduação em Recursos Florestais pela presteza e por sempre nos auxiliar com os prazos.

Aos professores Iraê Amaral Guerini, Fabio Poggiani, Quirino Augusto Camargo Carmelo pela participação no exame de qualificação, pela correção e sugestões que contribuíram para aprimorar esse trabalho.

Aos amigos Valeri Maquere, Maureen Voigtlaender, Selma Regina de Freitas Coêlho, Claudia Moster, Ana Paula Polito, Paulo Henrique Müller da Silva, Eduardo Vinicius da Silva, Carlos Roberto Sete Junior, José C. Arthur Junior, Rodrigo Ruiz Romero e Saulo de Tarso Aidar pela amizade e convivência produtiva.

SUMÁRIO

ABSTRACT	11
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 As florestas plantadas de <i>Eucalyptus</i> spp.	21
2.2 Importância do potássio para as florestas brasileiras.....	22
2.3 Substituição do potássio por sódio	24
2.4 Fertilizantes potássicos	26
2.5 Sustentabilidade e eficiência de uso de água e nutrientes	27
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1 Caracterização da área de estudo.....	31
3.2 Instalação e condução do experimento.....	33
3.3 Avaliação da fertilidade do solo	35
3.4 Avaliação do estado nutricional.....	35
3.5 Avaliação do crescimento: inventários e biometrias	35
3.6 Índice de área foliar	36
3.7 Dinâmica da Serapilheira.....	36
3.8 Análises químicas de tecido vegetal	39
3.9 Fluxo de seiva.....	39
3.10 Índices de eficiência de uso de água e de nutrientes	41
3.11 Delineamento experimental e análises estatísticas	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 Fertilidade do solo	45
4.2 Estado nutricional	49
4.3 Crescimento da parte aérea.....	62
4.3.1 Altura, diâmetro e volume	62
4.3.2 Índice de Área Foliar	67
4.3.3 Biomassa.....	68
4.4 Deposição de folhedo	69

4.5	Produtividade Primária Líquida (PPL).....	69
4.6	Concentração e acúmulo de nutrientes na parte aérea.....	74
4.7	Ciclagem de nutrientes via serapilheira	85
4.8	Eficiência de uso de nutrientes.....	93
4.9	Eficiência de uso de água.....	97
4.10	Implicações práticas no manejo florestal	100
5	CONCLUSÕES	103

RESUMO

Nutrição, crescimento, eficiência de uso de água e de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus grandis* fertilizados com potássio e sódio

Para avaliar os efeitos da fertilização potássica e sódica sobre a resposta do *Eucalyptus grandis* em crescimento, estado nutricional, eficiência de uso de água e de nutrientes foi instalado na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (SP) em LVA distrófico (200 g kg⁻¹ de argila) um experimento em blocos ao acaso contendo sete tratamentos: Testemunha, K_{1,5}, K_{3,0}, K_{4,5}, KS_{3,0}, Na_{3,0} e K_{1,5}+Na_{1,5} (os valores correspondem à quantidade de K ou Na fornecidos em kmol ha⁻¹, sob as formas de KCl, K₂SO₄ e NaCl). O nível crítico de K foliar variou de 6,6 a 5,0 g kg⁻¹ e as amostragens realizadas no final da estação de chuvas (maio) sempre proporcionaram melhor avaliação do estado nutricional. A fertilização potássica elevou a resistência e/ou tolerância à ferrugem (*Puccini pisidii* Winter.). A concentração de Na na idade de 6 meses foliar atingiu 3,4 e 2,3 g kg⁻¹ nos tratamentos Na_{3,0} e K_{1,5}+Na_{1,5}, mas o crescimento das árvores as concentrações reduziram para valores < 1,0 g kg⁻¹, 36 meses pós-plantio. O *Eucalyptus grandis* foi capaz de absorver o Na e o transportar até as folhas, mantendo a relação K/Na >1 (elevada), uma característica relacionada às plantas tolerantes ao Na e à salinidade. A resposta do *Eucalyptus grandis* à fertilização potássica e sódica foi expressiva, enquanto a Testemunha alcançou 8,6 cm de DAP, 13,4 m de altura e 68 m³ ha⁻¹ de madeira, 36 meses pós-plantio, sob a maior dose de potássio (K_{4,5}), o DAP foi de 11,6 cm, a altura de 17,5 m que resultaram em 141 m³ ha⁻¹ de madeira. A fertilização sódica, por sua vez, proporcionou árvores 13% (10,0 cm) mais grossas, 18% (15,7 m) mais altas, e produtividade de madeira 52% (103 m³ ha⁻¹) maior que a Testemunha aos 36 meses pós-plantio. A combinação de K_{1,5}+Na_{1,5}, comparada ao fornecimento de K_{1,5}, aumentou em 12% o volume de madeira. A produção de biomassa do tronco aos 36 meses pós-plantio nos tratamentos K_{3,0}, Na_{3,0} e Testemunha foi de 55,1, 41,5 e 26,1 Mg ha⁻¹, respectivamente. Os aumentos de produtividade estiveram diretamente relacionado com índices de área foliar (IAF) maiores aos 36 meses pós-plantio: K_{3,0} (5,4 m² m⁻²), Na_{3,0} (3,2 m² m⁻²) e Testemunha (2,7 m² m⁻²). O conteúdo de K na parte aérea aos 36 meses pós-plantio foi de 82, 38 e 31 kg ha⁻¹, respectivamente nos tratamentos K_{3,0}, Na_{3,0} e Testemunha, e os tratamentos Na_{3,0} e Testemunha não diferiram significativamente. O conteúdo de Na no tratamento Na_{3,0} (51 kg ha⁻¹) foi maior que nos tratamentos K_{3,0} e Testemunha (17 e 28kg ha⁻¹). Desses totais, o lenho acumulou cerca de 40% do conteúdo de K e mais de 75% do conteúdo Na. O retorno de K ao

solo como folheto no tratamento K_{3,0} foi de 14,9, 22,2 e 13,1 kg ha⁻¹ ano⁻¹, consecutivamente nos três anos de avaliação. Nos tratamentos Testemunha e Na_{3,0}, as quantidades de K não ultrapassaram 8,8, 14,3 e 11,9 kg ha⁻¹ ano⁻¹. A ciclagem bioquímica do K foi bastante intensa (>80%) ao contrário do Na em que a retranslocação é menor (27%). A EUK estimada sob fertilização sódica (1356 kg MS kg⁻¹) foi superior às dos tratamentos K_{3,0} (829 kg MS kg⁻¹) e Testemunha (1042 kg MS kg⁻¹). Os índices de recuperação de K e Na atingiram, respectivamente 44 e 52%, aos 36 meses pós-plantio. Sob fertilização potássica e sódica, a transpiração foi em média 20% maior que na Testemunha (P<0,06) foram respectivamente, 505, 519 e 397 mm. Nestas condições, estima-se que a transpiração diária do *Eucalyptus grandis* tenha variado de 2,6 a 3,6 mm dia⁻¹. A importância do K para o controle do processo da transpiração pode ser comprovada através do índice de transpiração por unidade de área foliar que foi menor no tratamento K_{3,0} (0,62 mm dia⁻¹ m⁻²) que na Testemunha (0,96 mm dia⁻¹ m⁻²) e em Na_{3,0} (1,05 mm dia⁻¹ m⁻²), função que aparentemente o Na não exerceu. Embora a fertilização tenha aumentado o consumo de água, essa prática estimulou o desenvolvimento do *Eucalyptus grandis* fazendo com que aumentasse a eficiência de uso de água (EUA) e diminuísse a exigência de água (EA). Em termos de biomassa, as estimativas da EUA_B, em ordem crescente, foram de 0,0021, 0,0033 e 0,0041 kg L⁻¹, o equivalente à exigência de 500, 304 e 248 L de água por kg⁻¹ de tronco, respectivamente pela Testemunha, K_{3,3} e Na_{3,0}. Ao considerar a produtividade em volume de madeira, os índice de EUA_V estimados para os tratamentos K_{3,0} (0,0068 dm³ L⁻¹) e Na_{3,0} (0,0057 dm³ L⁻¹) foram maiores que o da Testemunha (0,0034, dm³ L⁻¹), permitindo reduzir a exigência de água em mais de 100 L dm⁻³. Nesse contexto, a fertilização potássica é uma prática de manejo essencial que pode elevar a produtividade e aumentar a eficiência no uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis*. A fertilização sódica, além de contribuir para o aumento da produtividade pode ser uma estratégia para elevar a eficiência de uso de potássio.

Palavras-chave: Nutrição florestal, eucalipto, fertilizantes, biomassa, serapilheira, ciclagem biogeoquímica.

ABSTRACT

Tree growth, nutritional status, water use efficiency and nutrients use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantation fertilized with potassium and sodium in Brazil

The effects of potassium and sodium fertilizer applications on *Eucalyptus grandis* tree growth, nutritional status, water use efficiency and nutrients use efficiency were studied at the Itatinga Experimental Station (SP) on a Ferralsol (LVA dystrophic, 200 g kg⁻¹ clay). Seven treatments were established in complete randomized block designs: Control, K_{1.5}, K_{3.0}, K_{4.5}, KS_{3.0}, Na_{3.0} and K_{1.5}+Na_{1.5} (the values correspond to rates of Na or K applied as KCl, K₂SO₄ or NaCl, expressed in kmol ha⁻¹). The critical level of K in leaves ranged from 6.6 g to 5.0 g kg⁻¹ and the sampling performed at the end of the rainy season (May) always provided better assessment of nutritional status. The potassium fertilization increased the resistance and / or tolerance to rust (*Puccinia pisidii* Winter.). The foliar Na concentration was 3.4 and 2.3 g kg⁻¹ in Na_{3.0} and K_{1.5}+Na_{1.5} treatments, respectively, six months after planting, but Na concentrations decreased with tree ageing down to 1,0 g kg⁻¹ at age 36 months. Sodium was taken up by *Eucalyptus grandis* trees and carried up to leaves, keeping the ratio K / Na > 1. This ratio is characteristic of salinity tolerant plant. The response of *Eucalyptus grandis* trees to K and Na fertilizer applications was significant. While trees in the control treatment reached on average 8.6 cm in DBH, 13.4 m in height and 68 m³ ha⁻¹ of stemwood at age 36 months, under the higher dose of K addition (K_{4.5}), mean values of DBH, height, and stemwood volume were 11.6 cm, 17.5 m, and 141 m³ ha⁻¹ in the K_{4.5} treatment. Sodium fertilizer application increased tree DBH by 13% (10.0 cm on average at age 36 months), height by 18% (15.7 m on average), and stemwood volume by 52% (103 m³ ha⁻¹) compared to the Control treatment. Stemwood volume in the K_{1.5}+Na_{1.5} treatment was 12% higher than in the K_{1.5} treatment. Trunk biomass at age 36 months in treatments K_{3.0}, Na_{3.0} and Control were 55.1, 41.5 and 26.1 Mg ha⁻¹, respectively. Leaf area index (LAI) at age 36 months were 5.4, 3.2 and 2.7 m² m⁻², in the K_{3.0}, Na_{3.0} and Control treatments, respectively. The amount of K in the aboveground biomass at age 36 months was 82, 38 and 31 kg ha⁻¹ in treatments K_{3.0}, Na_{3.0} and Control, respectively, and was not significantly different in the Na_{3.0} and Control treatments. The Na content at age 36 months was significantly higher in the Na_{3.0} treatment (51 kg ha⁻¹) than in the control and K_{3.0} treatments (17 e 28 kg ha⁻¹). About 40% of the total amount of K aboveground and more than 75% of the amount of Na were found in

stemwood. The amount of K in litterfall was 14.9, 22.2 and 13.1 kg ha⁻¹ yr⁻¹ in K_{3,0}, the first, second and third years after planting, respectively. In the other treatments, K content in litterfall over the same period was < 14.3 kg ha⁻¹ yr⁻¹. Retranslocations of K during leaf senescence were intense (> 80%) and Na retranslocations were much lower (27% on average). Potassium use efficiency, calculated as the ratio between biomass and K content aboveground at age 36 months, was greater in the Na_{3,0} treatment (1356 kg kg⁻¹) than in treatments K_{3,0} (829 kg kg⁻¹) and Control (1042 kg kg⁻¹). The rates of K and Na recovery in aboveground tree components were 44 and 52%, respectively, 36 months after planting. Potassium and sodium fertilizers applications increased stand transpiration ($P < 0.06$) by 20% relatively to the Control treatment, from 30 to 35 months after planting (505, 519 and 397 mm, respectively). The mean daily stand transpiration over the study period ranged from 2.6 mm day⁻¹ in the Control treatment to 3.6 mm day⁻¹ in the K_{3,0} treatment. The transpiration/LAI ratio was lower in the K_{3,0} treatment (0.62 mm day⁻¹ m⁻²) than in the Control (0.96 mm day⁻¹ m⁻²) and Na_{3,0} (1.05 mm day⁻¹ m⁻²) treatments. This pattern showed that K availability largely influenced tree transpiration control, and Na availability was unlikely to reduce the loss of water per unit of LAI. Potassium and sodium fertilizers applications increased both the growth and the transpiration of *Eucalyptus grandis* trees and led to an improvement in water use efficiency (WUE) in biomass (B) or wood volume (V). WUE_B were 0.0021, 0.0033 and 0.0041 kg L⁻¹ over the study period in treatments Control, K_{3,0}, Na_{3,0}, respectively. WUE_V were higher in treatments K_{3,0} (0.0068 dm³ L⁻¹) and Na_{3,0} (0.0057 dm³ L⁻¹) than in the Control treatment (0.0034 dm³ L⁻¹). Therefore, K fertilization increased stand productivity and WUE in fast growing *Eucalyptus grandis* plantations. Sodium fertilization, in addition to K fertilization, also increased productivity and might be a valuable option to increase potassium use efficiency in commercial *Eucalyptus* plantations.

Keywords: Forest Nutrition, biomass, fertilizer, eucalypt, litter, biogeochemical cycling.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Precipitação pluviométrica mensal (mm), temperaturas (°C) máximas, mínimas e médias registradas na Estação Experimental de Itatinga (SP) durante os três anos de cultivo..... 32
- Figura 2 - Balanço hídrico decendial na Estação Experimental de Itatinga (SP), durante os três anos de cultivo (CAD = 200mm)..... 32
- Figura 3 - Representação esquemática das parcelas, (a) amostragem de biomassa realizada com plantas colhidas na bordadura interna (b) locais de coleta de solo para a avaliação da fertilidade realizada no interior da unidade amostral..... 34
- Figura 4 – (a) Disposição dos coletores da deposição de folheto no campo; (b) Disposição do coletor para amostragem de serapilheira acumulada sobre o solo 38
- Figura 5 - Dispositivos para medição do fluxo de seiva no campo: (a) Vista geral da área; (b) Sensores de Granier; (c) Instalações elétricas do conjunto Datalogger e fontes de calor. 40
- Figura 6 – Localização e casualização dos tratamentos na área experimental. As unidades amostrais utilizadas para amostragens anuais aparecem em destaque pela cor cinza. O fluxo de seiva foi determinado nas unidades amostrais do Bloco I e que são indicadas por FS (Fluxo de Seiva). 43
- Figura 7 - Teores de K (a) e Na (b) trocáveis, em diversas profundidades, um ano pós-plantio de *Eucalyptus grandis* em resposta à fertilização potássica e sódica. As barras representam a diferença mínima significativa (5%)..... 47
- Figura 8 - Teores de K (a) e Na (b) trocáveis nos diversos tratamentos, um e três anos pós-plantio. As barras representam a diferença mínima significativa (5%) 48
- Figura 9 - Concentração de K foliar em *Eucalyptus grandis* em resposta à fertilização com K e Na e da idade. Idade: 6 (10/2004), 9 (01/2005) 12 (05/2005), 18 (10/2005), 21 (01/2006), 24 (05/2006), 30 (10/2006) e 36 (05/2007). As barras representam a diferença mínima significativa (5%)..... 50
- Figura 10 - Concentração de K (g kg^{-1}) em folhas de *Eucalyptus grandis*, em resposta à fertilização potássica e sódica em diversas idades. A barra representa a diferença mínima significativa (5%)..... 51
- Figura 11 - Níveis críticos de K foliar considerando a produtividade volumétrica de madeira aos 36 meses, em diferentes idades. Idade: 6 (10/2004), 9 (01/2005), 12 (05/2005), 18 (10/2005), 21 (01/2006), 24 (05/2006), 30 (10/2006) e 36 (05/2007). 54
- Figura 12 – Efeito da fertilização potássica e sódica sobre a ocorrência de ferrugem (*Puccinia pisidii* Winter.) em *Eucalyptus grandis*, 12 meses pós-plantio (maio/2005). Letras diferentes indicam diferença entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5%. 56
- Figura 13 – Efeito da fertilização potássica e sódica sobre a concentração de K nas folhas de *Eucalyptus grandis* infectado por ferrugem (*Puccinia pisidii* Winter.) e normais (sem os sintomas) 12 meses pós-plantio (05/2005). A barra representa a diferença mínima significativa (5%) para comparação entre plantas normais e com sintomas..... 56

Figura 14 - Concentração de Na em folhas de <i>Eucalyptus grandis</i> , em resposta à fertilização potássica e sódica, e da idade. Idade: 6 (10/2004), 9 (01/2005) 12 (05/2005), 18 (10/2005), 21 (01/2006), 24 (05/2006), 30 (10/2006) e 36 (05/2007). As barras representam a diferença mínima significativa (5%).....	57
Figura 15 - Concentração de Na em folhas de <i>Eucalyptus grandis</i> , em resposta à fertilização potássica e sódica em diversas idades. A barra representa a diferença mínima significativa (5%)	58
Figura 16 – Concentrações de N, P, Ca e Mg em folhas de <i>Eucalyptus grandis</i> em diversas idades. As barras representam a diferença mínima significativa (5%)	62
Figura 17 - Crescimento em altura do <i>Eucalyptus grandis</i> em resposta à fertilização com K e Na	64
Figura 18 - Crescimento em DAP do <i>Eucalyptus grandis</i> em resposta à fertilização com K e Na	64
Figura 19 - Crescimento em volume com casca do <i>Eucalyptus grandis</i> , em resposta à fertilização com K e Na.....	65
Figura 20 - Resposta do <i>Eucalyptus grandis</i> à fertilização potássica, em volume de madeira com casca, aos 36 meses pós-plantio	65
Figura 21 - Volume de madeira com casca do <i>Eucalyptus grandis</i> , nos diversos tratamentos, aos 36 meses pós-plantio. A barra representa a diferença mínima significativa (5%)	66
Figura 22 - Índice de Área foliar (IAF) de <i>Eucalyptus grandis</i> , em resposta à fertilização com K e Na e da idade. As barras junto às médias representam o erro padrão da média.....	68
Figura 23 - Deposição de folheto de <i>Eucalyptus grandis</i> entre 10 e 36 meses pós-plantio em resposta à fertilização com K e Na. * indicam diferença significativa ($P < 0,05$) entre os tratamentos.....	71
Figura 24 - Concentração média de K e Na nas folhas em função do DAP e da altura da árvore em resposta à fertilização potássica e sódica aos 12, 24 e 36 meses pós-plantio.....	78
Figura 25 – Concentração média de N, P, Ca e Mg nas folhas de <i>Eucalyptus grandis</i> em função do DAP e altura da árvore aos 36 meses pós-plantio	79
Figura 26 - Acúmulo de K, Na, N, P, Ca e Mg na biomassa da parte aérea de <i>Eucalyptus grandis</i> , em resposta à fertilização potássica e sódica. As barras representam a diferença mínima significativa (5%)	81
Figura 27 - Distribuição do acúmulo de K nos diversos compartimentos em resposta à fertilização potássica e sódica no terceiro ano pós-plantio	82
Figura 28 - Distribuição do acúmulo de Na nos diversos compartimentos em resposta à fertilização potássica e sódica no terceiro ano pós-plantio	83
Figura 29 - Distribuição do acúmulo de N, P, Ca e Mg nos diversos compartimentos em resposta à fertilização potássica e sódica no terceiro ano pós-plantio.....	84
Figura 30 – Biomassa de serapilheira sobre o solo em função da fertilização potássica e sódica em 3 anos consecutivos. Datas das amostragens 21/12/2005, 19/12/2006 e 19/12/2007. As barras indicam o erro padrão.....	87

- Figura 31 – Biomassa de folheto de *Eucalyptus grandis* acumulado anualmente durante 3 anos consecutivos 87
- Figura 32 – Nutrientes acumulados na serapilheira de *Eucalyptus grandis* em função da fertilização potássica e sódica ao final do mês de dezembro após três anos consecutivos de avaliações. As barras indicam o erro padrão 88
- Figura 33 - (A) Volume de água transpirada durante 151 dias (entre 01/11/06 a 29/03/07). (B) Transpiração média por dia (C) Transpiração média por unidade de área foliar de *Eucalyptus grandis* em resposta à fertilização potássica e sódica em Itatinga /SP. Letras diferentes indicam diferença entre os tratamentos pelo teste Tukey (5%) e as barras representam a diferença mínima significativa 98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Interpretação dos teores de nutrientes, para a diagnose nutricional, em folhas de <i>Eucalyptus</i> spp	24
Tabela 2 - Atributos químicos do solo da área experimental até 6 metros de profundidade, determinados antes da implantação do experimento (valor médio de nove trincheiras). (Maquère, 2009).....	33
Tabela 3 - Quantidades de nutrientes e de fertilizante (em diferentes unidades) aplicados para estabelecer os tratamentos de K e Na.....	34
Tabela 4 - Atributos químicos do solo em diversas profundidades, um e três anos pós-plantio. Letras diferentes na coluna indicam diferença pelo teste Tukey (5%)	46
Tabela 5 - Análise de variância das concentrações de K, Na, N, P, Ca e Mg foliares em <i>Eucalyptus grandis</i> em resposta à fertilização com K e Na e idade.	50
Tabela 6 - Concentrações médias de nutrientes nas folhas de <i>Eucalyptus grandis</i> em resposta à fertilização potássica e sódica. Letras diferentes na coluna indicam diferença entre os tratamentos pelo teste Tukey (5%).....	61
Tabela 7 - Equações alométricas usadas para estimar o volume de madeira com casca (dm ³), em função do DAP e da altura, em resposta à fertilização com K e Na. (T) Testemunha; (K) para todos os tratamentos adubados com K e (Na _{3,0}) 3,0 kmol ha ⁻¹	66
Tabela 8 - Modelos para estimativa da área foliar (m ²) por árvore, em resposta à fertilização com K e Na, em diversas idades.	67
Tabela 9 - Biomassa da parte aérea, deposição de folheto e produtividade primária líquida (PPL) aos 12, 24 e 36 meses, em resposta à fertilização com K e Na. Os valores apresentados entre parênteses correspondem ao percentual de aumento comparado à Testemunha. Letras diferentes na linha indicam diferença entre os tratamentos pelo teste Tukey (5%)	72
Tabela 10 - Equações alométricas usadas para estimar a biomassa dos compartimentos aéreos (folhas, galhos vivo e mortos, casca e lenho), em função do DAP e altura, em resposta à fertilização com K e Na.....	73
Tabela 11 - Concentração de K por compartimento da parte aérea de <i>Eucalyptus grandis</i> , aos 12, 24 e 36 meses pós plantio (média±dp e valores máximos e mínimos indicados para n=8 árvores) (letras diferentes indicam diferença entre os tratamentos por Tukey a 5%)... ..	75
Tabela 12 – Concentração de Na nos compartimentos da parte aérea de <i>Eucalyptus grandis</i> , aos 12, 24 e 36 meses pós plantio (média±dp e valores máximos e mínimos indicados para n=8 árvores)	76
Tabela 13 - Concentração média de N, P, Ca e Mg nos compartimentos da parte aérea de <i>Eucalyptus grandis</i> , aos 12, 24 e 36 meses pós plantio. (média±dp e valores máximos e mínimos indicados para n=8 árvores).	77

- Tabela 14 - Biomassa de serapilheira sobre o solo, deposição de folheto e taxa de decomposição em povoamento de *Eucalyptus grandis* por 3 anos consecutivos. Os valores apresentados correspondem à média \pm ep (n=3 para os tratamentos e n=9 para média geral)..... 86
- Tabela 15 – Conteúdo de nutrientes na serapilheira e no folheto depositado anualmente sobre o solo e ciclagem de nutrientes em função da fertilização potássica e sódica por 3 anos consecutivos. Os valores entre parênteses correspondem à taxa de ciclagem..... 90
- Tabela 16 - Concentração média de nutrientes em folhas jovens (FJ) e no folheto (folhas decíduas - FD) de *Eucalyptus grandis* em função da fertilização potássica e sódica. Os valores correspondem à média de 7 coletas (em jan/05, maio/05, nov/05, jan/06, maio/06, nov/06 e maio/07) em 3 blocos (n=21). 92
- Tabela 17 - Taxas de retranslocação de nutrientes do folheto para folhas jovens completamente expandidas. Os valores correspondem às concentrações médias de 7 coletas (em jan/05, maio/05, nov/05, jan/06, maio/06, nov/06 e maio/07) em 3 blocos (n=21). 92
- Tabela 18 - Eficiência de uso de nutrientes no *Eucalyptus grandis* em resposta à fertilização com K e Na, 12, 24 e 36 meses pós-plantio 94
- Tabela 19 - Coeficiente de uso biológico (CUB) de nutrientes de *Eucalyptus grandis* em resposta à fertilização com K e Na, aos 12, 24 e 36 meses pós-plantio. Valores entre parênteses representam a variação percentual em relação à testemunha 96
- Tabela 20 - Equações para a estimativa do fluxo de seiva ($L \text{ árvore}^{-1}$) em função da área basal ($g = \text{cm}^2$) de *Eucalyptus grandis* e em resposta à fertilização potássica e sódica, entre 01/11/06 e 29/03/07 (151 dias) em Itatinga - SP 97
- Tabela 21 - Incremento corrente em volume (IC_V) e biomassa (IC_B), eficiência de uso de água (EUA) e exigência de água (EA) de *Eucalyptus grandis* em resposta à fertilização potássica e sódica entre 31 e 36 meses pós-plantio (01/11/06 a 29/03/07 - 151 dias) em Itatinga /SP. Letras diferentes na coluna indicam diferença pelo teste Tukey (5%)..... 99

1 INTRODUÇÃO

A madeira e seus derivados há tempos representam parte importante das riquezas brasileiras e a floresta nativa ainda é a principal fonte de matéria-prima. Porém, a forte pressão sobre os recursos naturais vem reduzindo drasticamente a disponibilidade de madeira nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do país. Atualmente, devido à grande capacidade de adaptação às diferentes condições edafoclimáticas, ao rápido desenvolvimento e aos múltiplos usos o *Eucalyptus* spp ocupa uma área de 3,75 milhões de hectares e constitui aproximadamente 65% de toda a área plantada com espécies florestais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS, 2008).

A maior parte da área plantada com *Eucalyptus* sp está inserida em área do bioma Cerrado, onde os solos são pouco férteis e, costumeiramente, já apresentavam respostas significativas à fertilização com potássio. Atualmente, após ciclos sucessivos de produção sem adição ou reposição do nutriente, as respostas ao potássio têm sido cada vez mais expressivas.

O potássio é um nutriente que interfere diretamente no processo de abertura e fechamento dos estômatos, e que por essa razão o seu suprimento ou deficiência exerce controle sobre a perda de água (transpiração) nos vegetais.

O sódio, do ponto de vista químico, se assemelha ao potássio, ambos fazendo parte dos elementos alcalinos. No entanto, por não preencher os requisitos de essencialidade para todas as plantas, sob o ponto de vista funcional o sódio é considerado um elemento benéfico, pois em algumas plantas o sódio pode substituir o potássio, parcialmente, e em outras, o seu fornecimento permite aumentar os rendimentos e a qualidade dos produtos.

Recentemente, numa área costeira no Congo com deposição intensa de sódio, Laclau et al. (2000, 2003) verificaram correlação estreita entre o potássio e o sódio nos processos de ciclagem, sendo constatada a eficiência mais alta de uso de potássio (quantidade de matéria seca produzida/unidade de nutriente acumulada) já relatada para o gênero *Eucalyptus*.

Diversos estudos têm sido realizados no mundo com o objetivo de mensurar o consumo de água por florestas em função do manejo. Todavia, são raros os trabalhos que tratam especificamente do manejo da fertilização, com a perspectiva de aumentar a eficiência de uso de água e nutrientes por florestas plantadas com *Eucalyptus* sp.

Nesse contexto, estabelecem-se quatro hipóteses:

- i. O *Eucalyptus grandis* cultivado num Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico apresenta maior produtividade em função da fertilização potássica.
- ii. A fertilização potássica aumenta a eficiência de uso de água pelo *Eucalyptus grandis*.
- iii. O Na substitui parcialmente o K na nutrição mineral do *Eucalyptus grandis*.
- iv. O Cl^- é o ânion acompanhante do K mais eficiente para a nutrição do *Eucalyptus grandis*.

Este trabalho procurou avaliar a resposta à fertilização potássica e o efeito da substituição de potássio por sódio sobre a nutrição, o crescimento, e eficiência de uso de água e de nutrientes em *Eucalyptus grandis* cultivado num Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, considerando os seguintes objetivos:

- a. Estabelecer a curva de resposta à fertilização potássica para o *Eucalyptus grandis* cultivado em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico.
- b. Avaliar o efeito da fertilização potássica sobre a eficiência do *Eucalyptus grandis* no uso de água.
- c. Avaliar o efeito da substituição de K por Na sobre os aspectos biométricos e fisiológicos do *Eucalyptus grandis*.
- d. Comparar o efeito do ânion acompanhante (Cl^- e SO_4^{2-}) do K sobre os aspectos biométricos e fisiológicos do *Eucalyptus grandis*.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 As florestas plantadas de *Eucalyptus* spp.

A madeira e seus derivados há tempos representam parte importante das riquezas brasileiras sendo determinante para o equilíbrio da balança comercial brasileira (CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA, 2009). A floresta nativa ainda é a principal fonte de matéria-prima, porém a forte pressão sobre os recursos naturais vem reduzindo drasticamente a disponibilidade de madeira nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do país, sendo o abastecimento garantido com o plantio de florestas de rápido crescimento. Devido à grande capacidade de adaptação às diferentes condições edafoclimáticas, ao rápido desenvolvimento e aos múltiplos usos o *Eucalyptus* spp ocupa uma área de 3,75 milhões de hectares e constitui aproximadamente 65% de toda a área plantada com espécies florestais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS, 2008).

A eucaliptocultura, entretanto, é realizada tradicionalmente em plantios homogêneos e em rotação curta, estando cercada de controvérsias, sendo que a principal delas refere-se ao consumo intenso de água, que se traduz no ressecamento do solo e das nascentes, e também no rebaixamento do lençol freático (LIMA, 1993 e 2004).

Para dirimir estas e outras controvérsias, grandes esforços têm sido realizados para gerar informações e adaptar tecnologias que garantam a sustentabilidade, otimizem o uso dos recursos naturais, minimizem o impacto causado por atividades antropogênicas e diminuam a pressão sobre os ecossistemas naturais.

Em razão de a maior parte da área plantada com *Eucalyptus* spp. estar inserida em área de abrangência do bioma ‘Cerrado’, cujos solos são pouco férteis, a fertilização é uma prática indispensável e respostas à fertilização com N, P, K, S e B são freqüentes (BARROS e NOVAIS, 1996; LANA e NEVES; 1994). Atualmente, após ciclos sucessivos de produção sem adição ou reposição de potássio, as respostas a este o nutriente têm sido cada vez mais expressivas. Um estudo sobre o mercado e uso de fertilizantes realizado por Silveira et al. (1995) mostrou que o K e o B foram os nutrientes cujas deficiências eram as mais comuns em florestas brasileiras.

2.2 Importância do potássio para as florestas brasileiras

O potássio, apesar de não ser encontrado constituindo estruturas ou compostos nas plantas, é um dos nutrientes absorvidos em maior quantidade pelas plantas, superando o fósforo e equiparando-se ao nitrogênio (MALAVOLTA, 1980). Indispensável para os processos de fotossíntese, de translocação de fotoassimilados, de abertura e fechamento de estômatos e ativação de mais de 60 sistemas enzimáticos, o potássio exerce também outras funções ainda pouco compreendidas que possibilitam às plantas bem supridas desse elemento apresentar maior tolerância às condições climáticas desfavoráveis, principalmente, no que se refere à disponibilidade de água e temperaturas extremas (RAIJ, 1991; EPSTEIN; BLOON, 2006; TAIZ; ZEIGER, 2004).

O potássio é um elemento bem distribuído na crosta terrestre, observando-se comumente teores variando entre 0,2% nas rochas calcárias e 3,2% nos xistos. Esse elemento pode ser encontrado no solo, sob a forma mineral de micas e feldspatos (não disponível), fixado entre as camadas de argila do tipo 2:1 (lentamente disponível), adsorvido no complexo de troca (prontamente disponível) e na solução do solo (prontamente disponível) (BARROS et al., 1990). Os teores desse nutriente nos solos guardam uma estreita relação com o material de origem e o grau de intemperismo; portanto, solos pobres em minerais potássicos, como os arenosos, ou muito intemperizados, como os Latossolos, normalmente são aqueles que apresentam resposta ao fornecimento de K (MALAVOLTA, 1980; LOPES, 1984; FASSBENDER; BORNEMISZA, 1987).

As quantidades de potássio requeridas por povoamentos de *Eucalyptus grandis* ao final da rotação (7 anos) são relativamente elevadas, cerca de 321,2 kg ha⁻¹, sendo que desse montante 84% (270 kg ha⁻¹) acumula-se no caule e pode ser exportado da área pela produção, o restante é distribuído entre as folhas (10%) e ramos (6,0%) (BELLOTE, 1979).

Em solos do bioma cerrado que possuem baixa capacidade de troca de cátions, Barros et al. (1981) obtiveram respostas à aplicação de K em *Eucalyptus grandis* logo no primeiro ano de plantio e também ao final da rotação (6,5 anos), constatando-se um incremento no crescimento do tronco de 76% quando foram fornecidos 167kg ha⁻¹ de K em relação à testemunha.

Novais et al. (1986) definiram que o valor de 40ppm de K no solo seria o nível crítico para se obter resposta à fertilização de K em condições de campo. Posteriormente, Barros et al. (1990) introduziram o conceito de nível crítico de implantação e de manutenção, pois

encontraram resposta à aplicação de K_2O até 240 kg ha^{-1} , sendo observado um aumento na diferença percentual entre as doses 0 e 240 de 51,2% aos 12 meses e de 110,2% aos 38 meses, demonstrando que o nível crítico de K no solo aumenta com a idade, até que a ciclagem comece a suprir a necessidade da planta.

Quanto ao modo de fornecimento de potássio Scatolini et al. (1996) avaliaram a resposta do *E. grandis* ao fornecimento 72 e 288 g planta^{-1} de KCl aplicadas de uma só vez, 30 dias após o plantio, ou parceladas em até quatro vezes, no 1º, 12º, 24º e 36º meses de idade, em três solos (Latosolo Vermelho-Amarelo textura argilosa, Podzólico Vermelho-Amarelo textura argilosa e Latossolo Vermelho-Amarelo textura média) que apresentavam teores de K disponível na camada de 0 a 20 cm de solo em torno de $0,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e CTC ao redor de $60 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Os resultados demonstraram vantagem significativa para a dose mais elevada nos três locais, tanto para volume cilíndrico como para a altura e área basal, porém sem diferenciação quanto aos modos de aplicação.

Valeri et al. (1996) analisaram o efeito da fertilização com K_2O (30 e 60 g planta^{-1}) e do parcelamento (dividida em até 5 anos) sobre o incremento do volume e a idade de corte de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, cultivados em Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho Escuro Álico. Concluíram que, no Latossolo, o maior crescimento em volume cilíndrico das árvores foi obtido com a aplicação de K_2O de 30 g por planta , parcelados nos 4 ou 5 primeiros anos enquanto na Areia Quartzosa foi obtido com a aplicação de K_2O de 60 g planta^{-1} , parcelados em doses iguais nos 5 primeiros anos ou em doses crescentes nos 4 primeiros anos. No Latossolo, a idade de corte das árvores não foi afetada pelos tratamentos e, no solo arenoso, a aplicação adequada de K aumentou a idade de corte em relação às testemunhas.

Gava (1997) avaliou o efeito de K_2O (0, 60, 120, 240 e 360 kg ha^{-1}) em *E. grandis* na segunda rotação, em dois solos, um com teor de $0,35 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e outro com $1,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, e observou resposta na produtividade à aplicação de K até de 180 kg ha^{-1} somente no solo com o menor teor do nutriente, resultado que coincide com os apresentados por Barros et al. (1990) que encontraram resposta a aplicação de K quando o solo apresentava teores de K de 0,6 a $0,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Faria et al. (2002) avaliando o efeito residual de K_2O (30, 60, 120 e 240 kg ha^{-1} aplicados no plantio) na segunda rotação do *Eucalyptus grandis*, verificaram que a maior dose de K, resultou em produtividade 54% maior do que no tratamento sem fertilização. Contudo, houve

decréscimo de 52% na produtividade da primeira para a segunda rotação, atribuído à redução na fertilidade do solo ocasionado pela exportação dos nutrientes, em especial de K, na primeira rotação.

Estudos da avaliação do estado nutricional realizados por Silveira et al. (1995) identificaram deficiências severas de K em povoamentos de *Eucalyptus grandis* com idades entre 1 e 5 anos em primeira e segunda rotações, plantados em Areia Quartzosa e Latossolo Vermelho na região de Itatinga (SP).

O nível crítico de K foliar sugeridos por Silveira et al. (2000) a partir da análise de vários experimentos realizados com as principais espécies de *Eucalyptus* spp e em diferentes locais, situa-se acima de $8,5 \text{ g kg}^{-1}$. Contudo, consideram que os limites para interpretação de deficiência de K esteja entre 5 e 8 g kg^{-1} .

Tabela 1 - Interpretação dos teores de nutrientes, para a diagnose nutricional, em folhas de *Eucalyptus* spp

Nutrientes	Faixas adequadas				Faixas deficientes		
	Malavolta et al (1997) ⁽¹⁾	Dell et al. (1995) ⁽²⁾	Gonçalves (1995) ⁽³⁾	Silveira et al. (1998 1999) ⁽²⁾	Malavolta (1987) ⁽³⁾	Dell et al. (1995) ⁽²⁾	Silveira et al. (1998 1999) ⁽²⁾
	g kg^{-1}						
N	21-23	18-34	13,5-18	22-27	8-13	-	<6
P	1,3-1,4	1,0-2,2	0,9-1,3	1,7-2,2	0,4-0,8	-	<1,1
K	9-10	9-18	9-13	8,5-9,0	6-8	5-6	<7,0
Ca	5-6	3-6	6-10	7,1-11	2-4	-	<5,5
Mg	1,5-2,5	1,5-2,3	1,5-2	1,5-2,1	0,8-1,2	-	<1,3

⁽¹⁾ Dados referentes a *Eucalyptus grandis* com alta produtividade de madeira

⁽²⁾ Dados referentes a povoamentos de *Eucalyptus grandis*

⁽³⁾ Dados para as espécies de *Eucalyptus* mais plantadas no Brasil.

Fonte: Silveira et al. (2000)

2.3 Substituição do potássio por sódio

O sódio (Na), do ponto de vista químico, se assemelha ao potássio, ambos fazem parte dos elementos alcalinos. No passado, acreditava-se que o Na fosse essencial às plantas, porém Brownell e Wood (1957) demonstraram que esse elemento atendia aos critérios indiretos de essencialidade somente para algumas espécies. Atualmente, se sabe que as plantas que realizam fotossíntese pelas vias C4 e CAM necessitam de Na para regeneração do fosfoenolpiruvato (PEP), como por exemplo a *Atriplex vesicaria* e *Halogenton glomeratus*, as quais requerem quantidades tão elevadas de Na para o desenvolvimento, podendo o Na nesses casos ser considerado um macronutriente (DECHEN; NACHTIGALL, 2006). Contudo, por não

preencher os requisitos de essencialidade para todas as plantas, o sódio é considerado um elemento benéfico.

As funções que o Na poderia desempenhar no metabolismo vegetal ainda permanecem obscuras, já que muitos processos metabólicos são afetados por estresses diversos. Além disso, a tolerância à salinidade ou à sodicidade é uma característica inerente a espécie, ou mesmo aos genótipos de uma mesma espécie e, segundo Marschner (1995), essa característica parece ser determinada pela capacidade da planta em impedir a translocação de Na para a parte aérea. Schactman e Liu (1999) consideraram que os mecanismos de adaptação a condições salinas estão relacionados não só com a extrusão de Na^+ mas também com a de Cl^- .

Sob o ponto de vista funcional, admite-se que o Na possa substituir parcialmente o K no ajuste osmótico e talvez em algumas reações enzimáticas, a exemplo do que ocorre no metabolismo animal em que o Na é considerado essencial na ativação de ATPases (SUTCLIFFE; BAKER, 1989). Os indícios mais fortes dessas hipóteses têm sido verificados em beterraba, espinafre, coqueiro, algodoeiro, couve, aveia, cevada e batata em que o fornecimento de sódio tem permitido aumentar os rendimentos e a qualidade dos produtos (MALAVOLTA, 1980; MENGEL; KIRKBY, 1987; MARSCHNER, 1995).

A substituição do K por Na, segundo Marschner (1995), é de interesse prático e científico, pois as principais fontes de K (silvinita, carlinita, kainita, langbeinita, leonita, glasuita) possuem Na em sua composição e, o uso desses minerais em formas menos puras representa uma economia de energia requerida para o processo de purificação e permitindo uma redução sensível no preço dos fertilizantes potássicos. Particularmente, para o Brasil que é o terceiro consumidor mundial, utilizando em 2006 3,4 milhões de toneladas e tendo produzido apenas 400 mil toneladas do nutriente (LACERDA, 2009) a substituição do K por Na diminuiria a dependência de fertilizantes importados.

Na cultura da cana-de-açúcar foi observado que o Na pode substituir até 15% do K sem comprometimento da produção de biomassa e, em até 10% quando se considerou o acúmulo de açúcares (CARMELLO, et al. 1992). Para as espécies arbóreas não há estudos dessa natureza que comprovem a substituição do K por Na.

A maioria dos trabalhos que tratam do efeito do Na no metabolismo das árvores, o fazem com a perspectiva do uso das plantas tolerantes na revegetação e reabilitação de solos salinos ou com teores de Na elevados (NIKNAM; MCCOMB, 2000; ADAMS, 2005; RAWAT;

BANERJEE, 1998; WOODWARD; BENNETT, 2005; MADSEN; MULLIGAN, 2006;). O *Eucalyptus grandis*, por exemplo, é considerado moderadamente tolerante a estresse salino, tanto em ensaios conduzidos em casa de vegetação (SUN; DICKINSON, 1993) quanto em condições de campo (DUNN et al., 1994).

As concentrações de Na nos tecidos vegetais, detectadas principalmente com o intuito de quantificar o acúmulo na planta ou a sua participação nos processos de ciclagem de nutrientes, podem variar normalmente de 1500 a 5500 ppm em *Eucalyptus* spp. (JUDD et al., 1996; SILVEIRA et al., 1998; LACLAU et al., 2003). A maior parte destes resultados de análises refere-se às concentrações nas folhas. Ainda que nesse componente sejam observadas as maiores concentrações, as folhas representam apenas 2% da biomassa de uma floresta madura e, desse modo o conteúdo é baixo. O tronco, ao contrário, apresenta teores menores, mas por representar cerca de 75% da biomassa, acumula grande quantidade desse elemento. Além disso, os autores demonstraram também que numa floresta nativa de *E. diversicolor* e *E. obliqua* de 40 anos e numa plantação comercial de *E. grandis* e *E. saligna* de 10 anos com produção de biomassa de 339,6 e 172,7 Mg ha⁻¹, respectivamente, o acúmulo de Na foi de 182,1 e 54,8 kg ha⁻¹, valores que podem ser comparados ao acúmulo de P (42,8 e 49,8 kg ha⁻¹).

Em florestas plantadas de *Eucalyptus* spp. numa área costeira no Congo, Laclau et al. (2000) verificaram correlação estreita entre o K e o Na nos processos de ciclagem. Posteriormente, Laclau et al. (2003) constataram que naquelas condições com intensa deposição de Na ocorreu a mais alta eficiência de uso (quantidade de matéria seca produzida por unidade de nutriente acumulada) de K já relatada para o gênero *Eucalyptus*.

Nos solos das regiões tropicais o Na se meteoriza com facilidade sendo rapidamente lixiviado, possibilitando concentração de K maior que a de Na (FASSBENDER; BORNEMISZA, 1987). Regiões áridas ou semi-áridas (MARSCHNER, 1995; EPSTEIN; BLOOM, 2006) e costeira são aquelas que normalmente apresentam os maiores teores de Na no solo em função da deposição seca através do pó e aerossóis (BINKLEY, 1998; LACLAU et al., 2003).

2.4 Fertilizantes potássicos

Os principais fertilizantes potássicos produzidos na atualidade são o KCl e o K₂SO₄ e, muito embora sejam fontes de K equivalentes, os ânions acompanhantes exercem efeitos

diferentes sobre o metabolismo, crescimento e a produção. De modo geral, o KCl é o mais amplamente utilizado por ser de custo menor, sendo o K_2SO_4 de uso restrito àquelas culturas e às condições onde a presença do cloreto não é desejada (MALAVOLTA, 1981).

Doses muito elevadas de KCl podem conduzir à clorose e a necrose nas folhas, bem como queda na produção devido ao acúmulo de Cl^- nos tecidos. Conforme mencionado por Schactman e Liu (1999), a tolerância ao Cl^- está relacionada com a capacidade de extrusão ou a exclusão do Cl^- do processo de absorção que ocorre nas raízes e na folhas. Dependendo da planta, os sintomas de toxicidade podem aparecer nas folhas mais velhas ou nas mais novas e é caracterizado por murchamento, clorose, bronzeamento, deformação da folha que toma a forma de taça. As raízes também se desenvolvem menos nas mesmas condições (MALAVOLTA, 1980).

Os teores de Cl nas folhas são maiores que qualquer outro micronutriente e não se tem notícia da ocorrência de sintomas de deficiência de Cl em condições de campo. Contudo, Bonneau (1998) verificou aumento na produção do coqueiro na Ásia devido à adição de cloreto na fertilização.

2.5 Sustentabilidade e eficiência de uso de água e nutrientes

A produção florestal pode ser expressa como o resultado de uma função que considera a disponibilidade de um recurso no ambiente, a quantidade absorvida pela planta e a eficiência com que a planta utiliza esse recurso para fixar CO_2 atmosférico em biomassa (BINKLEY et al., 2004).

Procurando elevar a sustentabilidade do ecossistema florestal, a partir da década de 90, diversos programas de melhoramento genético de *Eucalyptus* spp no Brasil passaram a considerar a eficiência de uso (EU) de nutrientes como critério para a seleção de genótipos superiores, além da produtividade, da qualidade da madeira, da forma da árvore e da resistência a doenças (SANTANA et al., 2000). As diferenças de EU de nutrientes observadas entre espécies, procedências, progênie e entre clones florestais, além de serem inerentes à capacidade de absorção, de translocação e de conversão dos nutrientes em biomassa de cada genótipo, são produto da interação genótipo-ambiente. Desse modo, a EU de nutrientes possibilita o reconhecimento de genótipos e de práticas de manejo que contribuam para a sustentabilidade florestal.

Do ponto de vista fisiológico, a eficiência de uso de nutrientes tem sido definida como a produção de matéria seca (produtividade primária líquida) por unidade de nutriente acumulada pela planta. Porém, sob o enfoque agrônomico, tem-se considerado apenas a biomassa de um produto (ou compartimento) da planta dividido pela quantidade de nutriente acumulado pela planta (ou acumulado no compartimento de interesse) e, nestas situações o termo coeficiente de uso biológico de nutriente (CUB) tem sido considerado mais apropriado. Além destas, outras maneiras de cálculo para a eficiência de uso de nutrientes podem ser encontradas (FAGERIA, 2000), no entanto isso tem dificultado as comparações.

A sustentabilidade do ecossistema florestal depende, entre outros fatores, da estabilidade no balanço de nutrientes a curto, médio e longo prazo. Em função disso, práticas de manejo que tornem as plantas mais eficientes no uso de água e nutrientes são cada vez mais importantes para se manter a capacidade produtiva do sítio florestal ao longo das rotações.

A fertilização é uma prática de manejo florestal que contribui decisivamente para o aumento da produtividade, porém Barros et al. (1995) apontam que não há relação direta entre a produtividade e a EU de nutrientes. Os estudos de EU de nutrientes em plantios de *Eucalyptus* spp já realizados estabelecem que a EU de um nutriente aumenta com a redução da sua disponibilidade (BARROS et al., 1986) e, também, em função da idade ou crescimento da planta (SILVEIRA et al., 2005).

O suprimento de água foi apontado por Stape et al. (2004) como o fator mais limitante para o crescimento de plantações florestais em regiões tropicais. Diante do aumento da área plantada com *Eucalyptus* spp para a produção de madeira, o consumo de água pelas florestas plantadas se tornou um assunto de interesse mundial. Para compreender os fatores que controlam o crescimento das florestas e o uso dos recursos naturais diversos trabalhos já foram realizados (KALLARACKAL; SOMEN (1997); BINKLEY et al. (2004); HUBBARD et al. (2004); YIN et al. (2004); TEIXEIRA et al. (2008)) e nestes a eficiência de uso de água constituiu num índice bastante útil não só para a avaliação dos genótipos mais eficientes mas também para a definição de práticas de manejo que aumentem a produtividade e que elevem a sustentabilidade, pois a produção final de madeira é resultante da interação genótipo x ambiente. Nesta perspectiva, as preocupações ecológicas quanto ao consumo de água pela floresta podem ser interpretadas diferentemente se altas taxas de uso estiverem associadas com elevada eficiência de uso de água (STAPE et al., 2004).

Embora, seja notória a importância do K, do Na e do Cl para os mecanismos de abertura e fechamento dos estômatos (MALAVOLTA, 1980; MARSCHNER, 1995; EPSTEIN; BLOON, 2006) e, portanto no controle e na eficiência do uso da água, não existem estudos tratando especificamente do manejo da fertilização, com esses nutrientes na perspectiva de aumentar a eficiência de uso de água em florestas plantadas com *Eucalyptus*.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

O experimento para avaliar a resposta do *Eucalyptus grandis* (procedência de Coff's Harbor / Suzano) ao K e ao Na foi instalado em abril de 2004 na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga (SP). Esta é vinculada ao Departamento de Ciências Florestais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP) e está situada a 23° 02' S e a 48° 38' W, a 863m de altitude. O clima da região é mesotérmico úmido (Cwa), segundo a classificação de Köppen. A precipitação acumulada nos três anos de cultivo foi de 4095 mm (1400, 1504 e 1191 mm, respectivamente). A temperatura média anual foi, aproximadamente, 21,0 °C, estando as temperaturas mínimas registradas entre 0 e 21,4 °C e as temperaturas máximas entre 15,8 e 37,6 °C (Figura 1). A evapotranspiração potencial anual é de aproximadamente 1000 mm (THORNTHWAITE; MATTER, 1955). O período entre maio e setembro é o mais seco, mas durante o estudo ocorreram veranicos nos meses de fevereiro e março (Figura 1).

A vegetação natural da região é o Cerrado. Entre os anos de 1920 e 1940, a área foi ocupada por pastagens. Depois dessa fase, a antiga Ferrovia Paulista S.A. plantou na área *Eucalyptus saligna*, o qual foi explorado para produção de dormentes e lenha até 1978, quando a área foi doada e incorporada ao patrimônio da USP. Desde então, foram realizadas quatro rotações por talhadia e, em 1998 a área foi reformada, estabelecendo-se um povoamento com mudas de *Eucalyptus saligna*. O corte, desse último povoamento, ocorreu três meses antes da implantação do experimento e todos os resíduos foram mantidos sobre o solo.

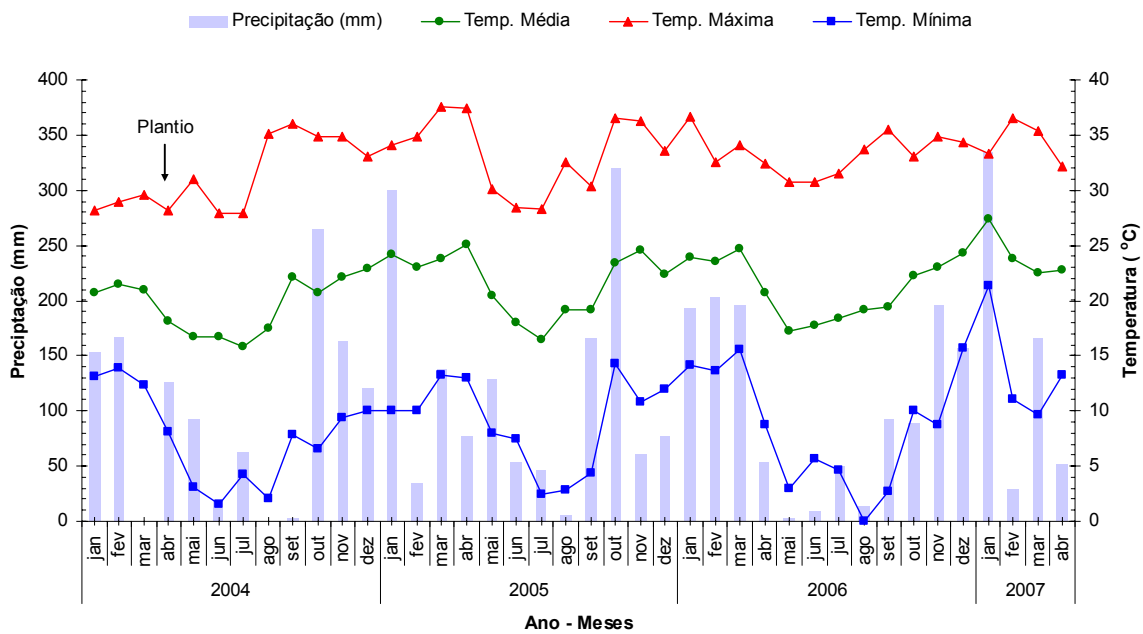


Figura 1 - Precipitação pluviométrica mensal (mm), temperaturas (°C) máximas, mínimas e médias registradas na Estação Experimental de Itatinga (SP) durante os três anos de cultivo

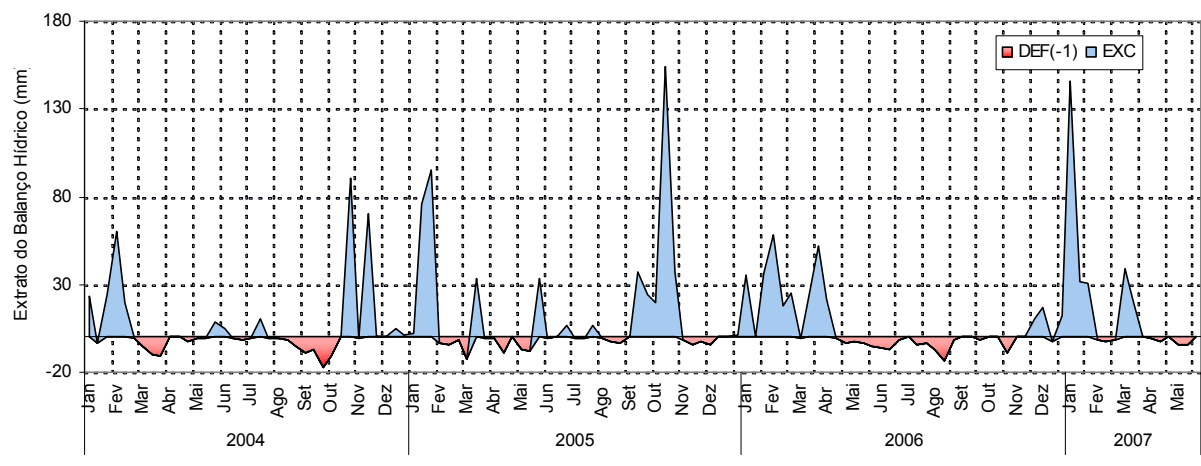


Figura 2 - Balanço hídrico decenal na Estação Experimental de Itatinga (SP), durante os três anos de cultivo (CAD = 200mm)

A área experimental possui um relevo suavemente ondulado. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, de textura média (200 g kg⁻¹ de argila) (EMBRAPA, 1999). Previamente à instalação do experimento, Maquère (2006) caracterizou, detalhadamente, os atributos químicos do solo até 6 metros de profundidade (Tabela 2). As análises foram realizadas no laboratório do Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) em Nancy, na França. Ao todo foram abertas nove (9) trincheiras na área experimental. Os resultados evidenciam teores de K e Na muito baixos em todo o perfil do solo.

Tabela 2 - Atributos químicos do solo da área experimental até 6 metros de profundidade, determinados antes da implantação do experimento (valor médio de nove trincheiras). (Maquère, 2009)

Profundidade	pH		K	Ca	Mg	Na	H+Al	SB	CTC efetiva	V	
M	água	KCl	mmol _c kg ⁻¹								%
0 - 0,05	4,6	4,0	0,1246	0,2180	0,3115	0,0000	23,54	1,40	24,94	5	
0,05 - 0,15	5,3	4,4	0,0467	0,0081	0,1003	0,0000	11,66	0,30	11,95	2	
0,15 - 0,50	5,5	4,7	0,0286	0,0052	0,0316	0,0000	8,80	0,09	8,89	1	
0,50 - 1,0	5,5	4,6	0,0161	0,0000	0,0124	0,0000	6,49	0,04	6,53	1	
1,0 - 2,0	5,7	5,2	0,0305	0,0153	0,0153	0,0034	3,94	0,12	4,06	3	
2,0 - 3,0	6,0	5,3	0,0133	0,0007	0,0103	0,0159	0,80	0,08	0,87	18	
3,0 - 4,0	5,7	5,3	0,0393	0,0363	0,0375	0,0042	0,28	0,16	0,44	36	
4,0 - 5,0	5,9	5,5	0,0298	0,0261	0,0539	0,0000	0,04	0,16	0,20	79	
5,0 - 6,0	5,8	5,6	0,0287	0,0095	0,0164	0,0072	0,13	0,11	0,24	56	

3.2 Instalação e condução do experimento

A resposta do *Eucalyptus grandis* à fertilização potássica foi estabelecida por meio da aplicação de quatro doses de K (0, 1,5, 3,0 e 4,5 kmol ha⁻¹, sob a forma de KCl) e três tratamentos foram adicionados, com finalidade de avaliar a possibilidade de substituição do K por Na e também comparar o efeito dos íons acompanhantes dos dois principais fertilizantes potássicos (KCl e K₂SO₄) no manejo da fertilização do *Eucalyptus grandis* (Tabela 3). As doses dos fertilizantes foram definidas, previamente, em kmol ha⁻¹ para garantir o fornecimento de quantidades de K e Na equivalentes em termos de cargas, as quais foram divididas em três aplicações no decorrer do primeiro de cultivo, no plantio, aos 6 e aos 12 meses.

A fertilização básica realizada no plantio foi constituída por P₂O₅ 80 kg ha⁻¹ (Super Fosfato Triplo), N 30 kg ha⁻¹ (NH₄(SO₄)₂) e FTE BR-12 (micronutrientes) 30 kg ha⁻¹ dispostos em covetas ao lado das mudas e, 2000 kg ha⁻¹ de calcário dolomítico distribuídos a lanço sem incorporação. Em cobertura foram distribuídos a lanço sob a projeção da copa das árvores 90 kg ha⁻¹ de N (NH₄(SO₄)₂) divididos em duas aplicações, aos 6 e 12 meses.

Tabela 3 - Quantidades de nutrientes e de fertilizante (em diferentes unidades) aplicados para estabelecer os tratamentos de K e Na

Tratamentos	Nutriente						Fertilizante		
	K	Na	K (K ₂ O)	Na	Cl	S	KCl	NaCl	K ₂ SO ₄
	— kmol ha ⁻¹ —		— kg ha ⁻¹ —				— kg ha ⁻¹ —		
T	0,0		0 (0)		0		0		
K_{1,5}	1,5		58 (70)		53		110		
K_{3,0}	3,0		116 (140)		105		220		
K_{4,5}	4,5		174 (210)		158		330		
KS_{3,0}	3,0		116 (140)			47			260
Na_{3,0}		3,0		68,5	106			175	
K_{1,5} + Na_{1,5}	1,5	1,5	58 (70)	34,3	105		110	87	

O plantio foi realizado no espaçamento de 3 x 2 m, em covas abertas no meio do espaço entre os tocos, na linha do cultivo anterior. As parcelas foram constituídas por 81 plantas (9 linhas com 9 plantas por linha), e as duas linhas externas serviram de bordadura; desse modo, cada unidade experimental foi constituída pelas 25 árvores centrais (Figura 3).

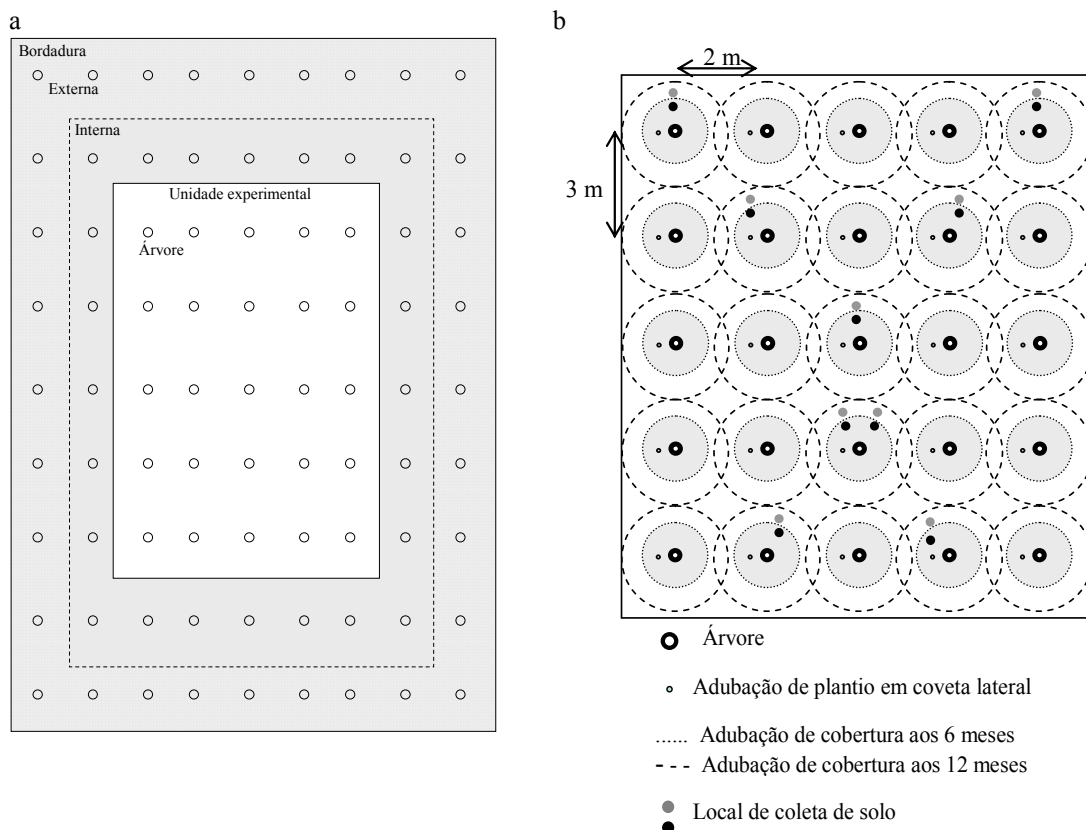


Figura 3 - Representação esquemática das parcelas, (a) amostragem de biomassa realizada com plantas colhidas na bordadura interna (b) locais de coleta de solo para a avaliação da fertilidade realizada no interior da unidade amostral

3.3 Avaliação da fertilidade do solo

A caracterização da fertilidade do solo das camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm de profundidades ocorreu aos 12 meses (após o término das fertilizações) e aos 36 meses. As amostras foram coletadas, com trado sonda, na entrelinha a cerca de 0,4 e 1,2 m de distância da planta em pontos previamente definidos (Figura 3). Os teores de K, Na, Ca e Mg, trocáveis no solo foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica e espectrofotometria de chama conforme descrito por Rajj et al. (2000) no Laboratório de Análises de Solos do Departamento de Ciências Agrárias da Universidade de Taubaté (UNITAU).

3.4 Avaliação do estado nutricional

As coletas de folhas para a avaliação do estado nutricional das plantas foram realizadas aos 6, 9, 12, 18, 21, 24, 30 e 36 meses pós-plantio em cada unidade experimental. As folhas 3, 4, 5 e 6 completamente desenvolvidas a partir da ponta dos ramos do terço superior da copa foram adotadas como indicadoras para a diagnose nutricional. De cada uma das 25 árvores presentes nas unidades experimentais foram colhidas 16 folhas, sendo 4 folhas por quadrante (N, S, L e O).

3.5 Avaliação do crescimento: inventários e biometrias

Inventários para a avaliação do diâmetro a altura do peito (DAP) e da altura total (H) foram realizados aos 6, 9, 12, 18, 24, 30 e 36 meses pós-plantio.

Amostragens para a determinação de biomassa e volume de madeira foram realizadas nos tratamentos T, $K_{3,0}$ e $Na_{3,0}$ aos 12, 24 e 36 meses pós-plantio, colhendo-se 8 árvores por ano de cada tratamento, preferencialmente localizadas na bordadura interna. A massa fresca total da parte aérea foi subdividida em lenho, casca, galhos (vivos e mortos) e folhas. A massa fresca de cada compartimento foi mensurada em balança digital com capacidade para 60 kg. Amostras desses materiais foram acondicionadas em sacos plástico, pesadas em balança semi-analítica e, então secadas em estufa com circulação forçada de ar a 65° C até massa constante e, então

pesadas novamente para determinação da umidade (%), com a qual se estimou a massa seca de cada compartimento.

3.6 Índice de área foliar

O índice de área foliar (IAF) foi definido por Watson (1947) como a razão entre a área foliar integrada do dossel e a unidade de superfície projetada no solo ($m^2 m^{-2}$). A estimativa da área foliar de cada parcela foi obtida utilizando-se equações alométricas ajustadas por amostragem dos tratamentos T, K_{3,0} e Na_{3,0}.

Inicialmente, foram selecionadas oito árvores em cada tratamento que representassem a amplitude de variação do índice de copa ($IC = DMC^2 \cdot Altura$) aos 6 e 9 meses e, o DAP aos 12, 24 e 36 meses. De cada árvore foi determinada a massa fresca de folhas diretamente no campo em balança digital e, posteriormente determinou-se a umidade (%) após secagem de amostras de cerca de 100g de folhas em estufa a 65°C sob circulação forçada de ar até massa constante. A massa seca de folhas foi calculada descontando-se a umidade da massa de folhas frescas. Em virtude do crescimento das árvores e também para maior precisão, a amostragem foi estratificada, subdividindo-se a copa em 3 partes (inferior, médio e superior).

Para a determinação da área foliar de cada árvore multiplicou-se a massa seca das folhas pela área foliar específica ($AFE = cm^2 g^{-1}$). A AFE, que representa a área por unidade de massa, foi determinada dividindo-se a área foliar pela massa seca das amostras. Para se estimar a AFE, 30 folhas frescas de cada estrato foram digitalizadas em scanner de mesa (Scanjet 3400C / Hewlett Packard) em cores numa resolução de 150 dpi. Posteriormente, as imagens foram processadas pelo software MATLAB 6.0, obtendo-se a área foliar das amostras.

3.7 Dinâmica da Serapilheira

Para o estudo da dinâmica da serapilheira foram coletadas amostras do piso florestal (serapilheira) e da deposição de folhas senescentes (folhedo) nos tratamentos T, K_{3,0} e Na_{3,0} de blocos.

A biomassa de serapilheira disposta sobre o solo foi estimada aos 18, 30 e 42 meses pós-plantio. Para isso foi utilizando um quadrado de ferro de 50 cm de lado e com este foram coletadas 4 subamostras posicionadas a distâncias diferentes de uma mesma árvore para

representar a linha e a entrelinha (Figura 4b), totalizando 1m² de área de cada unidade experimental.

A deposição de serapilheira começou a ser estimada nove meses pós-plantio e prosseguiu até os 42 meses pós plantio, para isso em cada parcela foi instalado um conjunto de 5 coletores, sendo o mesmos posicionados nas linhas e entrelinhas, a 30 cm do solo (Figura 4a). O material acumulado nos coletores a cada 4 semanas foi pesado em balança semi-analítica, após secagem em estufa até massa constante. Os coletores foram confeccionados com uma moldura de madeira (0,5 x 0,5m) e fundo de tela de nylon. As amostras coletadas foram submetidas a análises químicas para determinação da concentração de nutrientes. No período de estudo, ocorreu apenas deposição de folhas senescentes não havendo deposição de galhos e cascas e, por esse motivo, preferiu-se denominar deposição de folheto, ao invés de deposição de serapilheira.

A intensidade do processo de decomposição e mineralização de nutrientes da serapilheira foram estimadas por meio da form. 1, conforme a utilizada por Rapp e Leonardi (1988).

$$td = \frac{((BS_i + DF_i) - BS_{i+1})}{(BS_i + DF_i)} \times 100 \quad (1)$$

onde: td é a taxa de decomposição; Bs é a Biomassa de serapilheira; DF é a deposição de folheto; e i corresponde à idade em anos

A taxa de retranslocação de nutrientes foi determinada de acordo com a form. (2) proposta por Vitousek e Sanford (1986).

$$TR_j(\%) = \left[1 - \frac{\left(\frac{Cfs_j}{Cfs_{Ca}} \right)}{\left(\frac{Cfv_j}{Cfv_{Ca}} \right)} \right] \times 100 \quad (2)$$

onde: TR_j é a taxa de retranslocação do elemento j; Cfs_j é concentração do elemento j em folhas senescentes; Cfs_{Ca} é concentração de cálcio em folhas senescentes; Cfv_j é concentração do nutriente em folhas vivas; Cfv_{Ca} é concentração de cálcio em folhas vivas.

Contudo, admitindo-se que esta forma de cálculo pode subestimar as retranslocações em função de que o Ca tende a se acumular nos tecidos vegetais, determinou-se também a

retranslocação por meio da fórm. (3) que considera a diferença entre as quantidades de nutrientes nas folhas vivas e as quantidades de nutrientes depositadas no folhido:

$$TRf_j = \frac{(DF \times 1,09 \times Cfv_j) - (DF \times Cfs_j)}{(DF \times 1,09 \times Cfv_j)} \quad (3)$$

onde: TR_j é a taxa de retranslocação do elemento j nas folhas; DF é a deposição de folhido; o fator 1,09 foi introduzido para corrigir a diminuição de massa foliar durante a senescência; Cfv_j é a concentração do elemento j na folhas vivas; Cfs_j é a concentração do elemento j nas folhas senescentes.

As concentrações de nutrientes nas folhas vivas e senescentes usadas nos cálculos foram as médias dos valores determinados nas coletas para a diagnose nutricional e no folhido coletado a cada 4 semanas, respectivamente.

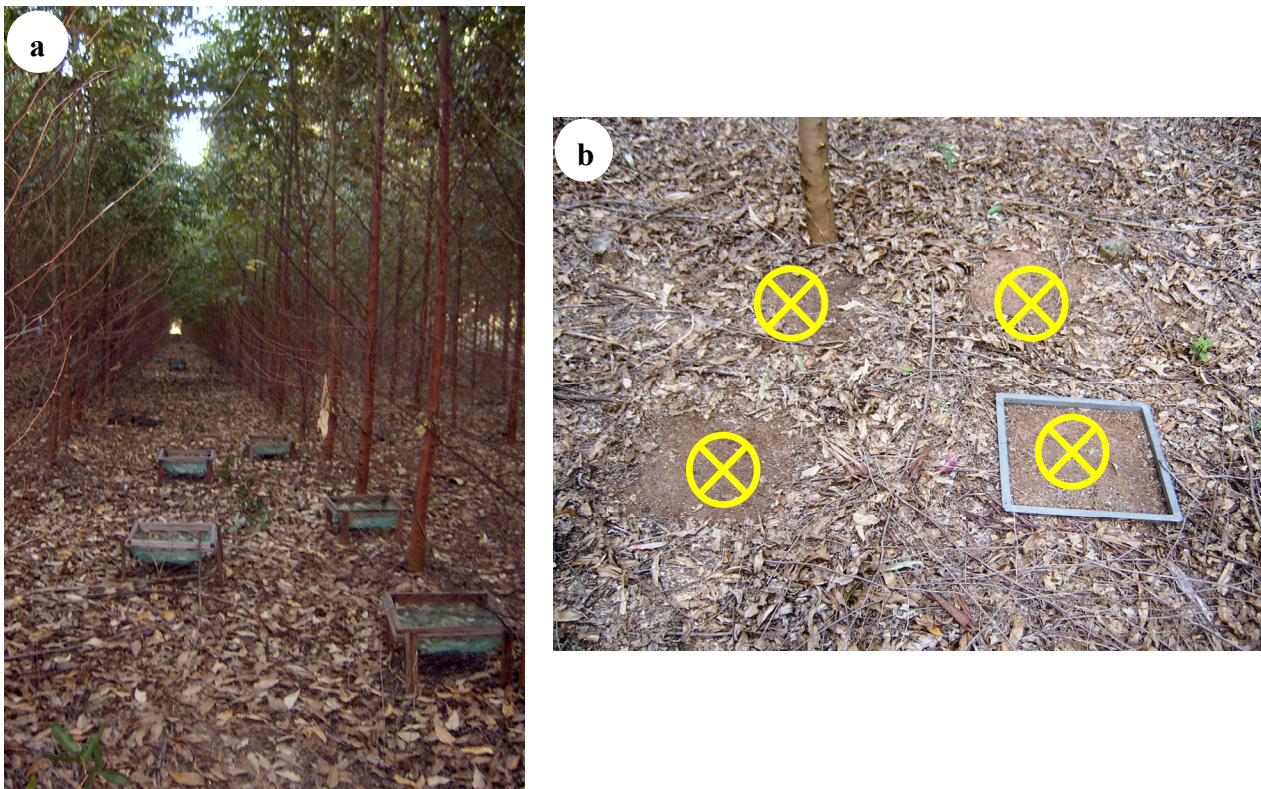


Figura 4 – (a) Disposição dos coletores da deposição de folhido no campo; (b) Disposição do coletor para amostragem de serapilheira acumulada sobre o solo

3.8 Análises químicas de tecido vegetal

As amostras de tecidos vegetais após secagem em estufa com circulação forçada de ar a 65° C até massa constante foram processadas em Moinho tipo Wiley (modelo MA680/1) e foram analisadas quimicamente no Laboratório de Ecologia Aplicada (LEA) do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ. A concentração de N foi determinada por destilação (semimicro-Kjedhal) após digestão sulfúrica. As concentrações de Ca e Mg foram determinadas por espectrofotometria de absorção atômica, as de K e Na por espectrofotometria de chama e a de P por espectrofotometria em extrato nítrico-perclórico, conforme Malavolta et al. (1997).

O conteúdo de cada nutriente foi obtido multiplicando-se a massa seca de cada compartimento da planta (lenho, casca, galhos, folhas) pela respectiva concentração do elemento químico em questão.

3.9 Fluxo de seiva

A transpiração foi estimada medindo-se o fluxo de seiva no xilema de árvores através do método de Granier (1985). Pela complexidade do método, a avaliação foi realizada apenas nos tratamentos T, K_{3,0} e Na_{3,0} localizados no bloco 1. Ao todo, foram monitoradas 24 árvores (8 por tratamento) por um período de 6 meses.

O dispositivo para medir o fluxo de seiva é constituído de duas sondas de 2 mm de diâmetro e 2 cm de comprimento, as quais foram inseridas no xilema das árvores (Figura 5), a 1,3 m da superfície do solo, separadas por uma distância vertical de 10 cm. As sondas possuem um termopar de cobre-constantan no centro de uma agulha hipodérmica. Além do termopar, a sonda superior possui uma resistência elétrica que aumenta de temperatura no local de inserção da sonda. Pela diferença de temperatura entre a sonda superior e a inferior, estima-se o fluxo de seiva. Não havendo fluxo, a diferença de temperatura entre as sondas é máxima, e se houver fluxo, o calor da sonda é dissipado por convecção e a diferença de temperatura entre as sondas diminui.

As sondas foram conectadas a um sistema automático de aquisição e armazenamento de resultados (datalogger - Campbell Sci, modelo CR10X), o qual permitiu a obtenção de medidas em 24 árvores simultaneamente (Figura 5). O “datalogger” foi programado para ler as

diferenças de temperatura a cada 10 segundos e armazenar o valor médio obtido em intervalos de 15 minutos.



Figura 5 - Dispositivos para medição do fluxo de seiva no campo: (a) Vista geral da área; (b) Sensores de Granier; (c) Instalações elétricas do conjunto Datalogger e fontes de calor

A densidade de fluxo (u) tradicionalmente é calculada a partir de uma relação empírica definida por Granier (1985) para várias espécies (eq. 4). Entretanto, Rojas et al. (2007) realizaram um trabalho preliminar de calibração, específico para o *Eucalyptus grandis*, e verificaram que a equação de Granier subestimava os valores em cerca de 2,6 vezes. Posteriormente, como resultado de um estudo mais detalhado, que consistiu basicamente em estabelecer a relação entre as variáveis térmicas (K) (eq. 6) e a densidade de fluxo de seiva (u) para cada pressão, Rojas¹ (informação pessoal) propôs a utilização da eq. 5 para estimar a densidade de fluxo u , em $m\ s^{-1}$

$$u = 119 \cdot 10^{-2} K^{1,23} \quad (4)$$

¹ ROJAS, J.S.D. Mensagem recebida por <jsdrojas@Eesalq.usp.br> em 17 maio 2009.

$$u = 3,2948 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{1,231} \quad (5)$$

$$K = \frac{\Delta T_{\text{máximo}} - \Delta T_i}{\Delta T} \quad (6)$$

onde:

$\Delta T_{\text{máx}}$ = diferença de temperatura entre os sensores quando o fluxo é nulo

ΔT_i = diferença de temperatura entre os sensores quando o fluxo é maior que zero

Para estimar o fluxo de seiva (FS) em $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ basta multiplicar o valor resultante pela área condutora de seiva ou área do xilema (A_{xilema}) na mesma unidade de medida (m^2). Pela dificuldade de determinação da área do xilema nas plantas estudadas, foi utilizada a eq. 7 proposta por Rojas (informação pessoal), que possibilita estimar essa área através da medida da circunferência do tronco a 1,3 m acima do solo (CAP, em metros).

$$A_{\text{xilema}} = 0,0189 \text{CAP}^2 + 0,0064 \text{CAP} \quad (7)$$

3.10 Índices de eficiência de uso de água e de nutrientes

Diversos índices para estimar a eficiência de uso de recursos (nutrientes, água, luz) já foram propostos, havendo também adaptações na forma de cálculo para um mesmo índice (FAGERIA, 2000). Diante de inúmeras alternativas, estimou-se a eficiência de uso de água e nutrientes (EU) para uma compreensão mais detalhada dos processos fisiológicos, ficando o coeficiente de uso biológico (CUB) e a eficiência de recuperação (ER) e a exigência de água (EA) para interpretação agrônômica, conforme demonstrados a seguir.

I - Eficiência de uso de água e nutrientes (EU), foi calculado dividindo-se a biomassa seca da parte aérea (kg) pela quantidade de água e de nutrientes (K, Na, N, P, Ca, Mg) acumulados na parte aérea (kg), conforme form. (8).

$$EU = \frac{\text{Biomassa Seca Parte Aérea}}{\text{Água ou Nutriente Acumulado}} \quad (8)$$

II - Coeficiente de uso biológico (CUB), foi obtido pela divisão a biomassa de lenho (kg) pela quantidade do recurso acumulado na parte aérea (kg) (K, Na, N, P, Ca, Mg) conforme form. (9).

$$CUB = \frac{\text{Biomassa Seca do Lenho}}{\text{Recurso Acumulado Parte Aérea}} \quad (9)$$

III - Eficiência de Recuperação (ER=%), este índice foi estimado apenas o K e o Na, por terem sido o objeto central desse estudo através da form. (10) e se tratar de uma avaliação.

$$ER = \frac{(RA_{\text{testemunha}} - RA_{\text{Tratamento}})}{RF} \quad (10)$$

onde:

$RA_{\text{Testemunha}}$ = Recurso acumulado pelo tratamento Testemunha (kg/ha)

RA_{Trat} = Recurso acumulado pelos tratamento fertilizados (kg/ha)

RF = Recurso fornecido (kg/ha)

IV – Exigência de Água (EA) foi calculada dividindo-se o volume de água utilizado num determinado período pelo incremento de biomassa (ou volume) de lenho produzido (kg) conforme form. (11)

$$EA = \frac{\text{Volume de } H_2O(\text{Litros})}{\text{Incremento Biomassa do lenho(kg)}} \quad (11)$$

3.11 Delineamento experimental e análises estatísticas

O experimento com sete tratamentos foi instalado em blocos ao acaso, com quatro repetições, totalizando 28 parcelas conforme apresentado na Figura 6.

Para avaliar o efeito dos tratamentos (variáveis independentes) sobre as variáveis dependentes, os resultados foram submetidos à análise de variância e comparações de médias por meio do teste Tukey, adotando-se o nível de significância de 5%.

Por meio de equações alométricas foram estimados o volume de madeira, a biomassa, o conteúdo de nutrientes e a área foliar em função do DAP e da altura de cada árvore e, a partir daí, a soma das 25 árvores constituiu o valor da parcela (150 m²).

Os modelos foram ajustados, utilizando o procedimento NLP do SAS para atingir a máxima verossimilhança. Modelos globais por idade (independentemente do tratamento) e modelos locais por tratamento dentro de cada idade, foram estabelecidos com até três parâmetros ($Y = a + bx^c$). A escolha dos modelos baseou-se no critério de informação de Akaike (Akaike's information criterion - AIC) e no critério de informação bayesiano de Schwarz's (Bayesian information criterion - BIC) (SICARD et al., 2006).

Os resultados foram processados com software estatístico SAS 9.1 for Windows (SAS INSTITUTE, 2002-2003) e os gráficos foram confeccionados no software SIGMAPLOT 10.0 (SPSS, 2006).

ESTRADA							Experimento
Blocos							102
I	K_{4,5}	*FS Na_{3,0}	*FS T	*FS KS_{3,0}	*FS K_{3,0}	K_{1,5}+Na_{1,5}	K_{1,5}
II	K_{1,5}	KS_{3,0}	K_{1,5}+Na_{1,5}	Na_{3,0}	T	K_{4,5}	K_{3,0}
III	T	K_{1,5}+Na_{1,5}	K_{1,5}	K_{3,0}	KS_{3,0}	K_{4,5}	Na_{3,0}
IV	K_{1,5}+Na_{1,5}	K_{4,5}	Na_{3,0}	T	K_{1,5}	KS_{3,0}	K_{3,0}

Figura 6 – Localização e casualização dos tratamentos na área experimental. As unidades amostrais utilizadas para amostragens anuais aparecem em destaque pela cor cinza. O fluxo de seiva foi determinado nas unidades amostrais do Bloco I e que são indicadas por FS (Fluxo de Seiva)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fertilidade do solo

Todos os atributos químicos do solo variaram em profundidade ($P < 0,01$) e em resposta à fertilização ($P < 0,05$). As interações profundidade vs. fertilização foram significativas ($P < 0,05$) apenas para os teores de K e Na. A tendência geral foi de diminuição dos teores de nutrientes em profundidade, exceto para o Na, cujos teores foram maiores nas camadas mais profundas (Tabela 4).

Após um ano da implantação do experimento, os teores médios de K trocável variaram de 0,1 a 0,6 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$. Teores dessa magnitude são classificados como muito baixos para fins de interpretação da fertilidade do solo (RAIJ et al., 2000). Entre 0-5 cm de profundidade o teor médio de K trocável foi de 0,51 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, diminuindo gradativamente até 0,14 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ na camada 20-40 cm (Figura 7). Os teores de Na trocáveis variaram de 0,15 a 0,38 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$. Entre 0-5 cm de profundidade o teor médio de Na foi de 0,23 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ alcançando 0,34 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ na camada de 20-40 cm.

A análise do solo três anos pós-plantio evidenciou que todos os atributos apresentaram valores menores em profundidade maiores, exceto o pH que não variou (Tabela 4). Os tratamentos afetaram significativamente ($P < 0,05$) o teor de Ca, enquanto o teor de K foi influenciado significativa ($P < 0,05$) pela interação tratamento vs profundidade.

Os teores de K trocável verificados aos três anos pós-plantio foram mais altos do que no primeiro ano, independentemente da profundidade (Figura 8). Durante o 1º ano, a demanda por nutrientes foi muito elevada, sendo que após o fechamento da copa e a queda das folhas, iniciou-se o processo de ciclagem de nutrientes. Quanto ao Na trocável, só houve diferença na camada superficial. Em profundidade, ao contrário do K, houve tendência de diminuição dos teores de Na, principalmente em $K_{3,0}$ e $Na_{3,0}$. Os teores de K e Na trocáveis numa área contígua ao experimento, que não recebeu nenhum tratamento e foi mantida livre de vegetação espontânea, variaram menos do que na área experimental. Assim, com o crescimento das árvores, os teores de K e Na aumentaram na camada superficial (0-5 cm) e diminuíram nas camadas subjacentes nos tratamentos que receberam fertilizações.

Os teores de K trocáveis no solo 0,12 $\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$ (4,9 mg kg^{-1}) encontrados antes da instalação do experimento são inferiores ao nível crítico de implantação K no solo (10 mg kg^{-3})

sugerido por Novais et al. (1986), e justifica a resposta expressiva do *Eucalyptus grandis* ao K. O parcelamento das doses e o fato delas terem sido dispostas inicialmente em covetas laterais (plântio) e, posteriormente sob a projeção da copa, local de maior densidade de raízes finas e, portanto maior absorção de nutrientes pelas plantas, certamente contribuiu para evitar a passagem do K solúvel (fertilizante) para formas não-trocáveis, aumentando a eficiência do fertilizante. Desse modo, a aplicação parcelada e localizada do fertilizante proporcionou aumento de produtividade, mas contribuiu pouco para aumentar os teores no solo, não atingindo os níveis críticos de manutenção indicados por Novais et al. (1986).

Os teores de Na verificados no solo nas duas avaliações estão dentro da faixa da normalidade e não limitam o desenvolvimento da maioria das plantas segundo Marschner (1995).

Tabela 4 - Atributos químicos do solo em diversas profundidades, um e três anos pós-plantio. Letras diferentes na coluna indicam diferença pelo teste Tukey (5%)

Profundidade Cm	pH	MO	P	K	Na	Ca	Mg	H+Al	CTC	V
		g dm ³	mg dm ³	mmolc dm ³					%	
Um ano pós-plantio										
0 – 5	4,1a	43,2	6,21a	0,51a	0,23b	12,99a	10,97a	98,4a	122,9a	20,98a
5 – 10	4,1a	25,3	4,03b	0,32b	0,30a	7,28b	6,16b	63,6b	77,3b	18,10a
10 – 20	4,1a	16,8	2,46c	0,21c	0,32b	3,18c	2,50c	49,7c	55,6c	10,98b
20 – 40	4,0b	13,2	1,89c	0,14d	0,34b	2,36c	1,58c	43,8c	48,2c	9,28b
DMS	0,1	2,54	0,75	0,05	0,04	2,20	1,70	9,14	7,6	4,18
Três anos pós-plantio										
0 – 5	4,1	52,3a	3,18a	0,67a	0,34a	13,7a	9,9a	86a	110a	23a
5 – 10	4,1	25,1b	0,87b	0,44b	0,31ab	3,7b	3,5b	53b	61b	13ab
10 – 20	4,1	17,4bc	0,63b	0,36bc	0,27b	2,1b	1,9b	44b	48bc	10b
20 – 40	4,0	14,5c	0,88b	0,32c	0,26b	1,3b	0,9b	38b	40c	7b
DMS	ns	10,0	0,74	0,08	0,06	7,1	4,6	20	20	11

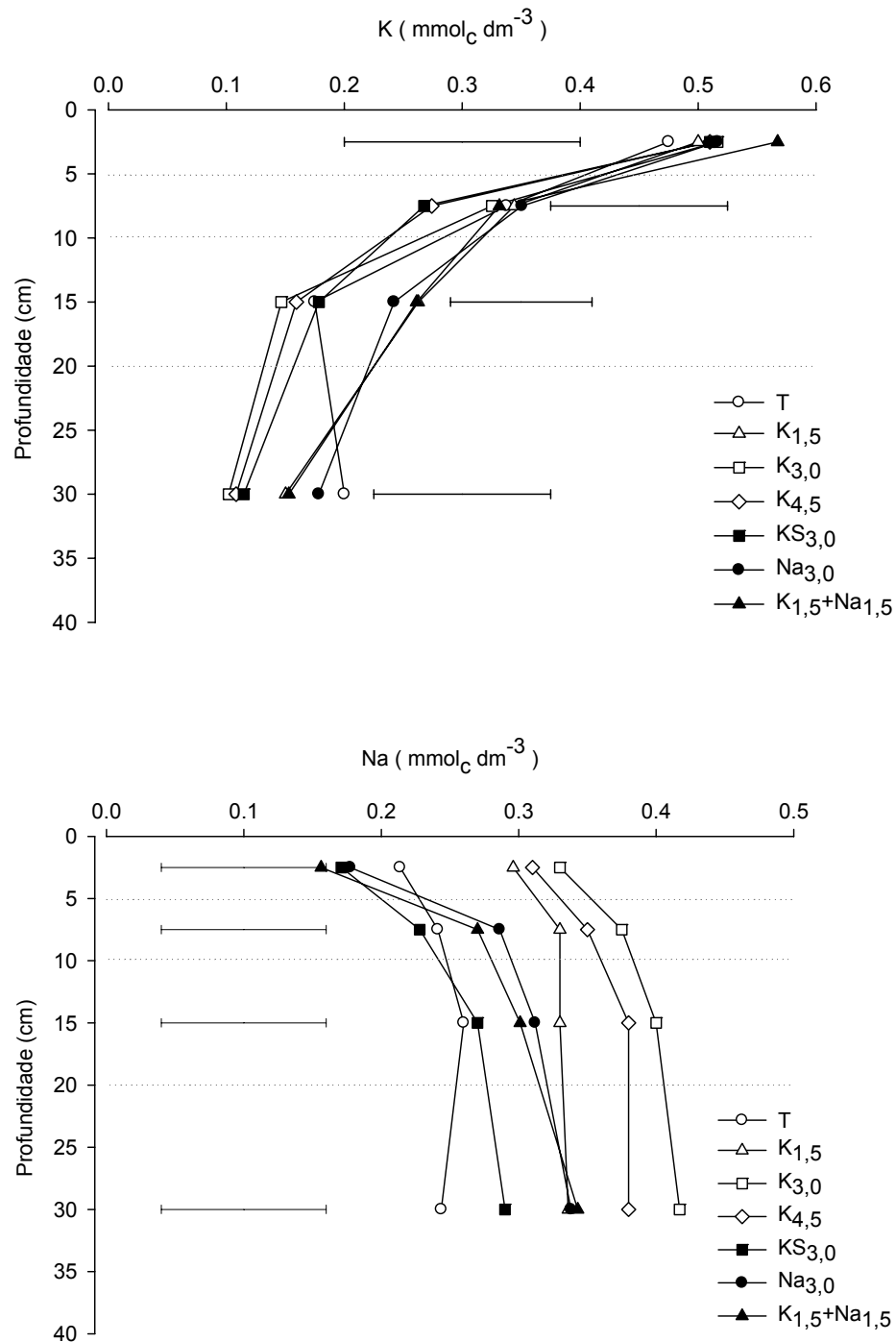


Figura 7 - Teores de K (a) e Na (b) trocáveis, em diversas profundidades, um ano pós-plantio de *Eucalyptus grandis* em resposta à fertilização potássica e sódica. As barras representam a diferença mínima significativa (5%)

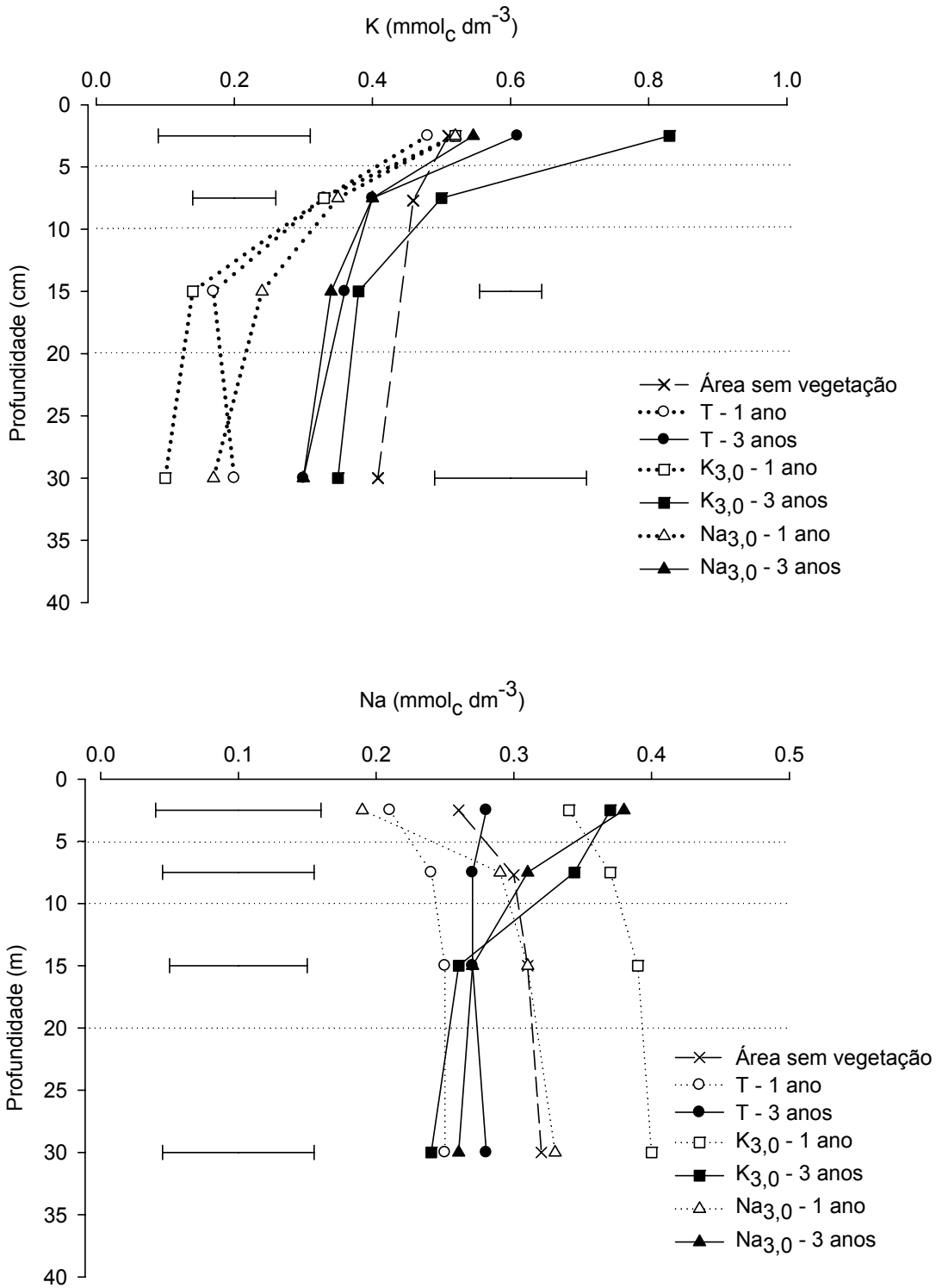


Figura 8 - Teores de K (a) e Na (b) trocáveis nos diversos tratamentos, um e três anos pós-plantio. As barras representam a diferença mínima significativa (5%)

4.2 Estado nutricional

Os tratamentos afetaram significativamente ($P < 0,05$) as concentrações de K, Na, N, P, Ca e Mg foliares em todas as idades (Tabela 5).

As concentrações de K oscilaram entre as avaliações, mas com o desenvolvimento da planta as concentrações tenderam a diminuir (Figura 9), o que evidencia a necessidade de se estabelecer dois níveis críticos de K também para a diagnose nutricional, um para a fase de implantação e outro para a fase de manutenção, assim como sugeriram Barros et al. (1990).

A concentração de K foliar esteve diretamente relacionada com as doses de K, não sendo influenciada pela fertilização sódica independentemente da idade. A resposta ao fornecimento de K pode ser observada até os 36 meses quando o tratamento $K_{4,5}$ ainda apresentava concentração de K mais elevada (Figura 10). Os tratamentos T e $Na_{3,0}$ raramente tiveram concentração de K foliar maior que 4 g kg^{-1} , e nesses tratamentos foram observados sintomas típicos de deficiência de K tais como: folhas de tamanho menor, clorose ou avermelhamento nos bordos das folhas mais velhas evoluindo para a necrose dos tecidos; árvores mais baixas com internódios (intervalo entre ramos) curtos.

As concentrações de K detectadas nesse experimento foram inferiores aos níveis críticos estabelecidos por diversos autores para o gênero *Eucalyptus* spp. e apenas o tratamento $K_{4,5}$ apresentou concentração de K acima de 6 g kg^{-1} , que configura o limite de deficiência de K estabelecido por especificamente para o *Eucalyptus grandis*. (SILVEIRA et al. 2000)

Os níveis críticos determinados pelo método gráfico (Figura 11), no qual a produção volumétrica de madeira aos 36 meses foi relacionada com as concentrações de K folhas nas diferentes idades, evidenciam que durante a fase de implantação (até os 12 meses) as concentrações de K no *Eucalyptus grandis* que possibilitaram atingir 90% da máxima produtividade física variaram de 6,0 a $6,6 \text{ g kg}^{-1}$. Na fase de manutenção (após 18 meses), os níveis críticos oscilaram entre 4,5 a $6,0 \text{ g kg}^{-1}$ ficando bem evidente a influência da época de amostragem e a idade sobre os resultados. Desse modo, cabe ressaltar que as coletas realizadas no final da estação de chuvas (maio - 24 e 36 meses) foram mais eficazes em avaliar o estado nutricional comparativamente àquelas realizadas no final do inverno (outubro - 18 e 30 meses), pois nesta época os níveis críticos foram menores que os verificados em maio, e também muito inferiores aos níveis críticos sumarizados por Silveira et al. (2000).

Tabela 5 - Análise de variância das concentrações de K, Na, N, P, Ca e Mg foliares em *Eucalyptus grandis* em resposta à fertilização com K e Na e idade

Fonte de variação	GL	K	Na	N	P	Ca	Mg
				Quadrado médio¹			
Tratamentos	6	33,3**	2764279**	6,49**	0,08ns	0,92**	0,42**
Idade	7	35,5**	2091083**	296,47**	1,59**	33,71**	3,04**
Trat, vs, Idade	42	0,77**	648405**	3,18*	0,07**	0,64**	0,086ns
Bloco	3	1,72	23042	19,64	0,06	1,04	0,032
Erro	165	0,43	41928	2,05	0,043	0,297	0,065
CV%		13	32	6	18	10	10

¹ nível de significância: ns : não significativo, * 5% e ** 1%

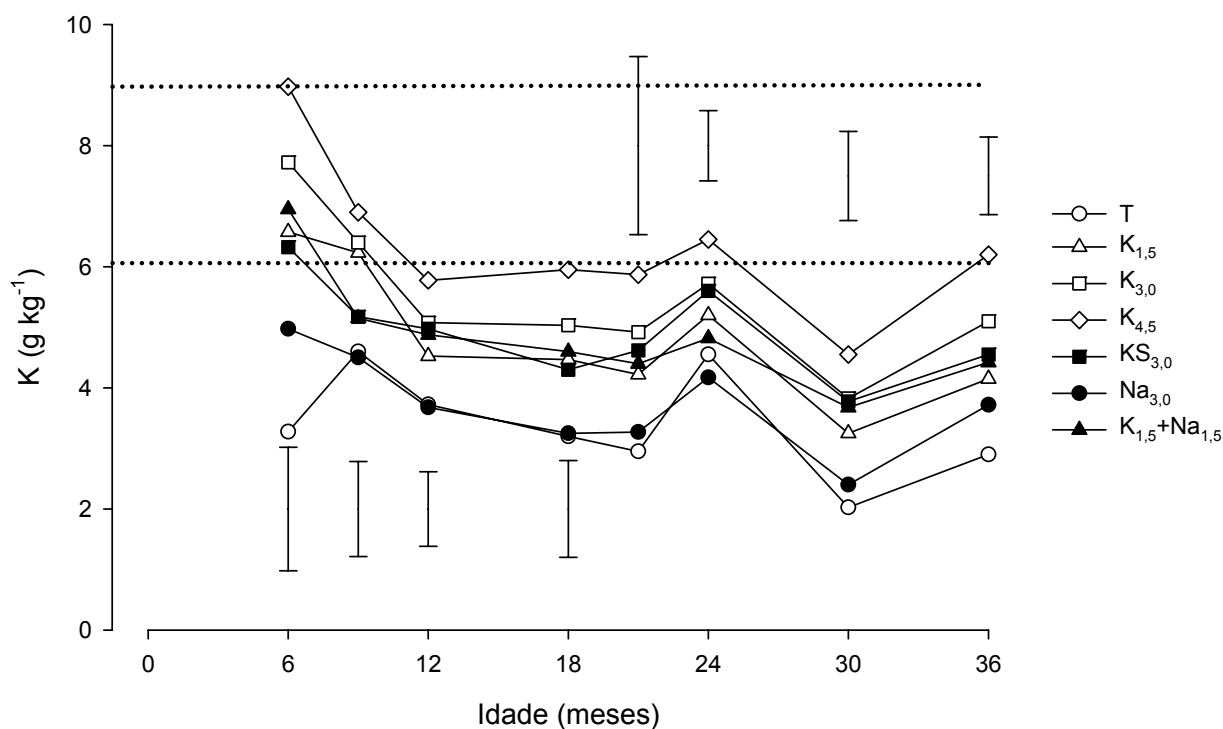


Figura 9 - Concentração de K foliar em *Eucalyptus grandis* em resposta à fertilização com K e Na e da idade. Idade: 6 (10/2004), 9 (01/2005), 12 (05/2005), 18 (10/2005), 21 (01/2006), 24 (05/2006), 30 (10/2006) e 36 (05/2007). As barras representam a diferença mínima significativa (5%)

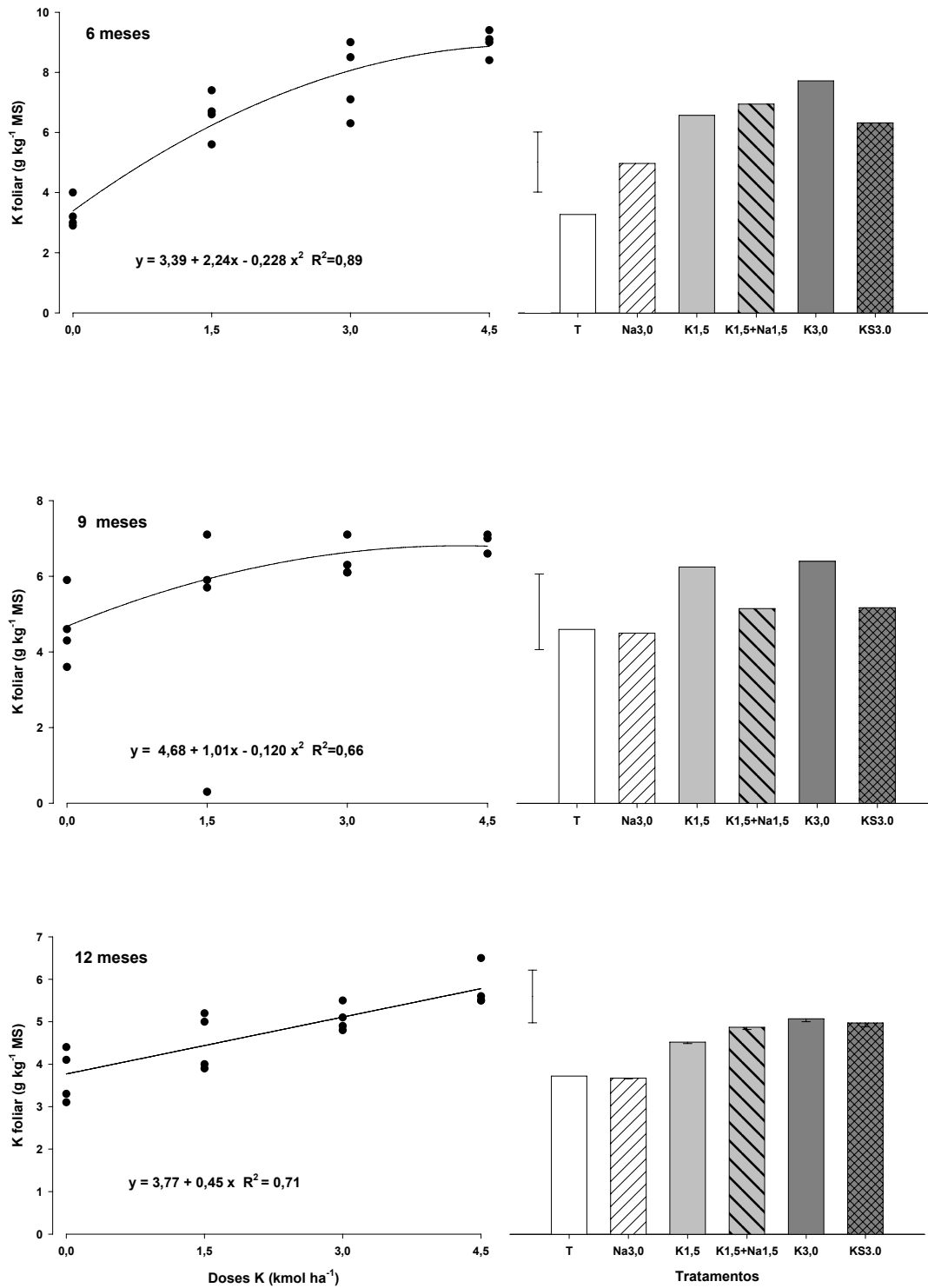


Figura 10 - Concentração de K (g kg^{-1}) em folhas de *Eucalyptus grandis*, em resposta à fertilização potássica e sódica em diversas idades. Todas as equações foram significativas ao nível de 1% de probabilidade. A barra representa a diferença mínima significativa (5%)

(continua)

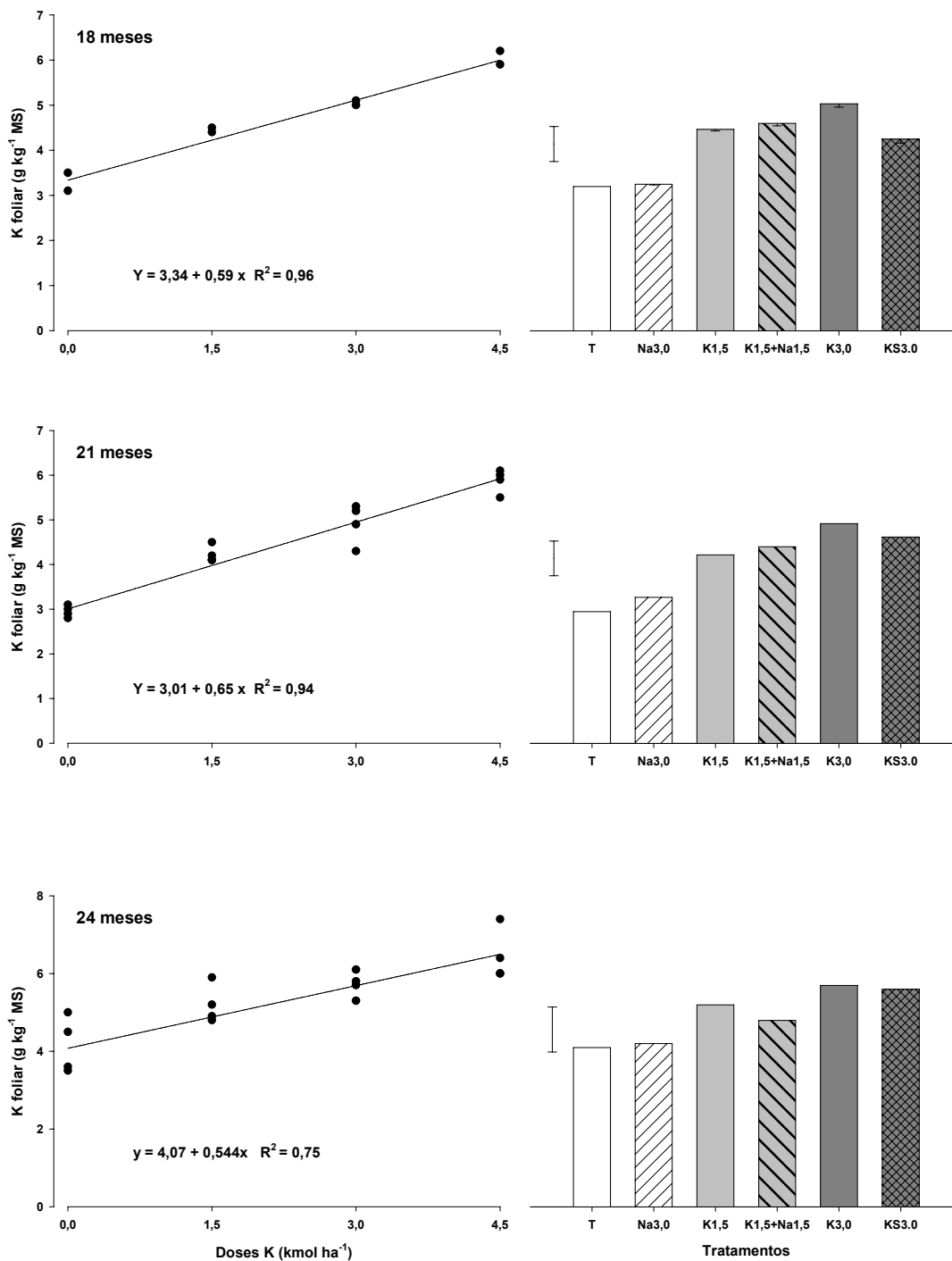


Figura 10—Concentração de K (g kg^{-1}) em folhas de *Eucalyptus grandis*, em resposta à fertilização potássica e sódica em diversas idades. Todas as equações foram significativas ao nível de 1% de probabilidade. A barra representa a diferença mínima significativa (5%)

(continuação)

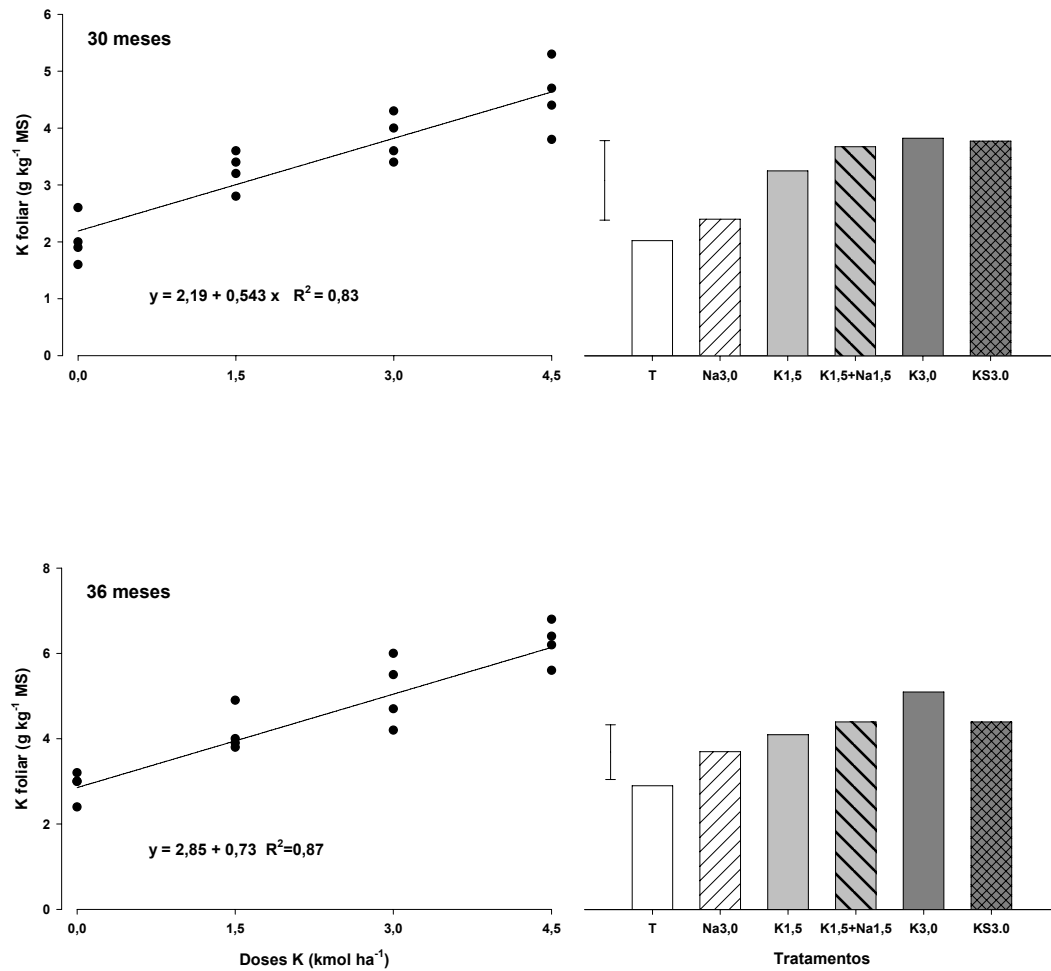


Figura 10 – Concentração de K (g kg⁻¹) em folhas de *Eucalyptus grandis*, em resposta à fertilização potássica e sódica em diversas idades. Todas as equações foram significativas ao nível de 1% de probabilidade. A barra representa a diferença mínima significativa (5%)

(conclusão)

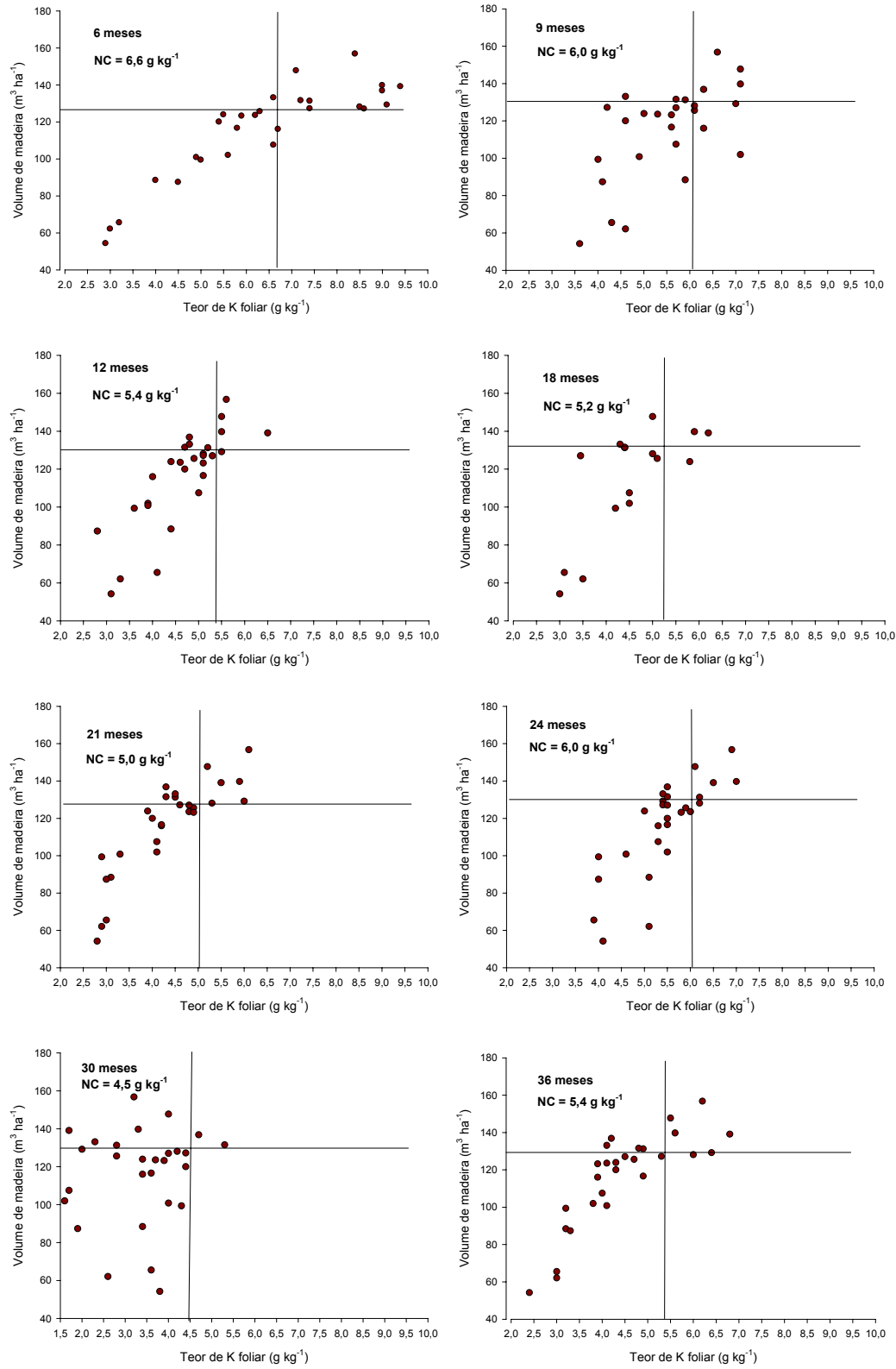


Figura 11 - Níveis críticos de K foliar considerando a produtividade volumétrica de madeira aos 36 meses, em diferentes idades. Idade: 6 (10/2004), 9 (01/2005), 12 (05/2005), 18 (10/2005), 21 (01/2006), 24 (05/2006), 30 (10/2006) e 36 (05/2007)

O fato de o plantio ter sido realizado no mês de maio, o estabelecimento no período de inverno, bem como a presença de resíduos da colheita da rotação anterior, haja vista que o preparo da área foi no sistema de cultivo mínimo, essas condições favoreceram o surgimento da ferrugem (*Puccinia psidii* Winter.). Os sintomas ocorreram nas folhas e ramos e se caracterizaram pelo aparecimento de pústulas amarelas que provocaram o secamento e a morte dos tecidos infectados. Nove meses após o plantio (janeiro/2005), com a elevação da temperatura e maior disponibilidade hídrica, as plantas fertilizadas com potássio reagiram e os esporos desapareceram, dando lugar a lesões salientes, rugosas e de coloração marrom. Em maio de 2005, um ano pós-plantio, a avaliação da incidência da ferrugem revelou que nos tratamentos com potássio, em média apenas 15% das plantas apresentavam os sintomas, enquanto que nos tratamentos sem potássio a doença se manifestava de forma mais severa e 39 % das plantas ainda apresentavam sintomas do ataque de ferrugem (Figura 12).

A menor porcentagem de plantas infectadas por ferrugem nos tratamentos fertilizados com potássio evidencia da importância deste nutriente não só para aumentar a resistência e/ou tolerância à ação de agentes patogênicos, mas também favorecer a recuperação das plantas acometidas por doenças. A relação do potássio com doenças e pragas vem sendo investigada já há bastante tempo e, levantamentos realizados por Perrenoud (1990), Zambolim, (1998) e Malavolta (2006) apontam para a diminuição da incidência em 68 % dos casos, para um total de 2449 registros.

Procurando estabelecer uma relação de causa e efeito, aos 12 meses pós-plantio, folhas de plantas normais e infectadas foram coletadas e analisadas separadas e, surpreendentemente, as plantas infectadas pela ferrugem foram aquelas que apresentaram a maior concentração de K nas folhas (Figura 13). Esse resultado, embora pareça contraditório, não invalida o efeito benéfico do potássio, na medida em que os efeitos do potássio podem se manifestar sobre o hospedeiro ou sobre o patógeno e, no nível molecular, as interações entre o patógeno e o potássio se dá não só pela deficiência, mas também pelo excesso (Malavolta, 1997). Ou seja, nas plantas em que a ferrugem foi capaz de restringir o desenvolvimento houve um efeito de concentração de nutrientes, pois conforme se verifica na Figura 24, as concentrações de nutrientes diminuem exponencialmente em função de suas dimensões.

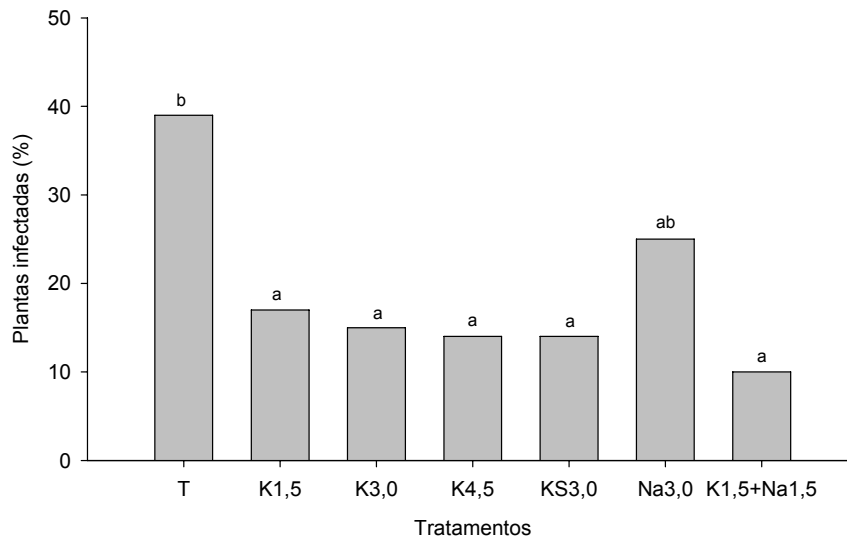


Figura 12 – Efeito da fertilização potássica e sódica sobre a ocorrência de ferrugem (*Puccinia pisidii* Winter.) em *Eucalyptus grandis*, 12 meses pós-plantio (maio/2005). Letras diferentes indicam diferença entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5%

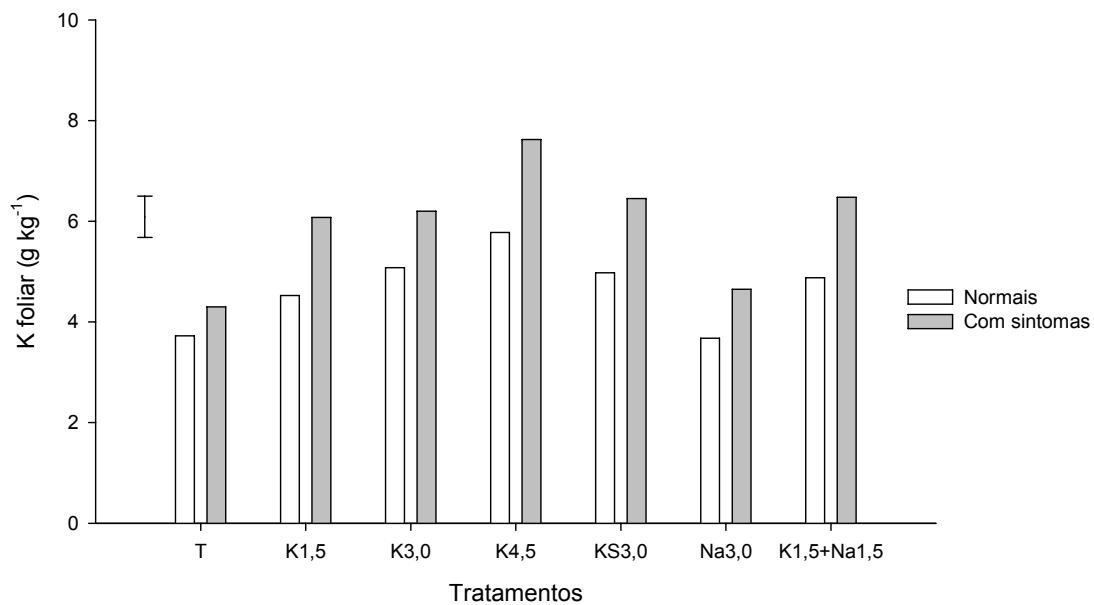


Figura 13 – Efeito da fertilização potássica e sódica sobre a concentração de K nas folhas de *Eucalyptus grandis* infectado por ferrugem (*Puccinia pisidii* Winter.) e normais (sem os sintomas) 12 meses pós-plantio (05/2005). A barra representa a diferença mínima significativa (5%) para comparação entre plantas normais e com sintomas

Conforme foi apresentado na Tabela 5, a concentração de Na foi influenciada ($P < 0,05$) pelos tratamentos. Porém, ela não foi afetada pela fertilização potássica ($P > 0,05$) sendo portanto um efeito direto do fornecimento do Na, já que apenas os tratamentos $\text{Na}_{3,0}$ e $\text{K}_{1,5} + \text{Na}_{1,5}$ apresentaram concentração de Na mais elevadas (Figura 14 e Figura 15), comparativamente aos demais tratamentos. Ainda que as diferenças tenham ocorrido ao longo dos 36 meses, o efeito foi mais evidente na primeira avaliação (out/2004), quando foram detectadas concentrações de Na de 3,4 e 2,3 g kg^{-1} , respectivamente nos tratamentos $\text{Na}_{3,0}$ e $\text{K}_{1,5} + \text{Na}_{1,5}$ (Figura 15). Aos 9 e 12 meses, verificou-se um declínio gradual para concentrações de Na de 1 g kg^{-1} , mantendo-se nesse nível até a última avaliação.

A concentração de Na foliar mais elevada nos tratamentos fertilizados com Na (Figura 15) evidencia que o *Eucalyptus grandis* foi capaz de absorver o Na pelas raízes e o transportar até as folhas, mantendo relação $\text{K/Na} > 1$ (elevada), o que segundo Viégas et al. (2003) representa uma característica de plantas glicófitas tolerantes ao Na, ou à salinidade. O que por outro lado, reforça a possibilidade do Na exercer funções no metabolismo do *Eucalyptus grandis* substituindo o K, possivelmente no estabelecimento do equilíbrio osmótico. Esse resultado traz uma contribuição importante à nutrição de plantas e reforça a hipótese de substituição parcial do K por Na, conforme propuseram Laclau (2001) para justificar a ausência de resposta à fertilização com K em áreas com baixos teores de K no solo do Congo.

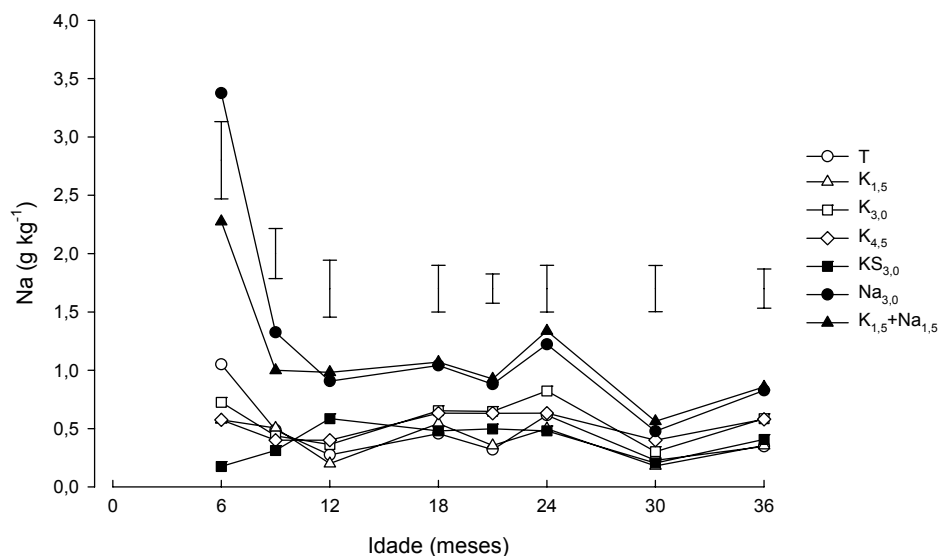


Figura 14 - Concentração de Na em folhas de *Eucalyptus grandis*, em resposta à fertilização potássica e sódica e da idade. Idade: 6 (10/2004), 9 (01/2005) 12 (05/2005), 18 (10/2005), 21 (01/2006), 24 (05/2006), 30 (10/2006) e 36 (05/2007). As barras representam a diferença mínima significativa (5%)

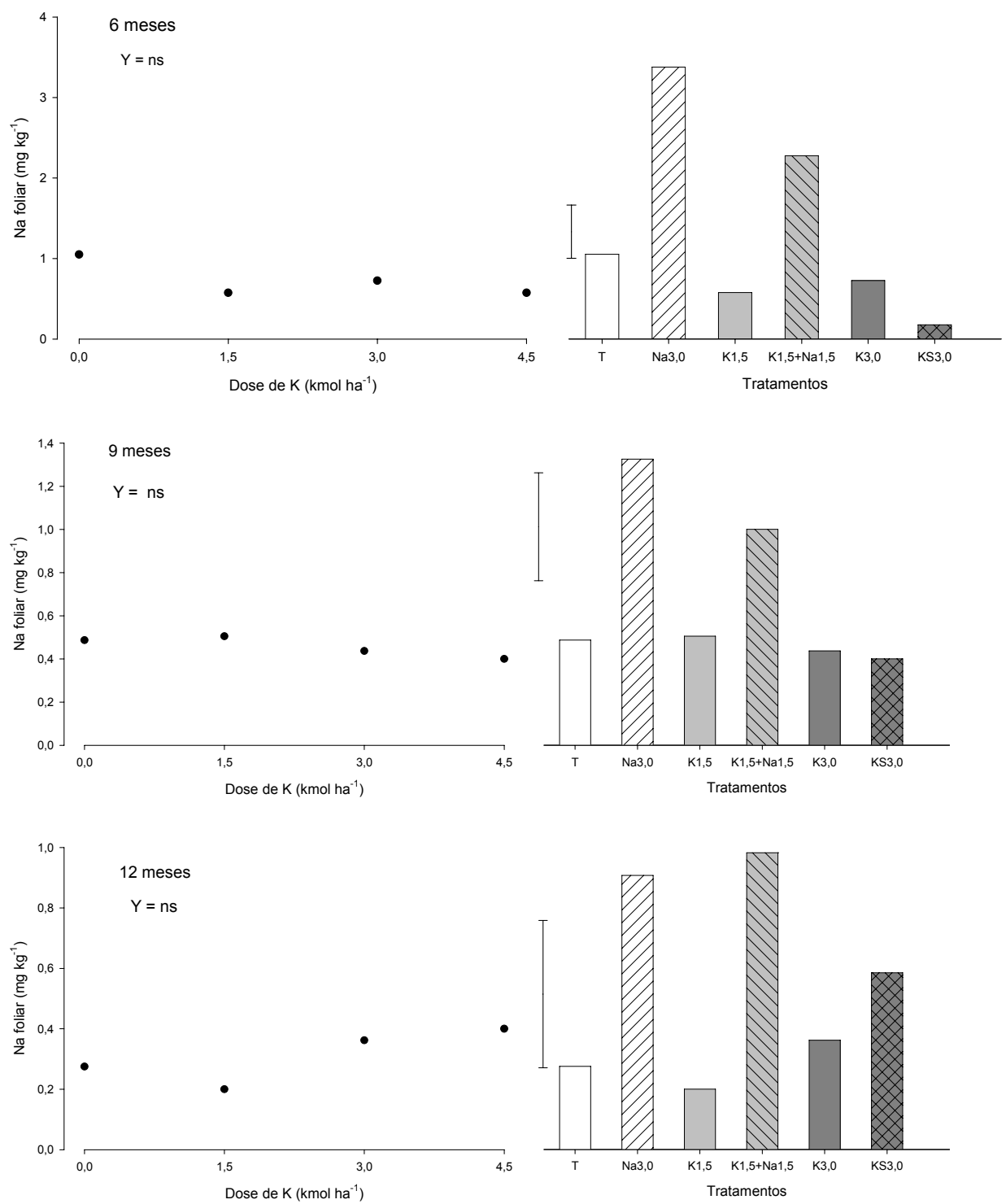


Figura 15 - Concentração de Na em folhas de *Eucalyptus grandis*, em resposta à fertilização potássica e sódica em diversas idades. ns: não significativo (P>0,05), a barra representa a diferença mínima significativa (5%)

(continua)

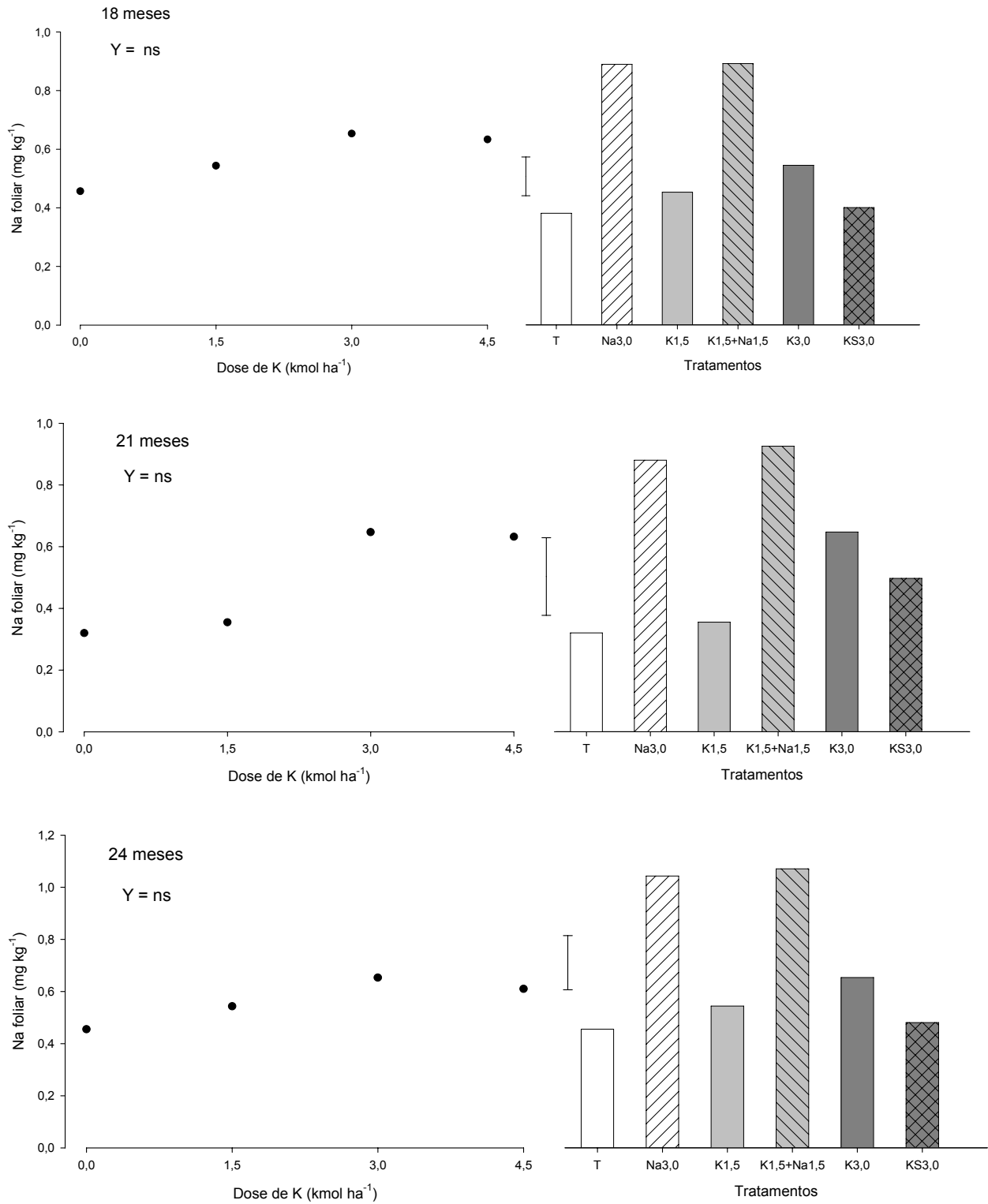


Figura 15 – Continuação, concentração de Na em folhas de *Eucalyptus grandis*, em resposta à fertilização potássica e sódica em diversas idades. ns: não significativo ($P>0,05$), a barra representa a diferença mínima significativa (5%)

(continuação)

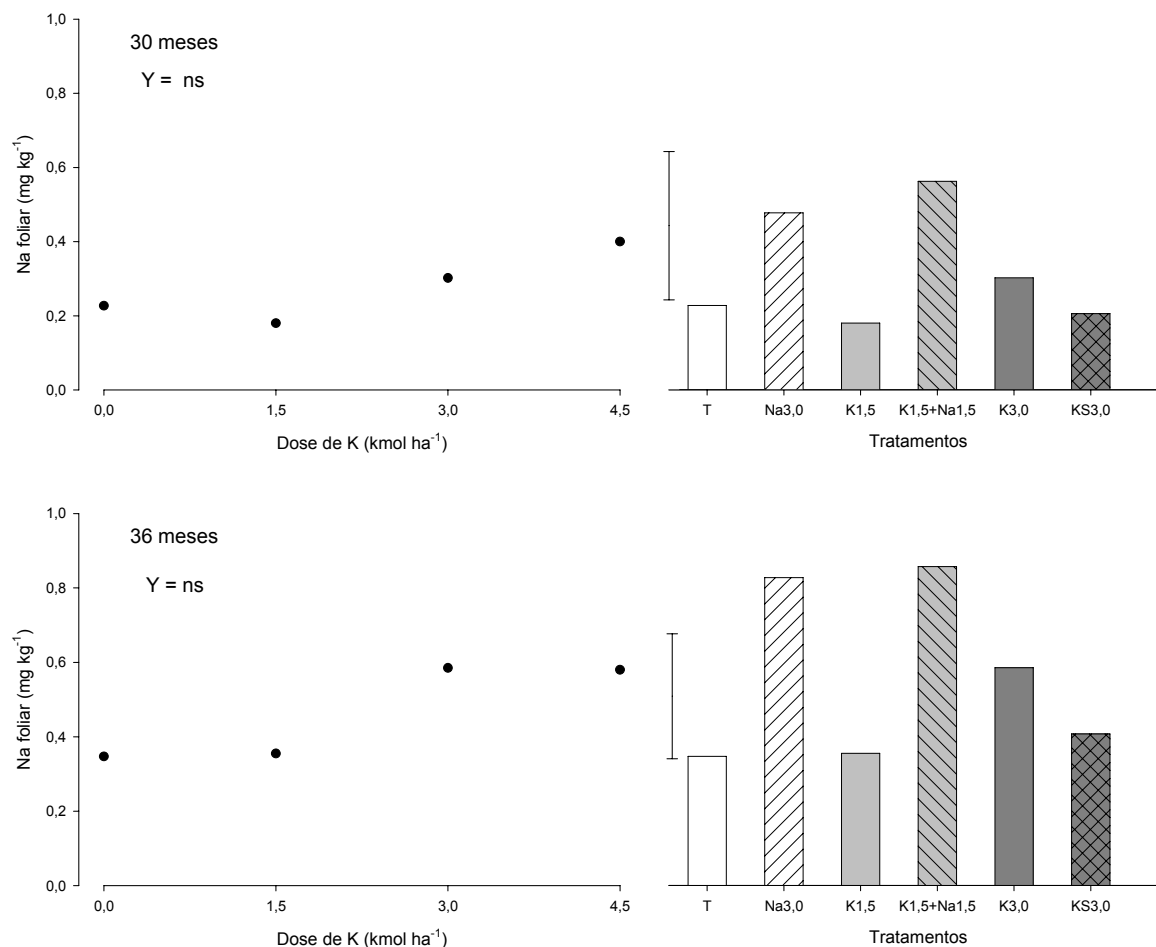


Figura 15 - Continuação, concentração de Na em folhas de *Eucalyptus grandis*, em resposta à fertilização potássica e sódica em diversas idades. ns: não significativo ($P > 0,05$), a barra representa a diferença mínima significativa (5%)

(conclusão)

A idade foi o fator que afetou mais expressivamente às concentrações de N, havendo uma diminuição da concentração média de N de 26,7 g kg⁻¹ no primeiro ano para 17,3 kg⁻¹ aos 30 meses (Figura 16). Embora efeitos significativos ($P < 0,05$) devido aos tratamentos tenham sido verificados (Tabela 5), as variações nas concentrações de N foram pequenas sob o ponto de vista nutricional, e encontram-se dentro dos limites considerados adequados para *Eucalyptus* spp conforme sumarizado por Silveira et al. (2000).

As concentrações de P também foram mais elevadas e diminuíram com a idade, variando de 1,38 g kg⁻¹ até 0,84 g kg⁻¹, meses respectivamente aos 9 e 30 (Figura 16). As concentrações detectadas e o aspecto visual das folhas, não indicaram ter ocorrido deficiência de

P. Efeito dos tratamentos sobre a concentração de P ocorreu apenas aos 12 meses e, nesse caso comparativamente ao K_{4,5} apresentou concentração de P maiores que os demais tratamentos.

A concentração de Ca verificada aos 6 meses (out/2004) encontrava-se ao redor de 3,8 g kg⁻¹, entretanto, 3 meses após (fev/2005) houve um aumento para 6,5 g kg⁻¹. Essa elevação súbita coincide com o aumento da precipitação, o que certamente contribuiu para a reação do calcário que havia sido aplicado logo após o plantio (maio/2004). Gradativamente, as concentrações de Ca voltaram para valores próximos a 4 g kg⁻¹ aos 36 meses (Figura 16). Concentrações que estão em níveis considerados adequados para *Eucalyptus grandis* segundo Silveira et al. (2000).

A concentração de Mg foliar aumentou de 1,9 para 2,9 g kg⁻¹ durante o primeiro ano, mantendo-se nesse patamar até a última avaliação aos 36 meses pós-plantio (Figura 16), estando esses valores dentro de limites satisfatórios.

O efeito dos tratamentos sobre as concentrações de Ca e Mg foi causado, possivelmente, por efeito de diluição, pois houve diminuição do Ca e Mg foliar com o aumento da produção de biomassa proporcionado pela fertilização (Tabela 6).

Tabela 6 - Concentrações médias de nutrientes nas folhas de *Eucalyptus grandis* em resposta à fertilização potássica e sódica. Letras diferentes na coluna indicam diferença entre os tratamentos pelo teste Tukey (5%)

Tratamentos	N		P		Ca		Mg		K	Na		
	g kg⁻¹ MS											
T	23,1	a	1,2	a	5,3	a	2,7	a	3,4	c	0,475	b
K_{1,5}	22,5	a	1,1	a	5,2	ab	2,6	ab	4,9	bc	0,394	b
K_{3,0}	22,7	a	1,1	a	5,1	abc	2,5	bc	5,5	a	0,494	b
K_{4,5}	22,5	a	1,2	a	5,0	c	2,4	c	6,4	ab	0,511	b
KS_{3,0}	22,3	a	1,1	a	5,0	abc	2,4	bc	5,1	ab	0,438	b
Na_{3,0}	23,6	a	1,1	a	5,1	ab	2,6	ab	3,9	c	1,129	a
K_{1,5}+Na_{1,5}	22,9	a	1,2	a	4,8	bc	2,4	c	5,0	ab	0,979	a
DMS (5%)	1,8		0,2		0,5		0,2		0,7		175	

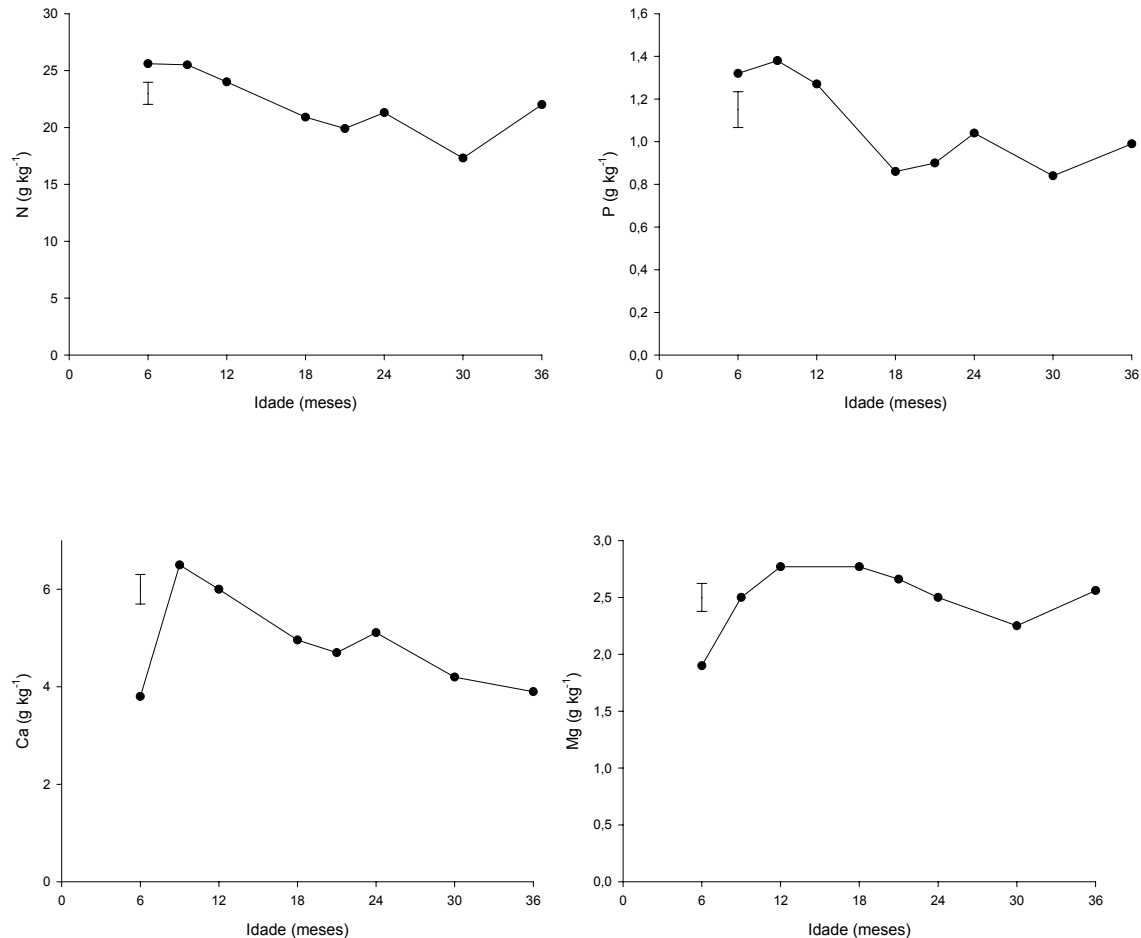


Figura 16 – Concentrações de N, P, Ca e Mg em folhas de *Eucalyptus grandis* em diversas idades. As barras representam a diferença mínima significativa (5%)

4.3 Crescimento da parte aérea

4.3.1 Altura, diâmetro e volume

De modo geral, o *Eucalyptus grandis* respondeu às fertilizações potássica e sódica ($P < 0,05$) aumentando o crescimento em altura (H) ((Figura 17), diâmetro à altura do peito (DAP) (Figura 18), volume do fuste (tronco e casca) (Figura 19 e Figura 20) e em biomassa de todos os componentes da parte aérea (Figura 21) até os 36 meses pós-plantio. As avaliações de altura permitiram evidenciar o efeito da fertilização logo aos seis meses pós-plantio, durante a fase de estabelecimento que transcorreu no período de inverno. Após a primeira estação de crescimento, 12 meses pós-plantio, a fertilização potássica propiciou que as árvores do K_{3,0} fossem 1,4 m

(38%) mais altas, cerca de 1,5 cm (54%) mais grossas e apresentassem volume de madeira 5,3 m³ (1,6 vezes) maior do que a testemunha.

Durante o segundo ano de cultivo, mesmo aumentando a competição por luz, água e nutrientes entre as árvores após o fechamento das copas, o incremento em altura e DAP das árvores adubadas com K foi cerca de 34 % maior que o da Testemunha, elevando a produtividade em volume de madeira em mais de duas vezes (69 m³ ha⁻¹ em K_{4,5} e 34 m³ ha⁻¹ na Testemunha).

Após 36 meses de cultivo, o *Eucalyptus grandis* respondeu até a maior dose de potássio (K_{4,5}) tendo as árvores alcançado altura de 17,5 m e DAP de 11,6 cm, enquanto a Testemunha atingiu 13,4 m de altura e 8,6 cm de DAP. A produtividade em volume de madeira em K_{4,5} (141 m³ ha⁻¹) foi mais que o dobro da produtividade da Testemunha (68 m³ ha⁻¹) (Figura 19).

A fertilização com Na também promoveu o crescimento do *Eucalyptus grandis* em altura, DAP e volume do fuste. Aos 36 meses pós-plantio, o tratamento Na_{3,0} apresentou árvores 18% (15,7 m) mais altas (Figura 17), 13% (10,0 cm) mais grossas (Figura 18), produzindo um volume de madeira 52% (103 m³ ha⁻¹) maior que a Testemunha (Figura 19 e Figura 21). A combinação de K_{1,5}+Na_{1,5} proporcionou volume de madeira (12%) maior que o tratamento K_{1,5}, embora os tratamentos não tenham diferido significativamente (Figura 21).

A fertilização do *Eucalyptus grandis* com K₂SO₄ não se mostrou vantajosa quando comparada ao KCl, pois este último além de ter custo mais baixo, proporcionou, em termos relativos, um volume de madeira 10% maior, ainda que não existam diferenças significativas a 5% entre os tratamentos (Figura 21).

As relações alométricas foram influenciadas pela fertilização até os 24 meses pós-plantio, pois equações distintas foram utilizadas para a estimativa do volume de madeira nos diversos tratamentos. Posteriormente, aos 36 meses, apenas uma equação foi suficiente para estimar o volume de madeira para todos os tratamentos (Tabela 7).

O maior crescimento em altura, DAP e volume em resposta ao K apresentado pelo *Eucalyptus grandis* neste experimento, ratifica a importância da fertilização potássica para se alcançar produtividades elevadas das florestas plantadas em solos de Cerrado conforme relataram Galo (1993), Gava (1997), Silveira et al. (2000), Faria et al. (2002) e Gonçalves et al. (2004). Por outro lado, a resposta positiva do *Eucalyptus grandis* à fertilização com Na é um fato ainda não relatado anteriormente.

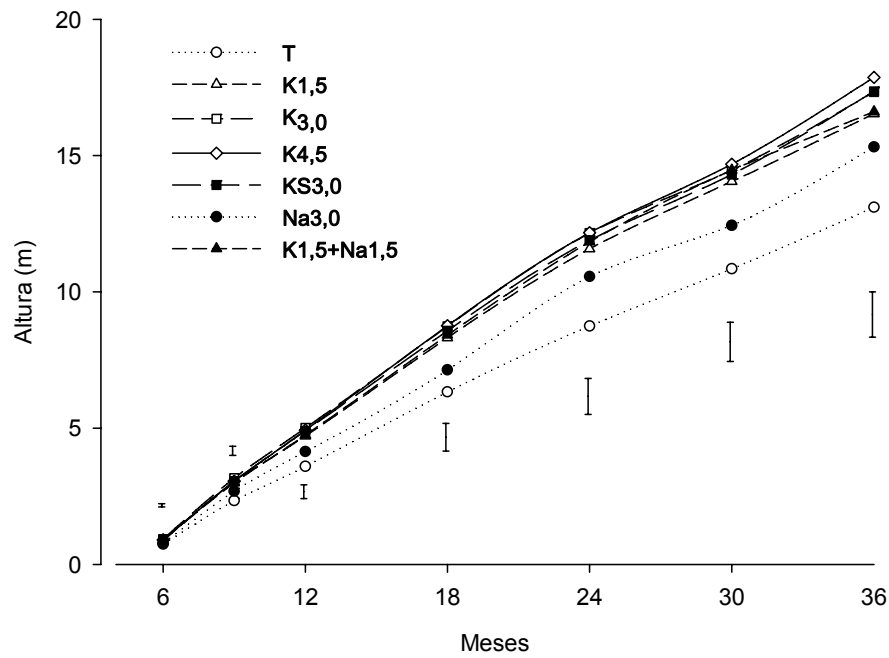


Figura 17 - Crescimento em altura do *Eucalyptus grandis* em resposta à fertilização com K e Na

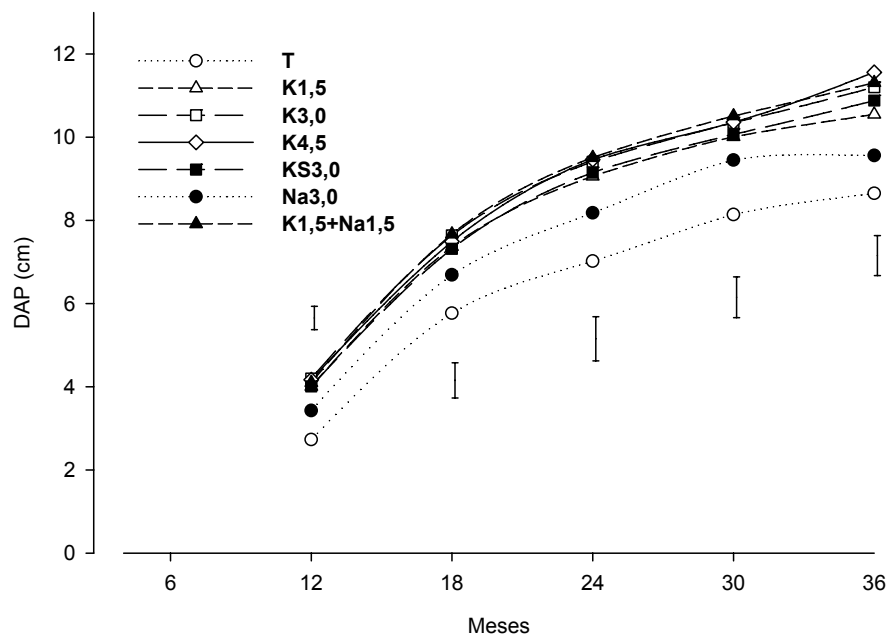


Figura 18 - Crescimento em DAP do *Eucalyptus grandis* em resposta à fertilização com K e Na

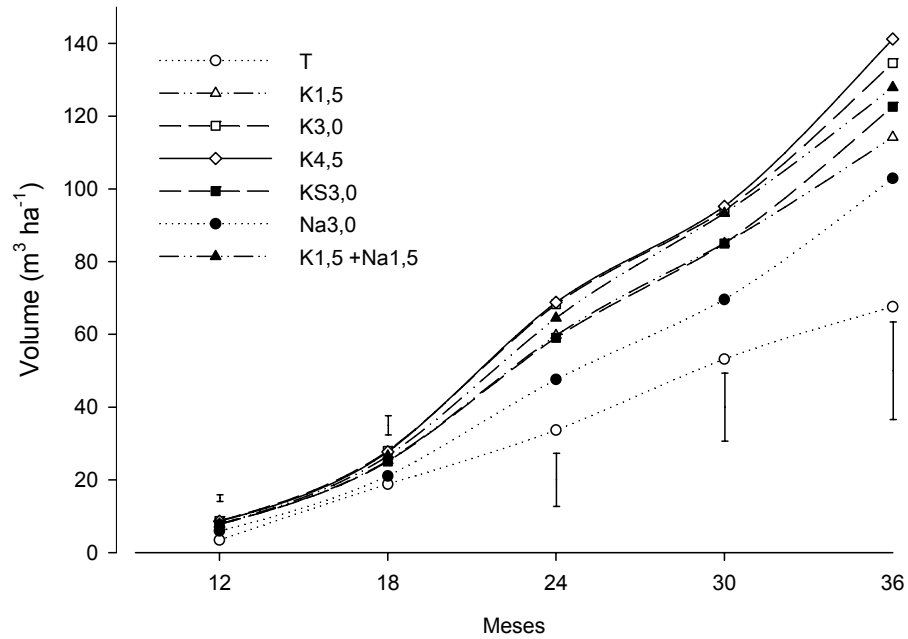


Figura 19 - Crescimento em volume com casca do *Eucalyptus grandis*, em resposta à fertilização com K e Na

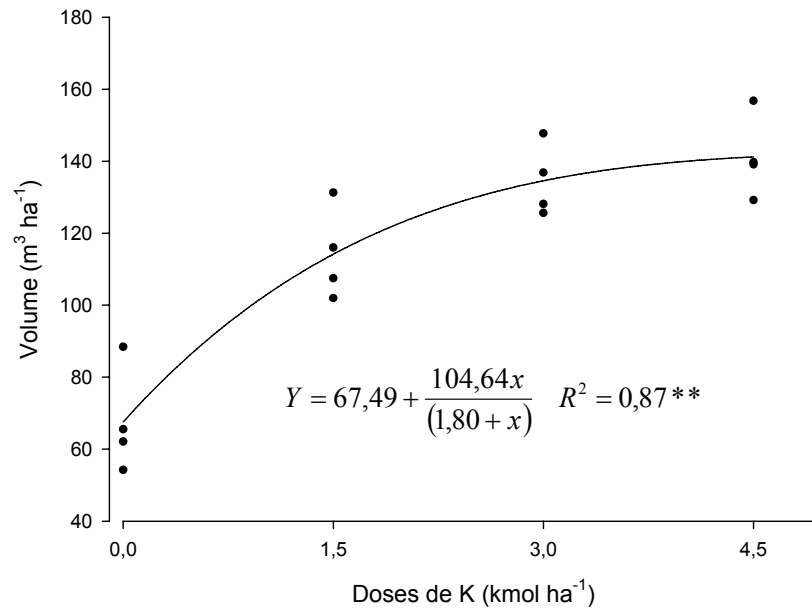


Figura 20 - Resposta do *Eucalyptus grandis* à fertilização potássica, em volume de madeira com casca, aos 36 meses pós-plantio. ** (P<0,01)

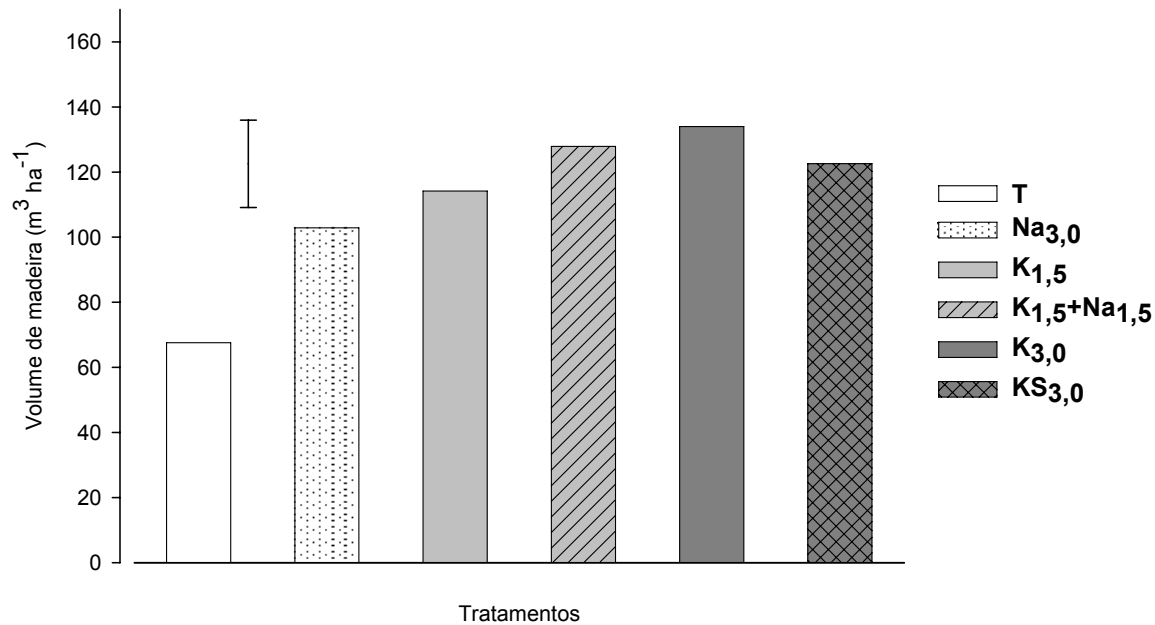


Figura 21 - Volume de madeira com casca do *Eucalyptus grandis*, nos diversos tratamentos, aos 36 meses pós-plantio. A barra representa a diferença mínima significativa (5%)

Tabela 7 - Equações alométricas usadas para estimar o volume de madeira com casca (dm³), em função do DAP e da altura, em resposta à fertilização com K e Na. (T) Testemunha; (K) para todos os tratamentos adubados com K e (Na_{3,0}) 3,0 kmol ha⁻¹

Idade Meses	Tratamento	Modelo	Erro
12	T	$y = 282,791 \text{ DAP}^2 \text{H}^{0,856}$	$\varepsilon = \sqrt{0,440} \text{ DAP}^2 \text{H}^{0,144}$
	K e Na _{3,0}	$y = 127,096 \text{ DAP}^2 \text{H}^{0,682}$	$\varepsilon = \sqrt{0,440} \text{ DAP}^2 \text{H}^{0,144}$
24	T	$y = 309,0921 \text{ DAP}^2 \text{H}^{0,895}$	$\varepsilon = \sqrt{55,342} \text{ DAP}^2 \text{H}^{0,7399}$
	K	$y = 295,7334 \text{ DAP}^2 \text{H}^{0,895}$	$\varepsilon = \sqrt{55,342} \text{ DAP}^2 \text{H}^{0,7399}$
	Na _{3,0}	$y = 292,1719 \text{ DAP}^2 \text{H}^{0,895}$	$\varepsilon = \sqrt{55,342} \text{ DAP}^2 \text{H}^{0,7399}$
36	T, K e Na _{3,0}	$y = 323,559 \text{ DAP}^2 \text{H}^{0,91}$	$\varepsilon = \sqrt{161,38} \text{ DAP}^2 \text{H}^{0,976}$

4.3.2 Índice de Área Foliar

Durante a fase de estabelecimento (6, 9 e 12 meses) modelos globais foram os mais eficientes para estimar a área foliar das árvores, independentemente do tratamento aplicado. Com o fechamento das copas, ocorreram modificações na arquitetura da copa e na estrutura das folhas sendo necessário, portanto, modelos específicos por tratamento para estimar o IAF aos 24 e 36 meses (Tabela 8). De modo geral, esses resultados evidenciam que o IAF pode ser influenciado por práticas de manejo, como a fertilização, não estando relacionado unicamente às dimensões da árvore conforme discutido por Smersthurst et al. (2003). Em função disso, o uso de modelos globais deve ser feito de maneira criteriosa e pontual, pois pode levar a estimativa do IAF que não representem verdadeiramente uma situação.

Tabela 8 - Modelos para estimativa da área foliar (m^2) por árvore, em resposta à fertilização com K e Na, em diversas idades

Meses	Tratamentos	Modelo para média	Erro
6	T, K _{3,0} e Na _{3,0}	Y=2,31 (IC)	$\epsilon = \sqrt{0,189}$ (IC) ^(0,89)
9	T, K _{3,0} e Na _{3,0}	Y =1,116 (IC)	$\epsilon = \sqrt{88,045}$ (IC) ^(-0,36)
12	T, K _{3,0} e Na _{3,0}	Y =4,40+1445,9 (DAP ² H)	$\epsilon = \sqrt{160,95}$ (DAP ² H) ^(0,25)
24	T K _{3,0} Na _{3,0}	Y =393,44 (DAP ² H) Y =281,06 (DAP ² H) Y =235,95 (DAP ² H)	$\epsilon = \sqrt{773,70}$ (DAP ² H) ^(0,57) $\epsilon = \sqrt{773,70}$ (DAP ² H) ^(0,57) $\epsilon = \sqrt{773,70}$ (DAP ² H) ^(0,57)
36	T K _{3,0} Na ₃	Y = 152,59 (DAP ² H) Y = 3,18 + 133,18 (DAP ² H) Y = 118,52 (DAP ² H)	$\epsilon = \sqrt{40,50}$ (DAP ² H) ^(0,379) $\epsilon = \sqrt{40,50}$ (DAP ² H) ^(0,379) $\epsilon = \sqrt{40,50}$ (DAP ² H) ^(0,379)

A fertilização potássica possibilitou o aumento contínuo da área foliar, atingindo IAF de 5,4 $m^2 m^{-2}$ aos 36 meses pós-plantio, valor superior aos encontrados nos tratamentos Testemunha e Na_{3,0}, respectivamente 2,7 e 3,2 $m^2 m^{-2}$ (Figura 22). O aumento do IAF, proporcionado pela fertilização potássica, é possivelmente o fator que mais contribuiu para aumento da produtividade, pois permite aumentar a eficiência da absorção e o aproveitamento da Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA), o que segundo Stape et al. (2004) sítios florestais de maior produtividade com IAF de 4,3 conseguiram capturar 78% da RFA, enquanto outros sítios de produtividade mais baixa, com IAF de 2,9, conseguiram aproveitar apenas 65% da RFA incidente.

O fornecimento de sódio ($\text{Na}_{3,0}$) embora tenha proporcionado IAFs superiores aos do tratamento Testemunha nas 3 primeiras avaliações (6, 9 e 12 meses), com o passar do tempo, eles se igualaram alcançando IAF de aproximadamente $3 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, valor esse comumente encontrado nas florestas plantadas de *Eucalyptus* no Brasil, ou mesmo em outros ecossistemas (XAVIER et al. 2002; ALMEIDA et al., 2007; KALLARACKAL; SOMEN, 1997).

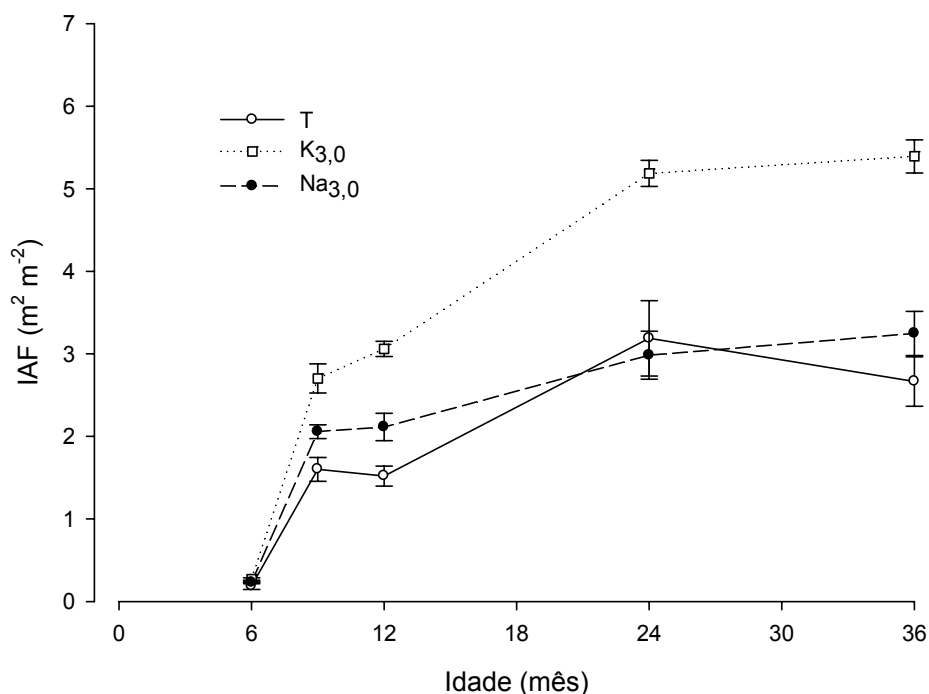


Figura 22 - Índice de Área foliar (IAF) de *Eucalyptus grandis*, em resposta à fertilização com K e Na e da idade. As barras junto às médias representam o erro padrão da média

4.3.3 Biomassa

A fertilização com K e Na aumentou a produção de biomassa da parte aérea de *E. grandis* (Tabela 9). Durante os primeiros 24 meses, verificou-se um aumento progressivo da biomassa de folhas, mantendo-se estável a partir daí. Em todas as avaliações, o fornecimento de K possibilitou maior biomassa de folhas que os demais tratamentos. O fornecimento de Na, por sua vez, proporcionou biomassa de folhas maior que a da testemunha aos 12 e 36 meses. Para sustentar a maior produção de folhas em função do fornecimento de K e Na, também houve nestes tratamentos, maior produção de galhos (vivos e mortos). Os efeitos da fertilização sobre a produção de biomassa do tronco (lenho+casca) foram altamente significativos, possibilitando,

após os 36 meses de cultivo, 55,1 e 41,5 Mg ha⁻¹ para os tratamentos K_{3,0} e Na_{3,0}, respectivamente, o que corresponde a 107 e 56 % da biomassa alcançada por T (26,1 Mg ha⁻¹). Pode-se observar também, que a fertilização influenciou as relações alométricas, requerendo equações diferentes, para a maioria dos compartimentos, em todas as idades de amostragem (Tabela 10).

4.4 Deposição de folheto

A variação mensal da deposição de folheto (Figura 23) esteve diretamente relacionada com as condições climáticas (Figura 1), aumentando a queda de folhas nos períodos de menor precipitação. Nesse sentido, aos 23 e 34 meses ocorreram veranicos que resultaram nas maiores deposições de folheto.

Foram detectadas diferenças significativas ($P < 0,05$) entre os tratamentos em 6 das 30 épocas de coleta. Até os 12 primeiros meses, a deposição de folheto foi pequena em virtude da baixa competição por luz, até o completo fechamento das copas, por essa razão, a biomassa de folhas senescentes nos tratamentos K_{3,0} e Na_{3,0} foi de 1,1 e 1,3 Mg ha⁻¹, respectivamente, enquanto a de T, que teve um desenvolvimento mais lento, atingiu apenas 0,7 Mg ha⁻¹ (Tabela 9). A partir dos 12 meses, a biomassa de folheto total acumulada anualmente, variou de 5,2 a 6,5 Mg ha⁻¹ e o total acumulado após 36 meses atingiu 12,1, 12,8 e 13,6 Mg ha⁻¹, respectivamente nos tratamentos T, K_{3,0} e Na_{3,0} (Tabela 9). Entretanto, apesar de ter existido pequena variação no total de folheto acumulado, as deposições de folheto no tratamento Testemunha foram mais intensas em dezembro (2005), março (2006) e janeiro (2007) evidenciando a importância da fertilização potássica para o aumento da tolerância ao déficit hídrico.

4.5 Produtividade Primária Líquida (PPL)

A PPL foi fortemente influenciada pela fertilização de K e Na, sendo constatadas PPL maiores que a da Testemunha logo aos 12 meses (Tabela 9). Entre os 12 e 24 meses, verificou-se uma recuperação da Testemunha que se igualou ao Na_{3,0}. Entre 24 e 36 meses, os tratamentos K_{3,0} e Na_{3,0} elevaram a PPL para 40,0 e 34,3 Mg ha⁻¹, respectivamente, valores que são 108 e 78,6% maiores que a apresentada pelo T (19,2 Mg ha⁻¹) (Tabela 9). Pode ser observado, também,

o aumento da PPL com a evolução da idade, exceto para o T que apresentou uma diminuição da PPL após 24 meses.

O incremento de biomassa no tronco (lenho+casca), em relação à PPL de cada ano, representou 20 a 30% aos 12 meses, 40 a 60% entre 12 e 24 meses e 70% entre 24 e 36 meses, sendo notório o aumento da participação do tronco na PPL com a idade.

O maior crescimento em altura (Figura 17) e diâmetro (Figura 18), em biomassa (Tabela 9) e em volume de madeira (Figura 19) apresentado pelo *Eucalyptus grandis*, esteve diretamente relacionado com o aumento do índice de área foliar proporcionado pela fertilização potássica (Figura 22), reiterando a importância da fertilização potássica como uma prática de manejo florestal indispensável para se aumentar a produtividade do *Eucalyptus grandis*, principalmente nas florestas cultivadas em solos distróficos ou naqueles submetidos a sucessivos ciclos de produção sem a reposição dos nutrientes exportados conforme relatado por Galo (1993), Gonçalves et al. (1996), Gava (1997), Silveira et al. (2000) e Faria et al. (2002) em várias regiões do Brasil.

A forma com que o fertilizante potássico (KCl ou K₂SO₄) foi aplicado não afetou expressivamente o desempenho do *Eucalyptus grandis*, todavia o custo mais alto do K₂SO₄ seguramente restringe seu uso em escala comercial.

Ainda que a substituição total do K_{3,0} por Na_{3,0} não tenha alcançado a mesma produtividade do tratamento K_{3,0}, o aumento de produtividade em 35 m³ (>52%) no volume de madeira em relação à Testemunha, evidencia a resposta positiva do *Eucalyptus grandis* à fertilização com Na, o que é um resultado bastante original ainda não relatado, sobretudo em condição de campo. Contudo, a substituição parcial (K_{1,5}+Na_{1,5}) constituiu a opção mais interessante, pois além de ter alcançado uma produtividade equivalente (<5%) ao tratamento K_{3,0} estimulou um aumento de 12% em volume de madeira, comparativamente ao tratamento K_{1,5} (Figura 21). Desse modo, a substituição parcial do K por Na surge como uma prática de manejo possível de ser implementada nas florestas de *Eucalyptus grandis*, assim como acontece para outras culturas (MALAVOLTA, 1980; MENGEL; KIRKBY, 1987; SUTCLIFFE; BAKER, 1989; MARSCHNER, 1995; BONNEAU, 1998; EPSTEIN; BLOOM, 2006).

A substituição parcial do K por Na é de grande interesse prático e econômico, pois possibilitaria o uso de fertilizantes com menor grau de pureza a um custo menor, já que o processo de purificação requer um consumo de energia elevado encarecendo o produto final e,

além disso, permitiria o uso de resíduos industriais e urbanos, ou talvez o aproveitamento de áreas marginais com altos teores de Na no solo para o plantio *Eucalyptus grandis*.

A maior produtividade de biomassa vegetal, proporcionada pela fertilização de K e Na, está relacionada à capacidade desses elementos ativarem enzimas, participarem como solutos intracelulares no processo de abertura e fechamento dos estômatos, regulando o processo de assimilação de C e perda de água, interferindo diretamente sobre a turgescência, a expansão foliar e o aproveitamento da radiação solar. Nesse sentido, pode-se supor que o aumento de produtividade foi decorrente da maior produção de folhas (Tabela 9) e, conseqüentemente, do aumento do IAF (Figura 22). Além disso, a fertilização potássica contribuiu para aumentar o tempo de vida e evitar a senescência precoce das folhas e, possivelmente, aumentando a resistência da planta ao estresse hídrico (Figura 23), aumentando o tempo de vida das folhas nos períodos de seca, fatores que foram determinantes para a resposta do *Eucalyptus grandis* ao K e ao Na conforme apresentado por Laclau et al. (2009).

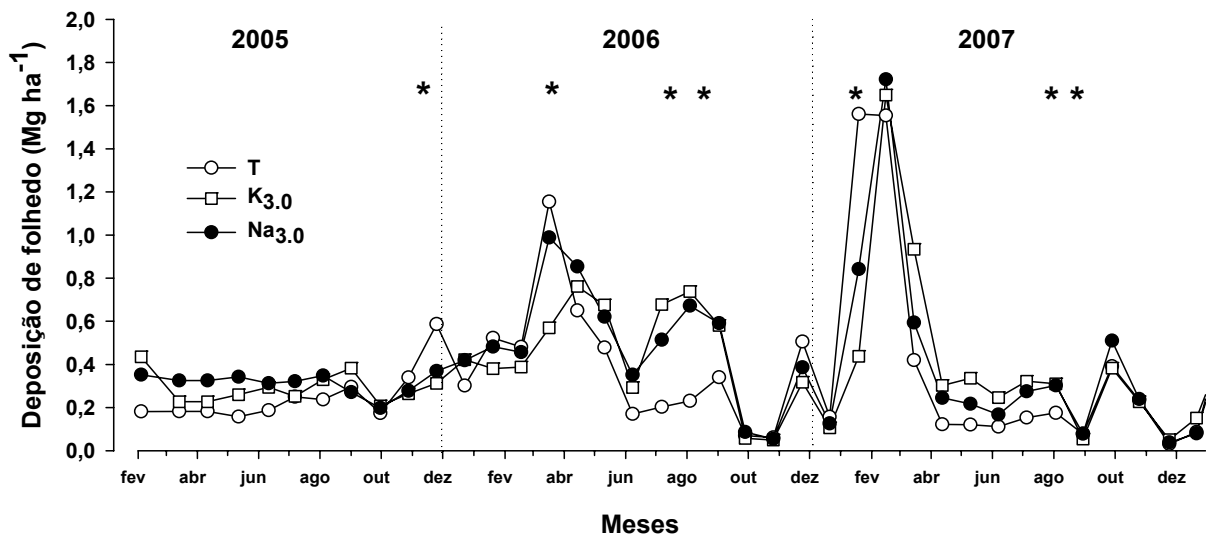


Figura 23 - Deposição de folheto de *Eucalyptus grandis* entre 10 e 36 meses pós-plantio em resposta à fertilização com K e Na. * indicam diferença significativa ($P < 0,05$) entre os tratamentos

Tabela 9 - Biomassa da parte aérea, deposição de folheto e produtividade primária líquida (PPL) aos 12, 24 e 36 meses, em resposta à fertilização com K e Na. Os valores apresentados entre parênteses correspondem ao percentual de aumento comparado à Testemunha. Letras diferentes na linha indicam diferença entre os tratamentos pelo teste Tukey (5%)

Idade Compartimento	T	K _{3,0}		Na _{3,0}	
		Mg ha ⁻¹ (%)			
12 meses					
Folhas	1,1 b	2,1 a	(91)	1,7 a	(54)
Galhos vivos	2,2 c	3,5 a	(59)	2,7 b	(23)
Lenho	0,9 b	2,5 a	(178)	1,4 b	(56)
Casca	0,3 c	0,6 a	(100)	0,4 b	(33)
Biomassa da parte aérea	4,4 c	8,7 a	(98)	6,2 b	(41)
24 meses					
Folhas	3,4 b	5,2 a	(53)	3,5 b	(3)
Galhos vivos	5,1 a	5,7 a	(12)	3,9 a	(-23)
Galhos mortos	1,8 a	2,3 a	(28)	2,2 a	(22)
Lenho	10,4 c	22,9 a	(120)	15,3 b	(47)
Casca	2,4 b	4,1 a	(71)	2,9 b	(21)
Biomassa da parte aérea	23,2 b	40,1 a	(73)	27,8 b	(20)
36 meses					
Folhas	2,4 c	5,1 a	(112)	3,8 b	(58)
Galhos vivos	3,6 c	7,6 a	(111)	5,7 b	(58)
Galhos mortos	3,4 b	5,5 a	(62)	4,6 ab	(35)
Lenho	22,2 c	46,7 a	(110)	35,1 b	(58)
Casca	4,4 c	8,4 a	(91)	6,4 b	(45)
Biomassa da parte aérea	36,0 c	73,3 a	(104)	55,6 b	(54)
Deposição de Folheto					
Até 12 meses	0,7 b	1,1 a	(57)	1,3 a	(86)
12 a 24 meses	5,9 a	5,2 a	(-12)	5,9 a	(0)
24 a 36 meses	5,5 a	6,5 a	(18)	6,4 a	(16)
PPL					
Até 12 meses	5,3 b	10,1 a	(91)	7,6 ab	(43)
12 a 24 meses	26,2 a	37,3 a	(42)	28,0 a	(7)
24 a 36 meses	19,2 b	40,0 a	(108)	34,3 a	(79)

Tabela 10 - Equações alométricas usadas para estimar a biomassa dos compartimentos aéreos (folhas, galhos vivo e mortos, casca e lenho), em função do DAP e altura, em resposta à fertilização com K e Na

Compartimentos	Idade	Tratamento	Modelo	Erro	
	meses				
Folhas	12	T	$Y = 0,178 + 137,393 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{4,248 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,628}$	
		K _{3,0}	$Y = 0,099 + 117,176 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{4,248 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,628}$	
		Na _{3,0}	$Y = 0,307 + 119,089 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{4,248 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,628}$	
	24	T	$Y = 41,859 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{5,334 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,794}$	
		K _{3,0} e Na _{3,0}	$Y = 27,964 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{5,334 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,794}$	
	36	T, K _{3,0} e Na _{3,0}	$Y = 13,934 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{1,354 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,617}$	
	Galhos vivos	12	T, K _{3,0} e Na _{3,0}	$Y = 0,908 + 126,506 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{0,732 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,099}$
		24	T	$Y = 63,518 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{7,173 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,066}$
			K _{3,0} e Na _{3,0}	$Y = 30,661 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{7,173 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,066}$
36	T, K _{3,0} e Na _{3,0}	$Y = 20,874 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{5,307 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,725}$		
Galhos mortos	24	T	$Y = 7,213 \text{ (DAP}^2\text{H)}^{0,606}$	$\varepsilon = \sqrt{0,576 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,225}$	
		K _{3,0}	$Y = 5,228 \text{ (DAP}^2\text{H)}^{0,606}$	$\varepsilon = \sqrt{0,576 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,225}$	
		Na _{3,0}	$Y = 6,470 \text{ (DAP}^2\text{H)}^{0,606}$	$\varepsilon = \sqrt{0,576 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,225}$	
	36	T	$Y = 19,830 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{1,47 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,155}$	
		K _{3,0}	$Y = 14,946 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{1,47 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,155}$	
		Na _{3,0}	$Y = 16,783 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{1,47 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,155}$	
Casca	12	T, K _{3,0} e Na _{3,0}	$Y = 8,034 \text{ (DAP}^2\text{H)}^{0,654}$	$\varepsilon = \sqrt{0,232 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,329}$	
	24	T	$Y = 16,487 \text{ (DAP}^2\text{H)}^{0,788}$	$\varepsilon = \sqrt{2,761 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{1,104}$	
		K _{3,0} e Na _{3,0}	$Y = 17,277 \text{ (DAP}^2\text{H)}^{0,877}$	$\varepsilon = \sqrt{2,761 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{1,104}$	
	36	T	$Y = 25,251 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{2,122 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,615}$	
K _{3,0}		$Y = 22,947 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{2,122 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,615}$		
Na _{3,0}		$Y = 23,496 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{2,122 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{0,615}$		
Lenho	12	T	$Y = 161,836 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{0,175 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{-0,008}$	
		K _{3,0}	$Y = 154,896 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{0,175 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{-0,008}$	
		Na _{3,0}	$Y = 146,383 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{0,175 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{-0,008}$	
	24	T	$Y = 0,211 + 124,284 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{10,092 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{1,26}$	
		K _{3,0}	$Y = 124,028 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{10,092 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{1,26}$	
		Na _{3,0}	$Y = -0,034 + 121,295 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{10,092 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{1,26}$	
	36	T e K _{3,0}	$Y = 127,885 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{10,922 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{1,239}$	
		Na _{3,0}	$Y = 0,919 + 122,718 \text{ DAP}^2\text{H}$	$\varepsilon = \sqrt{10,922 \text{ (DAP}^2\text{H)}}^{1,239}$	

4.6 Concentração e acúmulo de nutrientes na parte aérea

As concentrações de K e Na nos diversos compartimentos da planta foram influenciados pelos tratamentos (Tabela 11 e Tabela 12). As concentrações de K aumentaram na seguinte ordem: folha > casca > galho vivo > lenho > galho morto. O tratamento K_{3,0} apresentou concentração de K superiores aos dos tratamentos Testemunha e Na_{3,0}. As concentrações verificadas em Na_{3,0}, embora não tenham diferido significativamente ($P>0,05$) da Testemunha, foram um pouco inferiores, provavelmente devido ao efeito de diluição ocasionado pelo maior crescimento das árvores nesse tratamento. A concentração de Na mais elevada ocorreu em Na_{3,0}, seguido pela Testemunha e K_{3,0}. Diferentemente do que ocorreu com as concentrações de K, as concentrações de Na aumentaram na seguinte ordem: casca > galho vivo > folha > lenho aos 12 meses (primeiro ano). Aos 36 meses, houve alteração dessa ordem, passando o lenho a conter a maior concentração de Na.

As concentrações médias N, P, Ca e Mg não foram estatisticamente afetados ($P < 0,05$) pelos tratamentos e pela idade (Tabela 13). A folha foi o compartimento que apresentou as maiores concentrações de N, P e Mg, enquanto a casca foi o compartimento com as maiores concentrações de Ca. O lenho sempre apresentou as concentrações mais baixas de todos os nutrientes.

O tamanho da árvore foi outro fator que influenciou as concentrações de nutrientes, de modo diferente para cada compartimento. Na folha, esse efeito foi mais expressivo com tendência de diminuição das concentrações de nutrientes nas árvores de maior dimensão (Figura 24 e Figura 25). No entanto, aos 12 meses, a tendência foi inversa, mais especificamente no tratamento T, em que as árvores grandes apresentaram concentrações de K e Na maiores que os das árvores pequenas.

Tabela 11 - Concentração de K por compartimento da parte aérea de *Eucalyptus grandis*, aos 12, 24 e 36 meses pós plantio (média±dp e valores máximos e mínimos indicados para n=8 árvores) (letras diferentes indicam diferença entre os tratamentos por Tukey a 5%)

Idade Meses	Compartimento	Tratamento	Teor de K			
			média	± dp	Min	Max
			g kg ⁻¹ MS			
12	Casca	K _{3,0}	3,00	± 0,91 a	1,80	4,50
		Na _{3,0}	1,86	± 0,79 b	1,10	3,40
		T	1,61	± 0,30 b	1,10	2,10
	Folha	K _{3,0}	6,01	± 0,84 a	4,30	6,90
		Na _{3,0}	3,70	± 1,30 b	2,20	5,40
		T	3,65	± 0,65 b	2,50	4,80
	Galho vivo	K _{3,0}	2,93	± 1,46 a	0,90	4,90
		Na _{3,0}	0,68	± 0,35 b	0,20	1,30
		T	0,99	± 0,49 b	0,50	2,00
	Lenho	K _{3,0}	2,08	± 0,30 a	1,70	2,50
		Na _{3,0}	1,15	± 0,43 b	0,70	2,10
		T	1,39	± 0,43 b	0,70	1,90
24	Casca	K _{3,0}	2,26	± 0,38 a	1,90	3,00
		Na _{3,0}	1,30	± 0,28 b	0,90	1,80
		T	1,51	± 0,40 b	0,90	2,05
	Folha	K _{3,0}	5,39	± 0,70 a	4,70	6,80
		Na _{3,0}	3,70	± 0,61 b	3,10	4,50
		T	3,83	± 0,29 b	3,20	4,20
	Galho morto	K _{3,0}	0,10		0,10	0,10
	Galho vivo	K _{3,0}	1,40	± 0,31 a	1,00	1,90
		Na _{3,0}	0,49	± 0,12 b	0,30	0,70
		T	0,76	± 0,38 b	0,40	1,50
	Lenho	K _{3,0}	1,04	± 0,15 a	0,73	1,25
		Na _{3,0}	0,42	± 0,16 c	0,18	0,65
T		0,72	± 0,25 b	0,38	1,15	
36	Casca	K _{3,0}	1,93	± 0,29 a	1,60	2,30
		Na _{3,0}	1,05	± 0,12 c	0,80	1,20
		T	1,39	± 0,34 b	1,00	2,00
	Folha	K _{3,0}	5,70	± 1,66 a	4,44	9,70
		Na _{3,0}	4,31	± 0,39 b	3,86	5,10
		T	4,39	± 0,37 b	3,80	4,80
	Galho morto	K _{3,0}	0,15		0,15	0,15
		Na _{3,0}	0,20		0,20	0,20
		T	0,15		0,15	0,15
	Galho vivo	K _{3,0}	1,19	± 0,45 a	0,60	1,90
		Na _{3,0}	1,00	± 0,43 ab	0,50	1,80
		T	0,61	± 0,15 b	0,30	0,80
Lenho	K _{3,0}	0,69	± 0,10 a	0,50	0,80	
	Na _{3,0}	0,39	± 0,07 b	0,30	0,50	
	T	0,63	± 0,16 a	0,40	0,90	

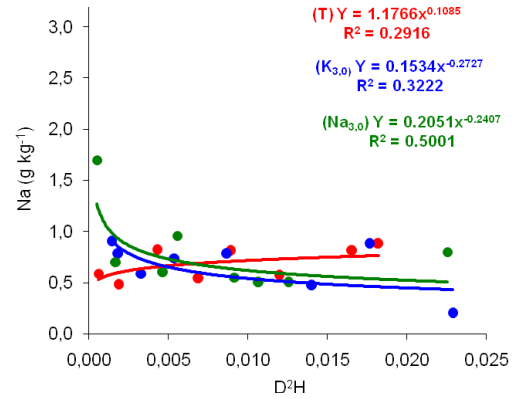
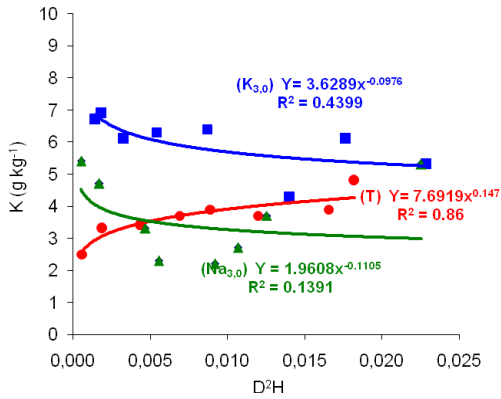
Tabela 12 – Concentração de Na nos compartimentos da parte aérea de *Eucalyptus grandis*, aos 12, 24 e 36 meses pós plantio (média±dp e valores máximos e mínimos indicados para n=8 árvores)

Idade Meses	Compartimento	Tratamento	Na			
			Média	+ Dp	Min	Max
			g kg ⁻¹ MS			
12	Casca	K _{3,0}	0,509 ± 0,189	b	0,310	0,910
		Na _{3,0}	1,181 ± 0,497	a	0,600	1,850
		T	0,583 ± 0,153	b	0,350	0,860
	Folha	K _{3,0}	0,668 ± 0,237	a	0,200	0,900
		Na _{3,0}	0,789 ± 0,401	a	0,500	1,700
		T	0,688 ± 0,157	a	0,480	0,880
	Galho vivo	K _{3,0}	0,488 ± 0,209	b	0,250	0,890
		Na _{3,0}	0,850 ± 0,171	a	0,650	1,150
		T	0,631 ± 0,241	ab	0,130	0,970
	Lenho	K _{3,0}	0,235 ± 0,088	b	0,135	0,380
		Na _{3,0}	0,771 ± 0,238	a	0,425	0,975
		T	0,385 ± 0,111	b	0,200	0,525
24	Casca	K _{3,0}	0,405 ± 0,173	b	0,180	0,740
		Na _{3,0}	1,775 ± 0,789	a	0,850	2,900
		T	0,675 ± 0,281	b	0,280	1,150
	Folha	K _{3,0}	0,488 ± 0,196	b	0,330	0,910
		Na _{3,0}	1,310 ± 0,603	a	0,760	2,350
		T	0,683 ± 0,203	b	0,390	0,870
	Galho morto	K _{3,0}	0,080			
		Na _{3,0}	0,210			
		T	0,040			
	Galho vivo	K _{3,0}	0,309 ± 0,161	b	0,150	0,670
		Na _{3,0}	0,885 ± 0,373	a	0,580	1,750
		T	0,416 ± 0,188	b	0,180	0,780
Lenho	K _{3,0}	0,224 ± 0,067	c	0,140	0,325	
	Na _{3,0}	0,897 ± 0,123	a	0,725	1,050	
	T	0,449 ± 0,124	b	0,325	0,725	
36	Casca	K _{3,0}	0,519 ± 0,113		0,370	0,700
		Na _{3,0}	0,788 ± 0,316		0,400	1,350
		T	0,684 ± 0,162		0,440	0,960
	Folha	K _{3,0}	0,510 ± 0,110	a	0,349	0,700
		Na _{3,0}	0,976 ± 0,902	a	0,531	3,200
		T	0,453 ± 0,191	a	0,292	0,890
	Galho morto	K _{3,0}	0,040			
		Na _{3,0}	0,020			
		T	0,030			
	Galho vivo	K _{3,0}	0,253 ± 0,164	ab	0,040	0,460
		Na _{3,0}	0,670 ± 0,234	a	0,250	1,000
		T	0,147 ± 0,143	b	0,020	0,390
Lenho	K _{3,0}	0,391 ± 0,095	c	0,280	0,560	
	Na _{3,0}	1,120 ± 0,247	a	0,750	1,500	
	T	0,609 ± 0,100	b	0,420	0,780	

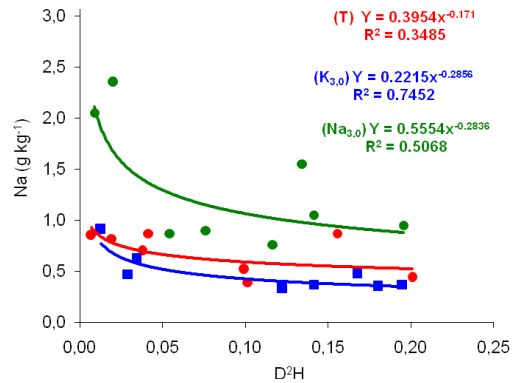
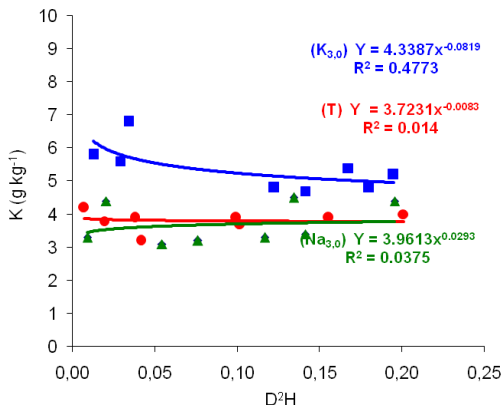
Tabela 13 - Concentração média de N, P, Ca e Mg nos compartimentos da parte aérea de *Eucalyptus grandis*, aos 12, 24 e 36 meses pós plantio. (média±dp e valores máximos e mínimos indicados para n=8 árvores)

Idade mês	Casca	g kg ⁻¹ MS			
		N	P	Ca	Mg
12	Casca	4,3 ± 0,8	0,46 ± 0,43	7,89 ± 1,75	2,33 ± 0,47
	Folha	23,9 ± 3,2	1,28 ± 0,22	6,25 ± 0,92	2,91 ± 0,39
	Galho vivo	4,7 ± 1,6	0,23 ± 0,16	3,59 ± 1,07	0,84 ± 0,24
	Lenho	2,9 ± 0,7	0,29 ± 0,12	0,62 ± 0,15	0,29 ± 0,07
24	Casca	3,3 ± 0,2	0,30 ± 0,09	8,59 ± 1,35	2,13 ± 0,37
	Folha	20,2 ± 2,6	1,20 ± 0,24	5,16 ± 1,30	2,52 ± 0,56
	Galho morto	2,3 ± 0,4	0,06 ± 0,01	3,91 ± 0,14	0,73 ± 0,14
	Galho vivo	2,9 ± 0,5	0,14 ± 0,06	2,71 ± 0,75	0,76 ± 0,18
	Lenho	1,3 ± 0,2	0,12 ± 0,03	0,46 ± 0,08	0,17 ± 0,03
36	Casca	3,2 ± 0,4	0,17 ± 0,04	7,71 ± 1,84	1,97 ± 0,34
	Folha	23,5 ± 2,6	1,24 ± 0,18	5,10 ± 0,75	2,96 ± 0,46
	Galho morto	2,1 ± 0,2	0 ± 0	2,61 ± 0,60	0,51 ± 0,03
	Galho vivo	3,2 ± 0,9	0,18 ± 0,12	2,68 ± 0,73	0,76 ± 0,19
	Lenho	1,4 ± 0,2	0,10 ± 0,02	0,49 ± 0,16	0,14 ± 0,03

12 meses



24 meses



36 meses

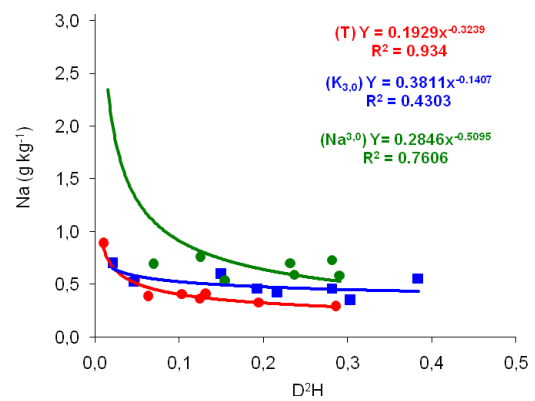
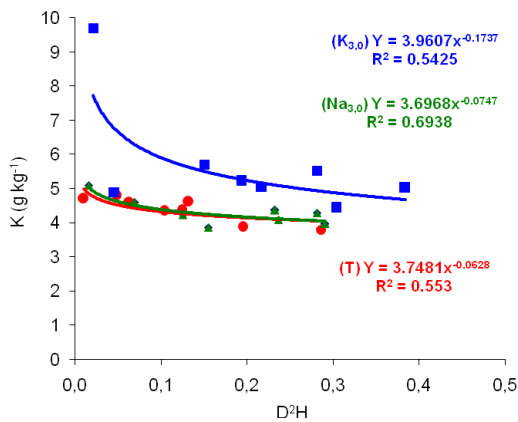


Figura 24 - Concentração média de K e Na nas folhas em função do diâmetro à altura do peito (D) e da altura da árvore (H) em resposta à fertilização potássica e sódica aos 12, 24 e 36 meses pós-plantio. Testemunha (●), $K_{3,0}$ (■), $Na_{3,0}$ (▲)

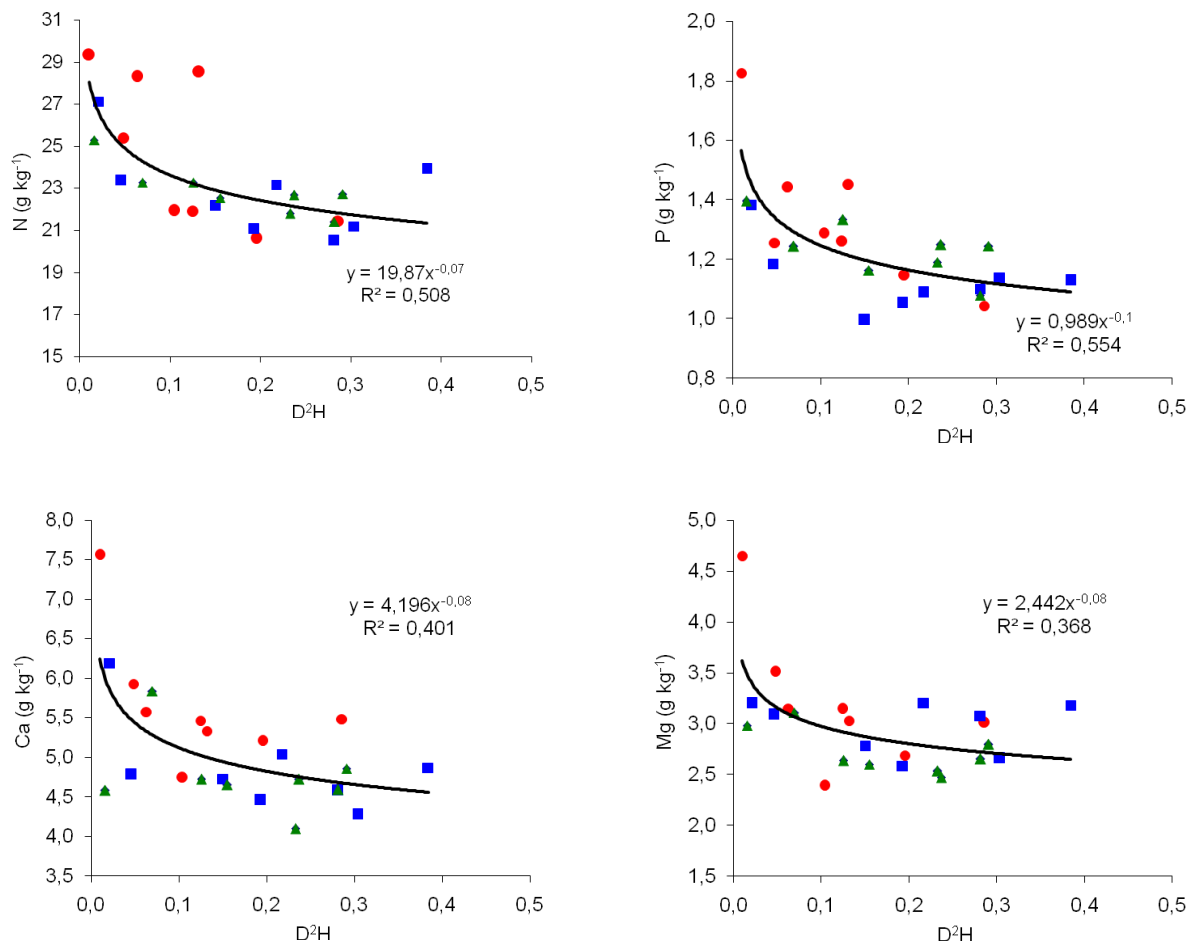


Figura 25 – Concentração média de N, P, Ca e Mg nas folhas de *Eucalyptus grandis* em função do DAP e altura da árvore aos 36 meses pós-plantio. Testemunha (●), $\text{K}_{3,0}$ (■), $\text{Na}_{3,0}$ (▲)

Os conteúdos de K, Na, N, P, Ca e Mg foram influenciadas pelos tratamentos (Figura 26). Os acúmulos de K verificados aos 36 meses pós-plantio em $\text{K}_{3,0}$, $\text{Na}_{3,0}$ e Testemunha foram de 82, 38 e 31 kg ha^{-1} , respectivamente. Do total de K acumulado por $\text{K}_{3,0}$ 91% ocorreu nos dois primeiros anos. Nos demais tratamentos, o acúmulo foi de 10 $\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

A distribuição do K entre os compartimentos foi pouco afetada pelos tratamentos (Figura 27). No primeiro ano, cerca de 50% do K absorvido concentrou-se nas folhas, mas aos dois anos quase 70% do K acumulou-se no tronco (lenho e casca).

A quantidade de Na acumulada em $\text{Na}_{3,0}$ nos primeiros 12 meses foi pequena, cerca de 6 kg ha^{-1} , quando comparada ao total acumulado aos 36 meses, 51 kg ha^{-1} de Na (Figura 28).

O acúmulo de Na em T e K_{3,0} foi bem menor, equivalente a apenas 33 e 54 %, respectivamente, daquele encontrado em Na_{3,0}. Nos primeiros 12 meses, a maior parte do Na foi encontrada nos galhos, independentemente do tratamento aplicado. Com o desenvolvimento das árvores, o lenho passou a ser o compartimento com o maior acúmulo de Na, contendo mais que 75% do total absorvido até os 36 meses. Esse resultado contrasta com o observado para o K, que preferencialmente acumulou-se nas folhas.

O N foi o nutriente encontrado em maior quantidade nas árvores. O acúmulo de N foi fortemente influenciado pelos tratamentos. Após 36 meses o tratamento K_{3,0} acumulou maior quantidade de N (245 kg ha⁻¹) que os tratamentos Na_{3,0} e T (160 e 124 kg ha⁻¹, respectivamente). Desses totais, 75% acumularam-se nos primeiros 24 meses pós-plantio. A quantidade absorvida foi bem maior, em virtude de as folhas conterem quase 50% do total de N acumulado e uma quantidade significativa de N retornou ao solo sob a forma de serapilheira após os 12 meses (Figura 26 e Figura 29).

A quantidade de P também recebeu forte influência dos tratamentos. Os tratamentos K_{3,0} e Na_{3,0} acumularam 12 e 9 kg ha⁻¹ de P, respectivamente, 2,6 e 2,0 vezes maior que o observado na Testemunha (5 kg ha⁻¹) aos 36 meses pós-plantio. A maior parte do P acumulou-se nas folhas, cerca de 40% do total, quantidade equivalente à encontrada no tronco (lenho + casca) (Figura 26 e Figura 29). O tratamento K_{3,0} foi o que proporcionou o maior acúmulo de Ca, cerca de 125 kg ha⁻¹ de Ca. No tratamento Testemunha e Na_{3,0} foram encontradas quantidades menores, 82 e 95 kg ha⁻¹, respectivamente. Embora as cascas e os galhos (vivos e mortos) representem uma porção pequena da biomassa total, nesses compartimentos foram encontrados os maiores acúmulos de Ca (Figura 26 e Figura 29).

Os acúmulos de Mg nos tratamentos obedeceram a seguinte ordem: K_{3,0} > Na_{3,0} > Testemunha, 48, 32 e 24 kg ha⁻¹, respectivamente. Mais de 70% desse montante foi absorvido nos dois primeiros anos pós-plantio. As folhas e as cascas foram os compartimentos que, proporcionalmente, mais acumularam o Mg (Figura 26 e Figura 29).

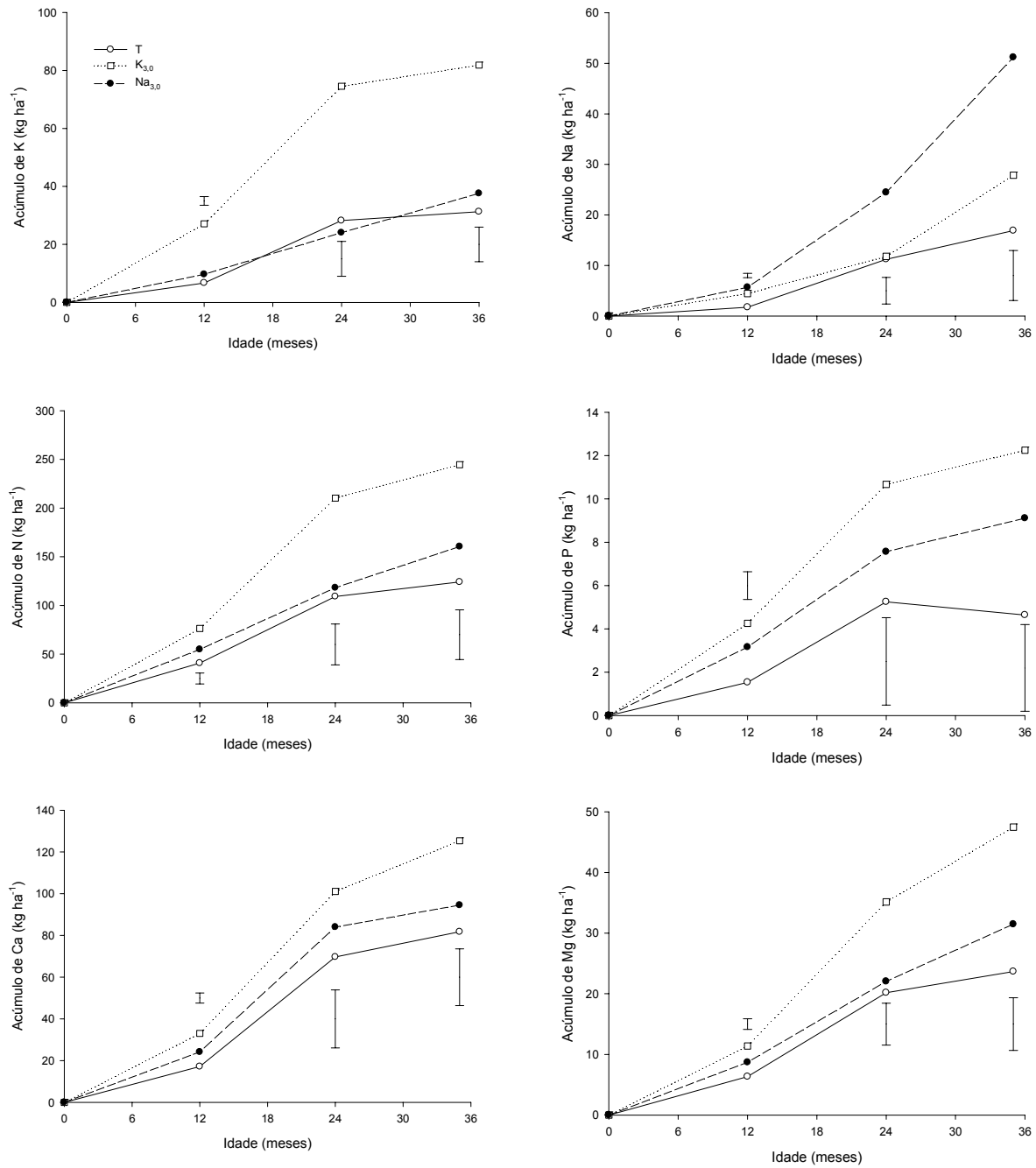


Figura 26 - Acúmulo de K, Na, N, P, Ca e Mg na biomassa da parte aérea de *Eucalyptus grandis*, em resposta à fertilização potássica e sódica. As barras representam a diferença mínima significativa (5%)

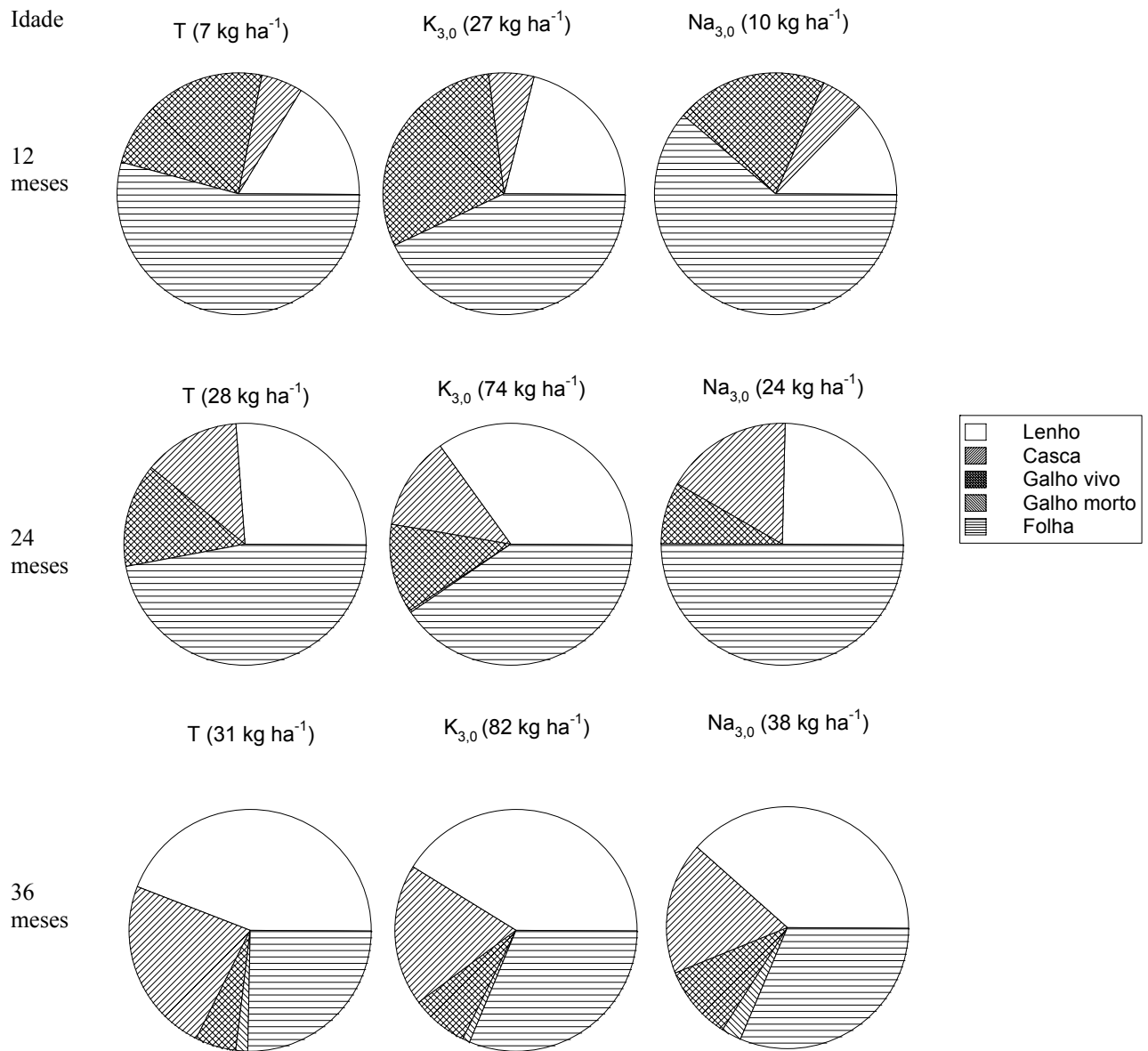


Figura 27 – Conteúdo e distribuição de K nos compartimentos da parte aérea de *E. grandis* em resposta à fertilização potássica e sódica nos três anos pós-plantio

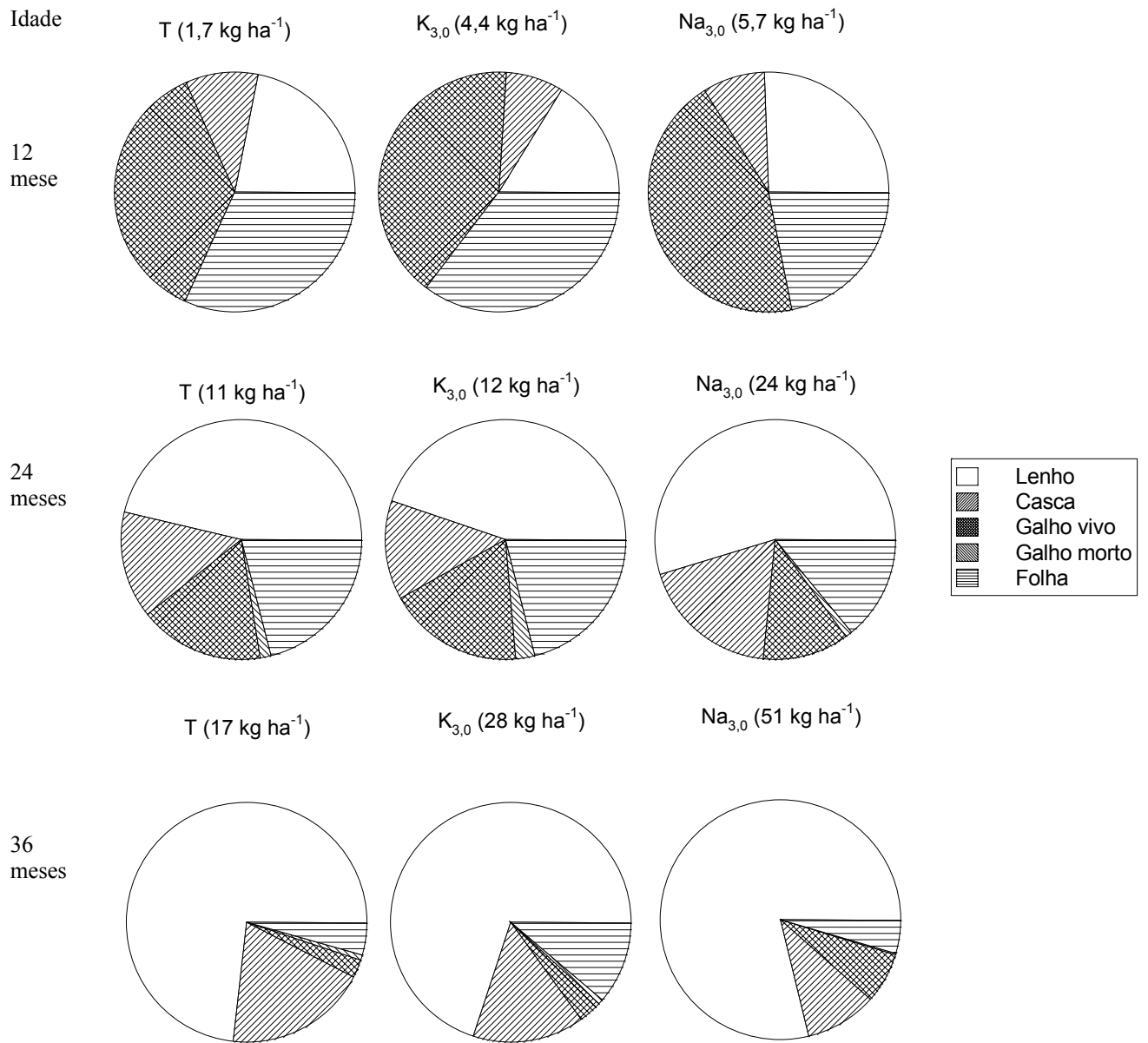


Figura 28 – Conteúdo e distribuição de Na nos compartimentos da parte aérea de *E. grandis* em resposta à fertilização potássica e sódica nos três anos pós-plantio

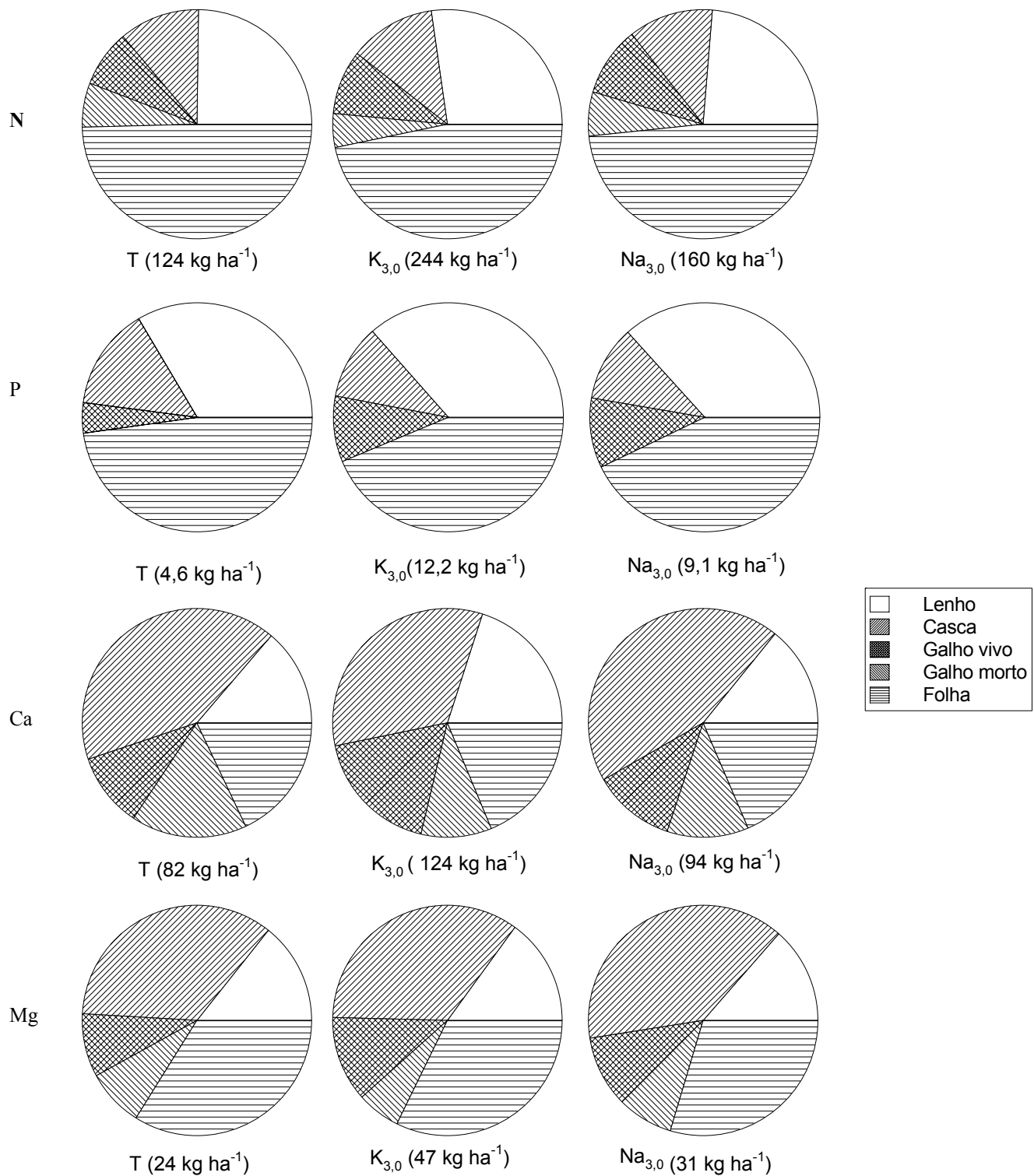


Figura 29 - Conteúdo e distribuição de N, P, Ca e Mg nos compartimentos da parte aérea de *E. grandis* em resposta à fertilização potássica e sódica no terceiro ano pós-plantio

4.7 Ciclagem de nutrientes via serapilheira

A biomassa de serapilheira sobre o solo, estimada na época da implantação do experimento (maio/04), era de aproximadamente de 24,3 Mg ha⁻¹. Essa quantidade elevada inicialmente se deve à manutenção dos resíduos do corte raso do povoamento de *Eucalyptus saligna* realizado três meses antes. Após dezoito meses (dez/05), cerca de 50% da serapilheira havia sido decomposta reduzindo-se para 12,2 Mg ha⁻¹, quantidade equivalente à encontrada aos 30 meses (dez/06), ou seja, 12,1 Mg ha⁻¹. Aos 42 meses (dez/07) a biomassa de serapilheira foi de 9,6 Mg ha⁻¹, 20% menor do que na avaliação anterior (Tabela 14). As quantidades de serapilheira acumuladas sobre o solo, nos três tratamentos estudados, foram equivalentes ($P > 0,05$) nos três anos de avaliação (Figura 30).

A senescência das folhas se iniciou oito meses pós-plantio (dez/04). A quantidade de folheto coletado entre oito e 18 meses (dez/05) pós-plantio foi de 3 Mg ha⁻¹, independentemente do tratamento (Figura 31 e Tabela 14). Posteriormente, entre 18 e 30 meses (dez/06), houve aumento considerável, tendo sido coletados 5,0, 5,6 e 6,2 Mg ha⁻¹ de folheto, respectivamente, nos tratamentos Testemunha, K_{3,0} e Na_{3,0}. Entre 30 e 42 meses (dez/07), a biomassa de folheto foi em média de 5,3 Mg ha⁻¹, independentemente do tratamento.

O conteúdo de nutrientes na serapilheira sobre o solo estimada aos 18 meses foi maior do que nas avaliações posteriores (Figura 32). As quantidades mais elevadas de K, Na, N, Ca e Mg são reflexo do parcelamento dos fertilizantes e da aplicação do calcário à lanço. Além disso, a deposição de folheto com grandes diferenças de concentração de K e Na entre os tratamentos K_{3,0} e Na_{3,0}, nos dois primeiros anos pós-plantio, contribuiu para diferenças importantes nos conteúdos de K e Na. Esses efeitos podem ser percebidos comparando-se o conteúdo de K no tratamento K_{3,0} (21,0 kg ha⁻¹) com as do tratamento Na_{3,0} (11,6 kg ha⁻¹) e da Testemunha (12,3 kg ha⁻¹). Do mesmo modo, o conteúdo de Na no tratamento Na_{3,0} (12,1 kg ha⁻¹) foi superior ao encontrado nos tratamentos Testemunha (6,0 kg ha⁻¹) e K_{3,0} (6,3 kg ha⁻¹). Nas avaliações realizadas aos 30 e 42 meses, o conteúdo de K e Na foi de no máximo 4,2 e 5,8 kg ha⁻¹, respectivamente.

Tabela 14 - Biomassa de serapilheira sobre o solo, deposição de folheto e taxa de decomposição em povoamento de *Eucalyptus grandis* por 3 anos consecutivos. Os valores apresentados correspondem à média \pm ep (n=3 para os tratamento e n=9 para média geral)

Idade	Tratamento	Serapilheira	Folheto	Taxa de decomposição
Mês		Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	%
0-18 (dez/05)	T	12,6 \pm 0,4	2,7 \pm 0,2	53
	K _{3,0}	12,0 \pm 0,9	3,0 \pm 0,5	54
	Na _{3,0}	12,2 \pm 1,4	3,2 \pm 0,3	53
	Média	12,2 \pm 0,5	3,0 \pm 0,2	53 \pm 2
18-30 (dez/06)	T	11,7 \pm 0,7	5,0 \pm 0,1	32
	K _{3,0}	12,2 \pm 0,8	5,6 \pm 0,1	31
	Na _{3,0}	12,4 \pm 1,3	6,2 \pm 0,4	30
	Média	12,1 \pm 0,5	5,6 \pm 0,2	31 \pm 4
30-42 (dez/07)	T	9,4 \pm 1,3	5,0 \pm 0,2	45
	K _{3,0}	8,6 \pm 0,9	5,4 \pm 0,1	52
	Na _{3,0}	10,9 \pm 2,0	5,3 \pm 0,2	40
	Média	9,6 \pm 0,7	5,3 \pm 0,1	45 \pm 4

O conteúdo de N variou de 74 a 161 kg ha⁻¹ e a de P entre 1,4 e 5,0 kg ha⁻¹. Os menores conteúdos de N e P sempre foram detectadas no tratamento K_{3,0}, efeito que possivelmente foi decorrente da maior assimilação desses nutrientes pelas árvores fertilizadas com K, bem como produto de uma interação mais eficiente do sistema radicular com a serapilheira, conforme demonstraram Laclau et al. (2003). Em relação aos conteúdos de Ca e Mg na serapilheira, não foram observadas diferenças entre os tratamentos, porém houve decréscimo de 50% do conteúdo de Ca (100 para 50 kg ha⁻¹) e de 65 % na de Mg (35 para 12 kg ha⁻¹) entre 18 e 42 meses. Os galhos e cascas depositados na superfície do solo durante o corte raso, com teores altos em Ca e Mg, e a decomposição mais lenta que as folhas também podem ter contribuído para a diminuição gradativa do conteúdo destes nutrientes na serapilheira durante os três primeiros anos pós-plantio. Os resultados obtidos em Itatinga foram semelhantes aos encontrados povoamentos de *E. grandis* em Anhembi (SP) por Shumacher et al. (1994) e no norte fluminense por Zaia; Gama-Rodrigues (2004).

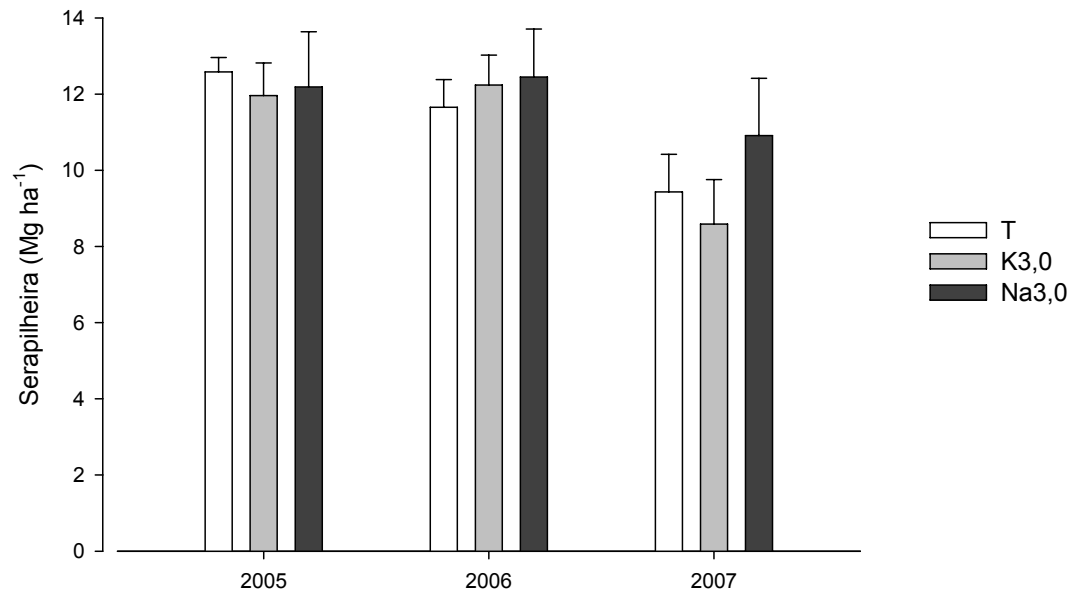


Figura 30 – Biomassa de serapilheira sobre o solo em função da fertilização potássica e sódica em 3 anos consecutivos. Datas das amostragens 21/12/2005, 19/12/2006 e 19/12/2007. As barras indicam o erro padrão

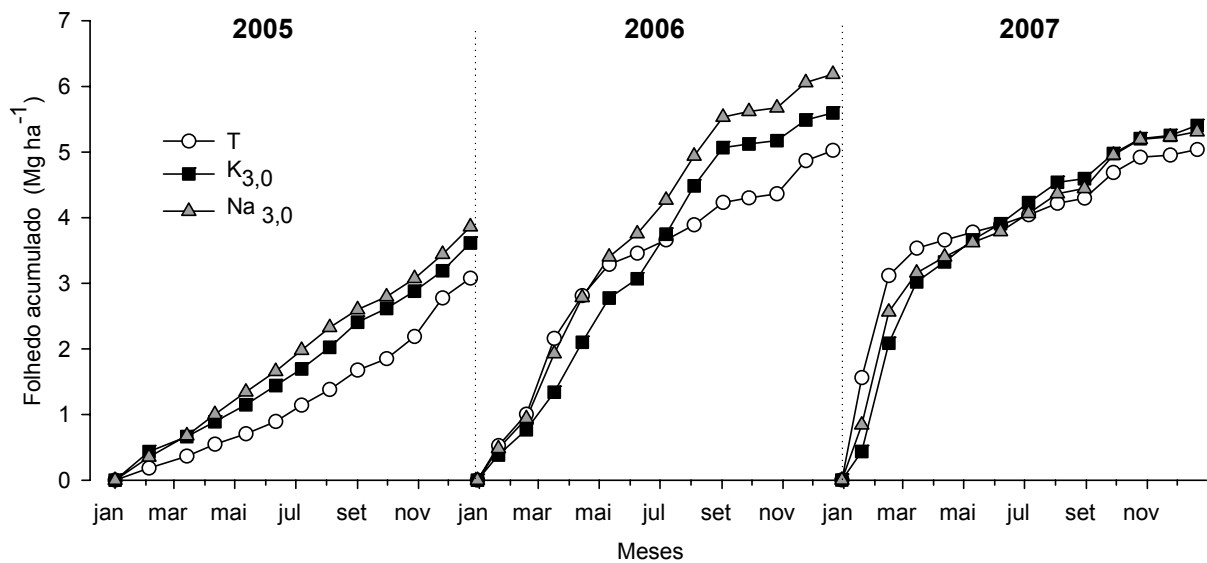


Figura 31 – Biomassa de folheto de *Eucalyptus grandis* acumulado anualmente durante 3 anos consecutivos

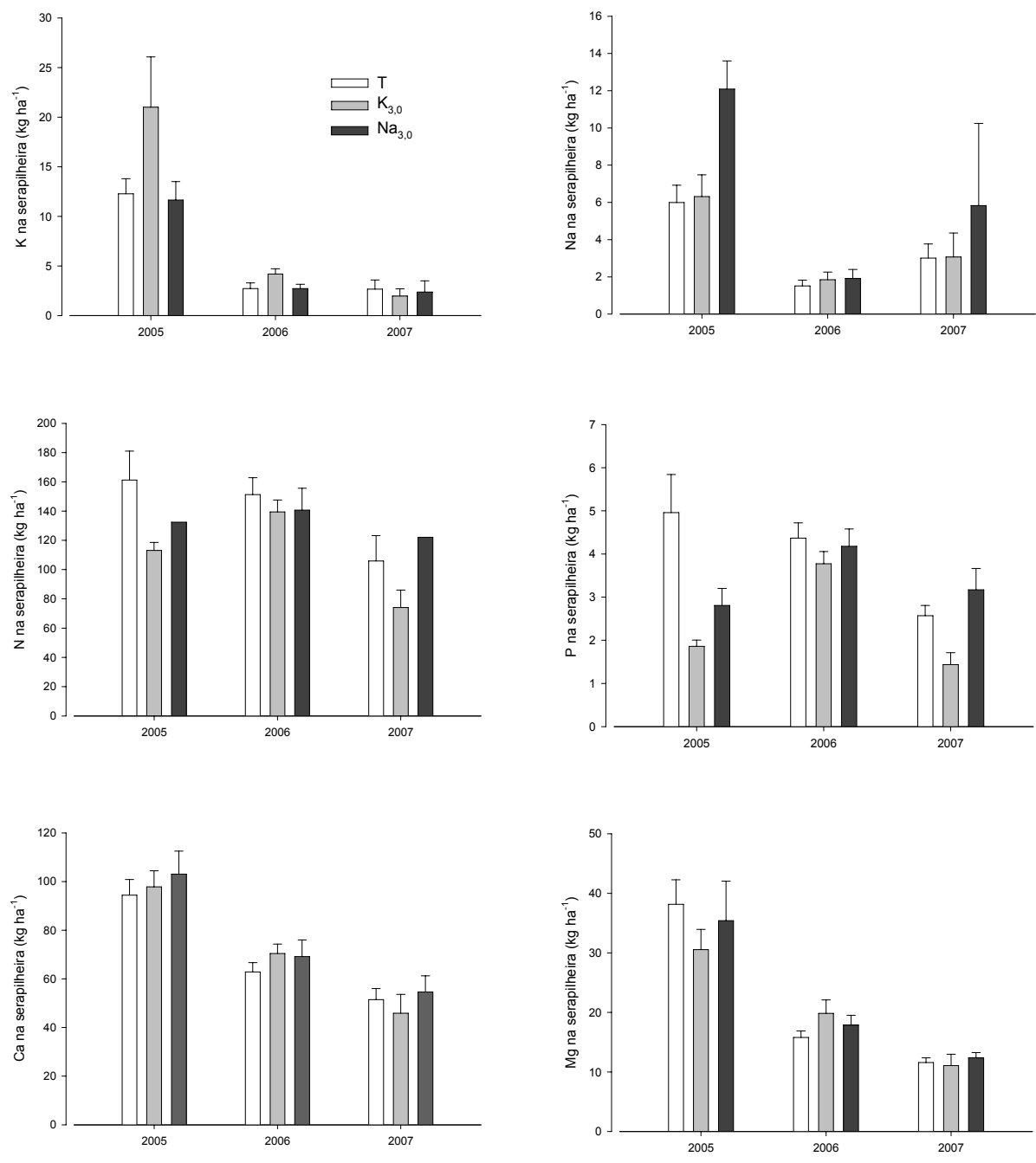


Figura 32 – Nutrientes acumulados na serapilheira de *Eucalyptus grandis* em função da fertilização potássica e sódica ao final do mês de dezembro após três anos consecutivos de avaliações. As barras indicam o erro padrão

As quantidades de K depositadas sobre o solo como folheto foram maiores no tratamento $K_{3,0}$, atingindo 14,9, 22,2 e 13,1 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, respectivamente, aos 18, 30 e 42 meses pós-plantio (Tabela 15). Nos tratamentos Testemunha e $Na_{3,0}$, as quantidades de K não ultrapassaram 8,8, 14,3 e 11,9 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, valores que correspondem a 58, 64 e 90% dos encontrados no tratamento $K_{3,0}$, respectivamente, nos três anos consecutivos. Independentemente do tratamento, as taxas de ciclagem do K foram altas ($> 80\%$). Especificamente no tratamento $K_{3,0}$, do total de K presente na serapilheira e no folheto, cerca de 39 e 15 kg ha^{-1} foram assimilados pela floresta até os 30 e 42 meses, respectivamente. Do mesmo modo que nos tratamentos não fertilizados com K, foram assimilados em média 20 e 11 kg ha^{-1} a cada ano (Tabela 15).

A deposição de Na sobre o solo na forma de folheto foi maior no tratamento $Na_{3,0}$ nos três anos de avaliações, em que foram encontrados 4,3, 3,9 e 1,8 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, respectivamente. Nos tratamentos Testemunha e $K_{3,0}$, a deposição de Na equivaleu quase sempre à metade daquela verificada no tratamento $Na_{3,0}$ (Tabela 15). No que se refere à ciclagem do Na, no ano de 2006, o conteúdo de Na incorporado às árvores dos tratamentos Testemunha, $K_{3,0}$ e $Na_{3,0}$ foi de 5,7, 6,5 e 14,1 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, respectivamente. Esses valores correspondem a taxas elevadas de ciclagem, variando de 78 a 88%. Contudo, no ano seguinte foram encontrados valores negativos de até -2,1 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ demonstrando ter havido assimilação do Na. O acúmulo de Na no tronco, na serapilheira, a diminuição da concentração de Na nas folhas ou mesmo a sua transferência para o solo podem ser as causas para essa redução.

As deposições de N variaram de 39 a 67 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, as de P entre 1,5 e 2,4 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, as de Ca entre 21 e 40 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ e as de Mg entre 8,3 a 15,3 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ (Tabela 15). A quantidade de N transferida da serapilheira para outros componentes do ecossistema (árvores, microrganismos, solo) entre 18 e 30 meses variou de 19,7 a 73 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, sendo que as taxas de ciclagem variaram de 13 e 33 %. Entre 30 e 42 meses, houve aumento na ciclagem e as quantidades de N estiveram entre 76 a 117 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ com taxas de ciclagem também mais elevadas, entre 38 a 61%. A ciclagem de P entre 18 e 30 meses não apresentou tendência consistente, pois as quantidades de P transferidas da serapilheira nos tratamentos Testemunha e $Na_{3,0}$ foram de 0,83 e 2,9 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$, respectivamente. Por outro lado, no tratamento $K_{3,0}$, o valor foi negativo: -0,71 $\text{kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$. Embora as quantidades tenham variado menos entre 30 e

42 meses, de 3 a 4,2 kg ha⁻¹ ano⁻¹, também não se observou tendência em relação às taxas de ciclagem de P que variaram de 49 a 73%.

Tabela 15 – Conteúdo de nutrientes na serapilheira e no folheto depositado anualmente sobre o solo e ciclagem de nutrientes em função da fertilização potássica e sódica por 3 anos consecutivos. Os valores entre parênteses corresponde à taxa de ciclagem

Tratamentos	Conteúdo na serapilheira			Conteúdo no folheto			Ciclagem de nutrientes	
	2005	2006	2007	2005	2006	2007	2006	2007
	kg ha ⁻¹			kg ha ⁻¹ ano ⁻¹			kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ (%)	
	K			K			K	
T	12,3	2,7	2,7	7,1	9,4	10,6	19,0 (88)	10,6 (80)
K _{3,0}	21	4,2	2	14,9	22,2	13,1	39,0 (90)	15,3(88)
Na _{3,0}	11,6	2,7	2,4	8,7	14,3	11,9	23,2 (90)	12,2(84)
	Na			Na			Na	
T	5,9	1,5	3	1,4	1,3	0,8	5,7 (79)	-0,7(-30)
K _{3,0}	6,3	1,8	3	2	2	1,1	6,5 (78)	-0,1 (-3)
Na _{3,0}	12,1	1,9	5,8	4,3	3,9	1,8	14,1 (88)	-2,1 (-57)
	N			N			N	
T	161	151	106	40,7	63,7	66,6	73,7 (33)	111,6 (51)
K _{3,0}	113	139	74	38,8	45,7	52,7	19,7 (13)	117,7 (61)
Na _{3,0}	132	141	122	45,9	64,6	57,2	55,6 (28)	76,2 (38)
	P			P			P	
T	4,96	4,37	2,57	1,4	2,3	2,4	2,89 (40)	4,2 (62)
K _{3,0}	1,86	3,77	1,44	1,1	1,2	1,6	-0,71 (-23)	3,93 (73)
Na _{3,0}	2,81	4,18	3,17	1,5	2,2	2	0,83 (16)	3,01 (49)
	Ca			Ca			Ca	
T	94,4	62,8	51,5	21,1	32,5	29	64,1 (51)	40,3 (44)
K _{3,0}	97,8	70,4	45,8	25,1	34,8	29,9	62,2 (47)	54,5 (54)
Na _{3,0}	103,1	69,2	54,6	28,9	40,3	30,7	74,2 (52)	45,3 (45)
	Mg			Mg			Mg	
T	38,2	15,8	11,6	8,3	12,9	12	35,3 (69)	16,2 (58)
K _{3,0}	30,5	19,8	11,1	8,8	14,3	12,3	25,0 (56)	21,0 (65)
Na _{3,0}	35,4	17,9	12,4	9,6	15,3	11,9	32,8 (65)	17,4 (58)

As quantidades de Ca e Mg, bem como as taxas de ciclagem desses nutrientes diminuíram da primeira para a segunda avaliação. Contudo, não foram detectadas variações expressivas em razão da fertilização diferenciada. A quantidade média de Ca ciclada anualmente variou entre 74 e 40 kg ha⁻¹ ano⁻¹, assim como as taxas de ciclagem entre 44 a 54% (Tabela 15). A quantidade média de Mg ciclada anualmente variou de 25 a 35 kg ha⁻¹ ano⁻¹ em 2006, passando para 16 a 25 kg ha⁻¹ ano⁻¹ em 2007. As taxas de ciclagem de modo geral variaram pouco apresentando valores 56 e 69% (Tabela 15).

Comparando-se as concentrações médias de nutrientes entre folhas decíduas (folhedo) e folhas vivas (diagnose nutricional) (Tabela 16), o Ca acumulou-se nas folhas decíduas, enquanto o N, P e K foram intensamente redistribuídos para as folhas jovens. As concentrações de Mg e Na praticamente não variaram entre os dois tipos de folhas, o que explica as taxas de retranslocação mais baixas desses nutrientes. Essa tendência evidencia que a ciclagem bioquímica do Na (27%) é menor do que a do K (81%), fato que até certo ponto é surpreendente, pois se supunha que a retranslocação do Na fosse mais acentuada em função da semelhança química entre os dois elementos. Esse resultado pode indicar uma restrição à movimentação do Na via floema (ciclagem bioquímica) ou mesmo ser consequência da lixiviação do Na das folhas pela água da chuva vindo a compor o estoque de nutrientes da serapilheira e do solo (ciclagem biogeoquímica).

As taxas médias de retranslocação (Tabela 17) estimadas por meio das fórmulas 2 e 3 obedecem à mesma ordem, $K > P > N > Na \geq Mg$. Contudo, houve pequenas alterações na ordem de grandeza para as retranslocações do K, P e N entre as duas fórmulas, enquanto para o Mg, a retranslocação que era de 20% diminuiu para 9%, se estimada pela fórmula 3. Do mesmo modo, a retranslocação do Na passou de 27% para 10%. Há que se considerar nesse caso que a fertilização potássica pode ter restringido a redistribuição do Na, pois o valor nulo indica não ter ocorrido movimentação do Na das folhas decíduas para as jovens. Os resultados encontrados são semelhantes aos apresentados por Gonçalves et al. (2000).

Tabela 16 - Concentração média de nutrientes em folhas jovens (FJ) e no folheto (folhas decíduas - FD) de *Eucalyptus grandis* em função da fertilização potássica e sódica. Os valores correspondem à média de 7 coletas (em jan/05, maio/05, nov/05, jan/06, maio/06, nov/06 e maio/07) em 3 blocos (n=21)

Nutrientes	Concentração média							
	— T —		— K _{3,0} —		— Na _{3,0} —		Geral	
	FD	FJ	FD	FJ	FD	FJ	FD	FJ
	g kg ⁻¹							
K	0,7	3,5	1,3	5,0	0,8	3,6	0,9	4,0
Na	0,35	0,44	0,44	0,43	0,92	0,82	0,57	0,56
N	12,0	22,2	8,7	21,3	10,4	22,7	10,4	22,1
P	0,42	1,10	0,24	0,99	0,33	1,05	0,33	1,05
Ca	6,1	5,4	6,3	5,1	6,8	5,3	6,4	5,2
Mg	2,6	2,8	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,6

Tabela 17 - Taxas de retranslocação de nutrientes do folheto para folhas jovens completamente expandidas. Os valores correspondem às concentrações médias de 7 coletas (em jan/05, maio/05, nov/05, jan/06, maio/06, nov/06 e maio/07) em 3 blocos (n=21)

Nutriente	Taxa de retranslocação ¹				Taxa de retranslocação ²			
	T	K _{3,0}	Na _{3,0}	Média	T	K _{3,0}	Na _{3,0}	Média
	%				%			
K	82	79	83	81	78	76	79	78±2,9
Na	35	22	28	27	16	0	12	10±16,0
N	52	67	65	62	50	62	57	57±2,1
P	66	81	76	74	64	78	70	71±2,2
Ca	0	0	0	0	-9	-15	-21	-15±6,7
Mg	17	20	24	20	12	8	8	9±3,4

$${}^1 TR_j(\%) = \left[1 - \left(\frac{Cf_{s_j}}{Cf_{s_{Ca}}} \div \frac{Cf_{v_j}}{Cf_{v_{Ca}}} \right) \right] \times 100, \quad {}^2 TRf_j = \frac{(DF \times 1,09 \times Cf_{v_j}) - (DF \times Cf_{s_j})}{(DF \times 1,09 \times Cf_{v_j})}$$

onde: TRj=retranslocação do elemento j; Cf_{s_j}=concentração em folhas senescentes; Cf_{s_{Ca}}=concentração de cálcio em folhas senescentes; Cf_{v_j}=concentração em folhas vivas; Cf_{v_{Ca}}=concentração de cálcio em folhas vivas, DF=deposição de folheto e o fator 1,09 foi introduzido para corrigir a diminuição de massa foliar durante a senescência

4.8 Eficiência de uso de nutrientes

O crescimento das árvores e a intensificação da ciclagem bioquímica e biogeoquímica, de modo geral, propiciaram aumento da EU de nutrientes com a idade, exceto para a EUNa que não apresentou variação consistente ao longo tempo (Tabela 18). As avaliações realizadas aos 12, 24 e 36 meses evidenciaram que o tratamento que possibilitou as maiores EUK foi o Na_{3,0} (643, 1070 e 1356 kg kg⁻¹) enquanto que as menores EUK ocorreram no K_{3,0} (322, 508 e 829 kg kg⁻¹), ficando a Testemunha (672, 762 e 1042 kg kg⁻¹) em posição intermediária. Esses resultados apontam para a tendência de diminuição da EU de um recurso, com o aumento da disponibilidade desse recurso, efeito também observado em Barros et al. (1986), Galo (1993), Santana et al. (2000). O aumento da EUK promovido pela fertilização de Na, constitui um aspecto relevante, pois reforça a hipótese de substituição do K por Na em *Eucalyptus* feita por Laclau et al. (2001).

O *Eucalyptus grandis* apresentou elevada EUNa atingindo valores próximos de 2000 kg kg⁻¹ quando não se forneceu Na (Testemunha e K_{3,0}) e de 1000 kg kg⁻¹ no tratamento Na_{3,0}. Entre os nutrientes considerados neste estudo, apenas a EUP ultrapassou esse valor, atingindo 5000 kg kg⁻¹ aos 36 meses. Esse comportamento provavelmente esteja relacionado com os baixos teores de Na no solo, uma vez que não foram detectadas variações entre as diversas idades.

Ao final do primeiro ano, verificou-se que as fertilizações com K ou Na aumentaram a EUMg, reduziram a EUP, não havendo alteração da EUN e EUCa, em comparação com o tratamento testemunha. Aos 24 meses, a fertilização com K possibilitou EUN, EUP e EUCa maiores que do tratamento com Na e, esse por sua vez, maiores que a da testemunha. Aos 36 meses a fertilização com Na foi o tratamento que proporcionou as maiores EUN, EUP, EUCa e EUMg. Convém ressaltar que as quantidades de N, P, Ca e Mg fornecidas a cada tratamento foram as mesmas, admitindo-se que essas foram suficientes e não limitaram o crescimento. Sendo assim, as variações na EU destes nutrientes, além de estarem diretamente relacionada com o crescimento das árvores, por efeito de diluição-concentração, proporcionado pela fertilização, provavelmente são reflexos das interações, sinérgicas ou antagônicas, que ocorrem entre os nutrientes no processo de absorção, transporte e redistribuição na planta.

Tabela 18 - Eficiência de uso de nutrientes no *Eucalyptus grandis* em resposta à fertilização com K e Na, 12, 24 e 36 meses pós-plantio

Tratamentos	Idade (meses)		
	12	24	36
EUK			
kg MS kg ⁻¹ K			
T	672 a	762 b	1042 b
K _{3,0}	322 b	508 c	829 c
Na _{3,0}	643 a	1070 a	1356 a
DMS ²	65	28	21
EUNa			
kg MS kg ⁻¹ Na			
T	2035 a	1992 b	2031 b
K _{3,0}	1963 a	3145 a	2100 a
Na _{3,0}	1121 b	1029 c	983 c
DMS	174	113	14
EUN			
kg MS kg ⁻¹ N			
T	113 a	196 c	280 b
K _{3,0}	106 a	220 a	277 c
Na _{3,0}	103 a	217 b	288 a
DMS	12	35	1
EUP			
kg MS kg ⁻¹ P			
T	2326 a	2939 c	5213 b
K _{3,0}	2011 b	3437 a	5150 b
Na _{3,0}	1884 b	3399 b	5828 a
DMS	199	33	69
EUCa			
kg MS kg ⁻¹ Ca			
T	255 a	311 c	412 c
K _{3,0}	301 a	354 a	436 b
Na _{3,0}	248 a	350 b	558 a
DMS	135	3	5
EUMg			
kg MS kg ⁻¹ Mg			
T	718 b	989 c	1566 b
K _{3,0}	769 a	1095 b	1194 c
Na _{3,0}	759 a	1253 a	1743 a
DMS	35	49	28

¹ EU = (biomassa seca da parte aérea em kg / quantidade do nutrientes acumulado na parte aérea em kg)

² DMS: Diferença mínima significativa (5%)

³ letras diferentes na coluna indicam diferença significativa a 5%.

Por expressar a taxa de conversão de um recurso em biomassa de um produto o CUB tem enfoque prático (ou agrônômico). Nesse estudo, o CUB foi determinado tendo por base a produção de lenho e a quantidade de nutriente acumulado na parte aérea.

Conforme pode ser observado na (Tabela 19), o CUB diminuiu na seguinte ordem: P > Na > Mg > K > Ca > N. Independentemente dos tratamentos houve aumento do CUB de todos os nutrientes com a idade, devido às retranslocações elevadas e, ou, aumento da proporção de lenho na biomassa das árvores durante o crescimento, compartimento esse que caracteristicamente apresenta baixas concentrações de nutrientes.

A fertilização de K e Na afetou o CUB-K de modo diferente. Considerando os valores obtidos aos 36 meses pós-plantio e tomando-se o tratamento Testemunha (709 kg kg^{-1}) como parâmetro, verificou-se com a fertilização sódica (932 kg kg^{-1}) um aumento de eficiência de 32%, enquanto que a fertilização potássica (571 kg kg^{-1}) reduziu esse índice em 20%. Esse resultado evidencia que a fertilização com Na em povoamentos de *Eucalyptus grandis* pode ser uma estratégia para diminuir a quantidade de K imobilizado no lenho e exportado pelas colheitas, preservando recursos e aumentando a sustentabilidade do sítio, além de representar uma diminuição dos custos de fertilização.

A comparação entre os índices, EU e CUB, realizada aos 12 meses pós-plantio, evidencia que os valores de CUB-K representava cerca de 20 a 29 % da EUK, mas com o avanço da idade e o aumento da proporção de lenho, a diferença diminui e os valores CUB-K passam a representar entre 49 a 60% aos 24 meses, e 69% aos 36 meses, em relação aos valores de EUK nos mesmas idades.

Os índices de recuperação do K aplicado foram 18, 40 e 44%, respectivamente aos 12, 24 e 36 meses. A fertilização com Na favoreceu a absorção de K, pois foram detectadas quantidades de K maiores que no tratamento testemunha: 9, 23 e 37%, respectivamente aos 12, 24 e 36 meses. Os índices de recuperação do Na obtidos foram semelhantes aos do K: 5, 21 e 52%, respectivamente aos 12, 24 e 36 meses. A fertilização K não favoreceu a absorção de Na, pois as quantidades de Na absorvidas não ultrapassaram 1% daquela obtida no tratamento testemunha.

Tabela 19 - Coeficiente de uso biológico (CUB) de nutrientes de *Eucalyptus grandis* em resposta à fertilização com K e Na, aos 12, 24 e 36 meses pós-plantio. Valores entre parênteses representam a variação percentual em relação à testemunha

Tratamentos	CUB kg de lenho kg ⁻¹ de nutriente absorvido		
	idade (meses)		
	12	24	36
CUB-K			
T	134 a	371 b	709 b
K _{3,0}	92 b (-32)	307 c (-17)	571 c (-20)
Na _{3,0}	145 a (8)	637 a (72)	932 a (31)
DMS	15	14	13
CUB-Na			
T	408 b	969 b	1382 b
K _{3,0}	560 a (37)	1902 a (96)	1447 a (5)
Na _{3,0}	255 c (-37)	613 c (-37)	676 c (-51)
DMS	64	65	11
CUB-N			
T	23 b	95 c	191 b
K _{3,0}	30 a (32)	133 a (40)	191 b
Na _{3,0}	23 b (3)	129 b (36)	198 a (4)
DMS	6	1	0.3
CUB-P			
T	468 b	1429 c	3547 b
K _{3,0}	574 a (23)	2078 a (45)	3547 b
Na _{3,0}	429 b (-8)	2025 b (42)	4007 a (13)
DMS	101	14	37
CUB-Ca			
T	52 a	151 c	281 c
K _{3,0}	86 a (66)	214 a (41)	301 b (7)
Na _{3,0}	56 a (9)	208 b (38)	383 a (37)
DMS	41	2	3
CUB_Mg			
T	145 b	481 c	1065 b
K _{3,0}	219 a (51)	662 b (38)	823 c (77)
Na _{3,0}	172 b (19)	747 a (55)	1198 a (12)
DMS	32	32	18

¹CUB = (matéria seca do lenho em kg / quantidade do nutriente acumulado na parte aérea em kg)

² DMS: Diferença mínima significativa (5%)

³ letras diferentes na coluna indicam diferença significativa a 5%.

4.9 Eficiência de uso de água

Inicialmente, cabe ressaltar que as condições climáticas no período entre 1/11/06 a 29/03/07 (151 dias de avaliação) conforme se verifica na Figura 2, favoreceram o aumento do conteúdo de água armazenada no solo, não havendo limitação hídrica para o crescimento das árvores. O volume de água transpirada pelo *E. grandis*, como é de se esperar esteve diretamente relacionado com o porte da árvore, sendo mais alto o consumo de água nas árvores com área basal (g) maior. A fertilização também afetou o padrão de transpiração das árvores, pois foram necessários três modelos, um por tratamento, para se estimar o consumo de água por planta (Tabela 20).

Tabela 20 - Equações para a estimativa do fluxo de seiva (L árvore⁻¹) em função da área basal (g = cm²) de *Eucalyptus grandis* e em resposta à fertilização potássica e sódica, entre 01/11/06 e 29/03/07 (151 dias) em Itatinga - SP

Tratamento	Modelo	Erro
T	$Y = 75,86 g^{0,871}$	$\varepsilon = \sqrt{515}.g^{0,729}$
K _{3,0}	$Y = 10,24 g^{1,28}$	$\varepsilon = \sqrt{515}.g^{0,729}$
Na _{3,0}	$Y = 1,78 g^{1,74}$	$\varepsilon = \sqrt{515}.g^{0,729}$

Essas diferenças no padrão de transpiração possivelmente estiveram relacionadas à extensão do sistema radicular (superfície absorvedora), à área foliar (superfície evaporativa) e, também ao maior controle estomático, processo em que o íon K⁺ e, o Na⁺ para algumas espécies vegetais, são imprescindíveis (MARSCHNER, 1995; TAIZ; ZEIGER, 2004; EPSTEIN; BLOON, 2006). Essa evidência é reforçada à medida que os tratamentos não causaram variações consistentes sobre propriedades físicas e anatômicas da madeira: densidade (básica e aparente), dimensões da fibra (largura, comprimento, espessura da parede e diâmetro do lume) e, principalmente, nas dimensões dos vasos (frequência, diâmetro e área ocupada pelos vasos) conforme relatado por Sette Jr. (2007).

As fertilizações potássica e sódica elevaram a transpiração das árvores em 20 % (P<0,06). A transpiração estimada durante 151 dias de avaliação no tratamento Testemunha foi de 397 mm, enquanto em K_{3,0} e Na_{3,0} a transpiração alcançou 505 e 519 mm, respectivamente. Nestas condições, estima-se que a transpiração diária do *Eucalyptus grandis* tenha variado de 2,6 a 3,6 mm dia⁻¹ (Figura 33). A relação do volume de água transpirada com o IAF aos 36 meses, revelou que a transpiração média diária por unidade de área foliar do tratamento K_{3,0} (0,62 mm

$\text{dia}^{-1} \text{m}^{-2}$) foi menor do que nos tratamentos Testemunha ($0,96 \text{ mm dia}^{-1} \text{m}^{-2}$) e $\text{Na}_{3,0}$ ($1,05 \text{ mm dia}^{-1} \text{m}^{-2}$). Esse resultado evidencia a importância do K para o controle estomático, e por outro lado indica que o Na não exerce essa função com a mesma intensidade à medida que o tratamento fertilizado com Na não diferiu significativamente da Testemunha.

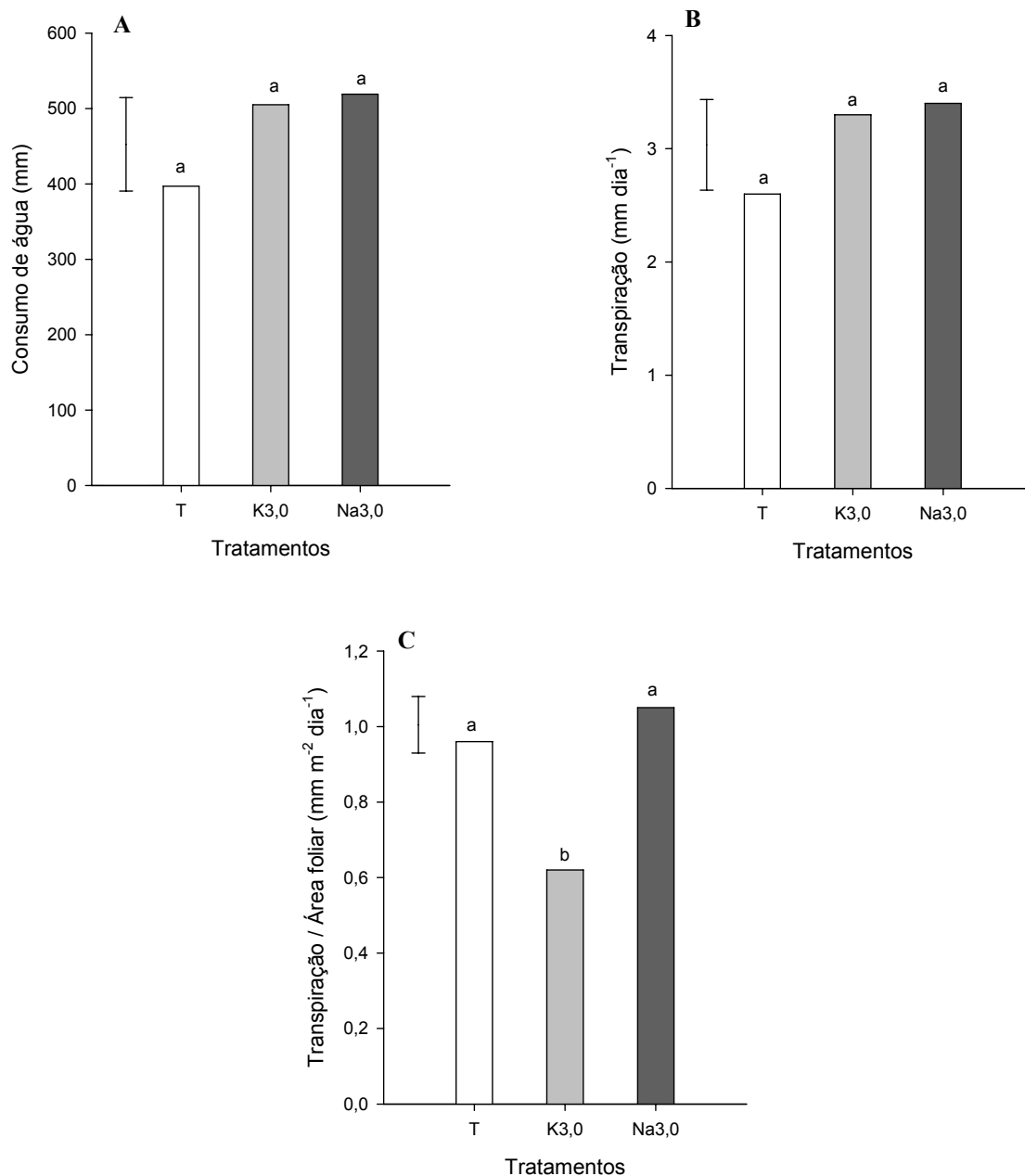


Figura 33 - (A) Volume de água transpirada durante 151 dias (entre 01/11/06 a 29/03/07). (B) Transpiração média por dia (C) Transpiração média por unidade de área foliar de *Eucalyptus grandis* em resposta à fertilização potássica e sódica em Itatinga /SP. Letras diferentes indicam diferença entre os tratamentos pelo teste Tukey (5%) e as barras representam a diferença mínima significativa

Embora o consumo de água tenha elevado com a fertilização, essa prática estimulou o desenvolvimento do *Eucalyptus grandis* resultando em incrementos em volume e biomassa do tronco (lenho+casca) maiores do que na Testemunha (Tabela 21), diminuindo a exigência de água (EA) e aumentando a eficiência de uso de água (EUA).

A eficiência de uso de água em termos de biomassa (EUA_B) no tratamento Testemunha foi de $0,0021 \text{ g L}^{-1}$, o que corresponde à exigência de 500 L de água por kg^{-1} de tronco. Os índices de EUA_B dos tratamentos fertilizados com o K ($0,0041 \text{ g L}^{-1}\text{N}$) e Na ($0,0033 \text{ g L}^{-1}\text{N}$) aumentaram 95 e 57 %, diminuindo a exigência de água para 248 e 304 L kg^{-1} , respectivamente. Ao considerar a produtividade em volume de madeira, os índice de EUA_V estimados para os tratamentos $K_{3,0}$ ($0,0068 \text{ dm}^3 \text{ L}^{-1}$) e $Na_{3,0}$ ($0,0057 \text{ dm}^3 \text{ L}^{-1}$) foram maiores que o da Testemunha ($0,0034 \text{ dm}^3 \text{ L}^{-1}$) permitindo reduzir a exigência de água em mais de 100 L dm^{-3} .

Os resultados apresentados evidenciam que o *Eucalyptus grandis* está entre os vegetais que possuem alta eficiência de uso de água, característica também verificada por Stape et al. (2004ab), Binkley et al. (2004), Almeida et al. (2007) e a fertilização potássica permite aumentar consideravelmente (100%) esta eficiência comportamento também relatado por Teixeira et al (2008).

Tabela 21 - Incremento corrente em volume (IC_V) e biomassa (IC_B), eficiência de uso de água (EUA) e exigência de água (EA) de *Eucalyptus grandis* em resposta à fertilização potássica e sódica entre 31 e 36 meses pós-plantio (01/11/06 a 29/03/07 - 151 dias) em Itatinga /SP. Letras diferentes na coluna indicam diferença pelo teste Tukey (5%)

Tratamento	Incremento		EUA		Exigência	
	Biomassa Mg ha^{-1}	Volume $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	Biomassa kg L^{-1}	Volume $\text{dm}^3 \text{ L}^{-1}$	Biomassa L kg^{-1}	Volume L dm^{-3}
T	8 b	14 b	0,0021 b	0,0034 b	500 a	287 a
$K_{3,0}$	21 a	34 a	0,0041 a	0,0068 a	248 b	151 b
$Na_{3,0}$	17 a	28 a	0,0033 a	0,0057 a	304 b	179 b
DMS (5%)	7	11	0,0011	0,0017	171	102

4.10 Implicações práticas no manejo florestal

Conforme se demonstrou, a fertilização potássica é uma prática de manejo indispensável para aumentar a produtividade das florestas de *Eucalyptus grandis* cultivadas nos solos distróficos.

O aumento de produtividade é uma consequência direta do aumento do IAF, o que se por um lado favorece a captação de energia solar e a assimilação de C, por outro pré-dispõe a planta a maior transpiração, caso ela não possua mecanismos de resistência eficientes e suprimento de potássio adequado para realizar o controle de abertura e fechamento dos estômatos, função que o potássio nutriente está fortemente envolvido.

Nesse contexto, espera-se que a fertilização potássica tenha maior importância nas regiões sujeitas a déficit hídrico, pois aumentando a EUA se eleva a capacidade produtiva dos sítios podendo diminuir o efeito do gradiente pluviométrico demonstrado por Stape et (2004).

Ainda que o objetivo seja atingir a produtividade máxima, neste trabalho alcançada com o fornecimento 210 kg ha^{-1} de K_2O as recomendações de fertilizantes tanto do ponto de vista econômico quanto do uso eficiente dos recursos naturais, são feitas considerando-se a lei dos incrementos decrescentes. Nesse sentido, cabe salientar que até a idade de 3 anos o fornecimento de 100 kg ha^{-1} de K_2O foi suficiente para atingir 90% da máxima produtividade física. Conclusão mais precisa será obtida ao término da rotação.

A adubação com $\text{Na}_{3,0}$, isoladamente, foi capaz de suprir parcialmente a deficiência de potássio, mas a mistura de $\text{K}_{1,5}+\text{Na}_{1,5}$ possibilitou aumentar em 12% a produtividade em relação ao $\text{K}_{1,5}$, equiparando-se ao $\text{K}_{3,0}$. Este estudo mostrou que o aporte de Na permitiu aumentar a eficiência do uso do K o que é muito promissor para o manejo florestal.

As informações na literatura sugerem que a maior produtividade em resposta ao K está diretamente relacionada ao fato desse elemento ativar numerosas enzimas e também participar como soluto intracelular no processo de abertura e fechamento dos estômatos regulando o processo de assimilação de C e perda de água, aumentando a turgescência e a expansão foliar, propiciando maior aproveitamento da radiação solar. No entanto, uma hipótese para explicar a resposta em produtividade alcançada com o fornecimento de Na poderia ser a capacidade do *E. grandis* utilizar o Na no ajuste osmótico das células, no interior do vacúolo, e

liberando potássio para as funções metabólicas no citosol onde ele é imprescindível. Novas pesquisas serão necessárias para testar esta hipótese.

Esses resultados são bastante originais uma vez que não se tem na literatura, sobretudo em condição de campo, resultados que comprovem uma possível substituição do K por Na em *Eucalyptus grandis*. Mas novos estudos são necessários para se definir proporções em função do tipo de solo e clima.

5 CONCLUSÕES

- O *Eucalyptus grandis* cultivado em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico responde expressivamente à fertilização potássica em índice de área foliar (IAF), diâmetro à altura do peito (DAP) e altura (H), podendo dobrar o a produtividade em volume e em biomassa de madeira na idade de três anos.
- A fertilização potássica permite aumentar a eficiência de uso de água pelo *Eucalyptus grandis* em 100% ao terceiro ano pós-plantio.
- O aumento das doses de fertilizantes potássicos aplicados em povoamentos de *Eucalyptus grandis* reduz a eficiência de uso de potássio até o terceiro ano pós-plantio.
- A fertilização potássica confere ao *Eucalyptus grandis* maior resistência e/ou tolerância à ferrugem (*Puccinia pisiddi* Winter.)
- O sódio substitui, parcialmente, o K na nutrição do *Eucalyptus grandis*, e constitui uma estratégia para aumenta a eficiência de uso do potássio, permitindo diminuir as doses dos fertilizantes potássicos aplicados em povoamentos manejados intensamente.
- O *Eucalyptus grandis* cultivado em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico responde à fertilização sódica em termos de diâmetro à altura do peito e altura, podendo aumentar em 50 % a produtividade em volume e biomassa de madeira na idade de três anos.
- Os fertilizantes KCl e K₂SO₄ são fontes de potássio equivalentes, até a idade de três anos. No entanto, o volume de madeira estimado com KCl foi 8% maior, ainda que esta diferença não seja estaticamente significativa. Além disso, o preço mais alto do K₂SO₄ restringe o seu uso.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, M.A.; RICHTER, A.; HILL, A.K.; COLMER, T.D. Salt tolerance in *Eucalyptus* spp.: identity and response of putative osmolytes. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 28, p. 772-787, 2005.
- ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V.; LANDSBERG, J.J.; REZENDE, G.D. Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology and Management**: Amsterdam, v. 251, p. 10-21, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico 2008**. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp>>. Acesso em: 02 maio 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA A PESQUISA DA POTASSA E FÓSFORO. **Potássio: necessidade e uso na agricultura moderna**. Tradução de B. van Raij. Piracicaba: POTAFOS, 1990. 45 p.
- BARROS, N.F.; BRAGA, J.M.; BRANDI, R.M.; DEFELIPO, B.V. Produção de eucalipto em solos de Cerrados em resposta à aplicação de NPK e de B e Zn. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 5, p. 90-103, 1981.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; CARMO, D.N.; NEVES, J.C.L. Classificação nutricional de sítios florestais : descrição de uma metodologia. **Revista Árvore**: Viçosa, v. 10, p. 112-120, 1986.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. Fertilização e Correção do solo para o plantio de Eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Ed. Folha de Viçosa, 1990. p. 127-186.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil.. In: P.M. ATTIWILL; M.A. ADAMS. (Org.). **Nutrition of Eucalypts**. 1th ed. Collingwood: CSIRO Publishing., 1995, p. 335-356.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. Aspectos da nutrição florestal em solos tropicais. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13, 1996, Águas de Lindóia **Solo-suelo 96: Conferências...** Piracicaba: SBCS; SLCS, 1996. 1 CD-ROM.
- BELLOTE, A.F.J. **Concentração, acumulação e exportação de nutrientes em *Eucalyptus grandis* (Hill, ex Maiden) em função da idade**. 1979. 129 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1979.
- BINKLEY, D. **Nutrición forestal: prácticas de manejo**. 5. ed. Tradução de M.G. Ortiz. Limusa: Forest Nutrition Management, 1998. 340 p.
- BINKLEY, D.; STAPE, J.L.; RYAN, M.G. Thinking about efficiency of resource use in forests. **Forest Ecology and Management**: Amsterdam, v. 193, p. 5-16. 2004.

BONNEAU, X. **Recherches sur les facteurs limitant la production végétale em conditions de stress hydrique**. 1998. 197p. Thèse (Doctuer-Ingénier: Production végétale) - Institut National Agronomique, Paris-grignon, 1998.

BROWNELL, P.F.; WOOD, J.G. Sodium as an Essential Micronutrient Element for *Atriplex vesicaria*, Heward. **Nature**: London, v. 179, p. 635-636. 1957.

CALDAS, L.S.; BRAVO, C.; PICCOLO, H.; FARIA, C.R.S.M. Measurement of leaf area with a hand-scanner linked to a microcomputer. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 4, n. 1, p. 17-20, 1992.

CARMELLO, Q.A.C.; BITTENCOURT, V.C.; BERNARDI, A. C. C. Substituição do K pelo Na na nutrição de cinco variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 1992, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ, 1992. p. 336-367.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **Informativo CEPEA** – setor florestal. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/florestal/>>. Acesso em: 10 mar. 2009.

DUNN, G.M.; TAYLOR, D.W.; NESTER, M.R.; BEETSON, T.B. Performance of twelve selected Australian tree species on a saline site in southeast Queensland. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 70, p. 255-264, 1994.

DECHEN, A.R.; NACHTGALL, G.R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Ed. Folha de Viçosa, 2007. p. 91-132.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA, 1999. 412 p.

EPSTEIN, E. How calcium enhances plant salt tolerance. **Science**, Washington, v. 280, n. 5371, p. 1906, 1998.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição Mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Tradução de M.E.T. Nunes. Londrina: Editora Planta, 2006 403 p.

FAGERIA, N.K. Eficiência do uso de potássio pelos genótipos de arroz de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 10, p. 2115-2120, 2000.

FARIA, G.E.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.NEVES, J.C.L; TEIXEIRA, J.L. R. Produção e estado nutricional de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, em segunda rotação, em resposta à adubação potássica. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 5, p. 577-584, 2002.

FASSBENDER, H.W.; BORNEMISZA, E. **Química de suelos**. 2. ed. São José: IICA, 1987. 420 p.

GALO, M.V. **Resposta do eucalipto à aplicação de potássio em solo de cerrado**. 1993. 40 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1993.

GAVA, J.L. Efeito da adubação potássica em plantios de *Eucalyptus grandis* conduzidos em segunda rotação em solos com diferentes teores de potássio trocável. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 11, n. 30, p. 89-94, 1997.

GONCALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; SMETHURST, P.; GAVA, J.L. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. **Forest Ecology And Management**, Amsterdam, v. 193, p. 45-61, 2004.

GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. 427 p.

GRANIER, A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. **Annales des Sciences Forestières**, Paris, v. 42, n. 2, p. 193-200, 1985.

_____. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. **Tree Physiology**, Oxford, v. 3, p. 309-320, 1987.

GRANIER, A.; HUC, R.; BARIGAH, S.T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 78, p. 19-29, 1996.

HOHJO, M.; M. GANDA, T.; MARUO, Y.; SHINOHARA, T.; ITO, E.; MALOUPA. GERASOPOULOS, D. Effects of NaCl application on the growth, yield and fruit quality in NFT-tomato plants. **Acta Horticulturae**, Hague, n. 548, p. 469–475, 2001.

HUBBARD, R.M.; RYAN, M.G.; GIARDINA, C.P.; BARNARD, H. The effect of fertilization on sap flux and canopy conductance in a *Eucalyptus saligna* experimental Forest. **Global Change Biology**, v. 10, p. 427–436, 2004.

JUDD, T.S.; ATTIWWIL, P.M.; ADANS, A.M. Nutrient concentration in *Eucalyptus*: A synthesis in relation to differences between taxa, sites and components. In: ATTIWILL, P.M.; ADAMS, M.A. **Nutrition of *Eucalyptus***. Melbourne: CSIRO, 1996. p. 123-153.

KALLARACKAL, J.; SOMEN, C. K. An ecophysiological evaluation of the suitability of *Eucalyptus grandis* for planting in the tropics. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 95, p. 53-61, 1997.

LACERDA, M.P. Por que os fertilizante subiram tanto? **HORTIFRUTI BRASIL**, v. 7, n. 77, p. 8-15, mar. 2009. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/hfbrasil/>>. Acesso em: 10 jan. 2009.

LACLAU, J.P. **Dynamique du fonctionnement minéral d'une plantation d'Eucalyptus. Effets du reboisement sur un sol de savane du littoral congolais; conséquences pour la gestion des plantations industrielles**. 146 pp. Thesis (Ph.D. thesis) - Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 2001.

- LACLAU, J.P.; ALMEIDA, J.C.R.; GONÇALVES, J.L.M.; SAINT-ANDRE, L.; VENTURA, M.; RANGER, J.; MOREIRA, R.M.; NOUVELLON, Y. Influence of nitrogen and potassium fertilization on leaf lifespan and allocation of above-ground growth in *Eucalyptus* plantations. **Tree Physiology**, Oxford, v. 128, p. 1-14, 2009.
- LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of *Eucalyptus* in Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 128, p. 181-196, 2000.
- LACLAU, J.P.; RANGER, J.; BOUILLET, J.P.; NIZLA, J.D.; DELEPORTE, P. Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savana ecosystem in Congo. 1. Chemical composition of rainfall. Troughfall and stemflow solutions. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 176, p. 105-119, 2003.
- LANG, A.R.G.; McMURTRIE, R.E. Total leaf areas of single trees of *Eucalyptus grandis* estimated from transmittances of the sun's beam. **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam, v. 58, p. 79-92, 1992.
- LANA, M.C.; NEVES, J.C.L. Capacidade de suprimento de potássio sob reflorestamentos com eucalipto do Estado de São Paulo. **Árvore**, Viçosa, v. 18, p. 115-122, 1994.
- LIMA, W.P. **O impacto ambiental do eucalipto**. São Paulo: Edusp, 1993, 302 p.
- LIMA, W.P. O Eucalipto seca o solo? **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 13-17, jan./abr.2004.
- LIU, G.D.; LIU, G.L. Effect of partial replacement of potassium by sodium or calcium in Indica rice. **Acta Agronomica Sinica**, Amsterdam, v. 22, p. 313-319, 1996.
- LOPES, A.S. **Solos sob "Cerrado": características, propriedades e manejo**. 2. ed. Piracicaba: POTAFÓS, 1984. 162 p.
- MADSEN, P.A.; MULLIGAN, D.R. Effect of NaCl on emergence and growth of a range of provenances of *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus populnea*, *Eucalyptus camaldulensis* and *Acacia salicina*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 228, p. 152-159, 2006.
- MAQUERE, V. **Dynamics of mineral elements under a fast-growing *eucalyptus* plantation in brazil. implications for soil sustainability**. 2009. 372 p. Thesis (Doctor in Forest Sciences) - Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech); Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Paris, 2009.
- MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.
- _____. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 3. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 596 p.
- _____. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

- MALAVOLTA, E., VITTI E.C., OLIVEIRA S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas (princípios e aplicações)**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.
- MELLO M.S.L. **Características do sistema radicular de povoamentos de eucaliptos propagados por sementes e estacas**. 1997. 79 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) –Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1997.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 4th ed. Bern: International Potash Institute, 1987. 685 p.
- MORAIS, E.J.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; BRANDI, R.M. biomassa e eficiência nutricional de espécies de eucalipto em duas regiões bioclimáticas de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p. 353-362, 1990.
- NIKNAM, S.R.; MCCOMB, J. Salt tolerance screening of selected Australian woody species - a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 139, p. 1-19, 2000.
- NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. In: ATTIWILL, P.M.; ADAMS, M.A. **Nutrition of *Eucalyptus***. Melbourne: CSIRO, 1996. p. 335-354.
- NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Interpretação de análise química do solo para o crescimento e desenvolvimento do *Eucalyptus* spp.: níveis críticos de implantação e manutenção. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 10, p. 105-111, 1986.
- NOVAIS, R.F.; REGO, A.K.; GOMES, J.M. Nível crítico de potássio no solo e na planta para o crescimento de mudas de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden e de *Eucalyptus cloenziana* F. Muel. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 4, p. 14-23, 1980.
- OLSON, J.S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. **Ecology**, Brooklyn, v. 44, p. 322-331, 1963.
- PERRENOUD, S. Potassium and plant health. 2^{ed} ed. Berna: International Potash Institute, 1990. 365 p.
- RAIJ, Bernardo van. Fertilidade do solo e adubação. São Paulo: Ceres, 1991. 343 p.
- RAIJ, B. van, ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2000. 285 p.
- RAPP, M.; LEONARDI, S. Evolution de La litière au sol au cours d’une année dans un taillis de chêne vert (*Quercus ilex*). **Pedobiologia**, Jena, v. 32, p. 177-185, 1988.

RAWAT, J.S.; BANERJEE, S.P. The influence of salinity on growth, biomass production and photosynthesis of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. and *Dalbergia sissoo* Roxb. seedlings. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 205, p. 163-169, 1998.

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

ROJAS, J.S.D.; LACLAU, J.P.; ALMEIDA, J.C.R.; GONÇALVES, J.L.M.; FOLEGATTI, M.A. Calibração do fluxímetro de Granier na determinação do fluxo de seiva em *Eucalyptus grandis* com 2 anos de idade. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 37, 2007, Bonito-MS. **Anais...** Bonito. SBEA, 2007. 1 CD-ROM

SAS INSTITUTE. **SAS user's guide**: statistics. Cary, 2002-2003

SAFOU-MATONDO, R.; DELEPORTE, P.; LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P. Hybrid and clonal variability of nutrient content and nutrient use efficiency in *Eucalyptus* stands in Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 210. p. 193-204, 2005.

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

SETE JUNIOR, C.R. **Efeito da aplicação de lodo de esgoto e de fertilização mineral no crescimento e propriedades da madeira de árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex. Maiden**. 2007. 152 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SCATOLINI, F.M.; FIRME, D.J.; GARCIA, C.H.; GOMES, F.P.; CAMARGO, F.R.A. Parcelamento da adubação potássica em *E. grandis* em áreas de reforma da Votorantim celulose e papel S.A. In: SOLO-SUELO, 1996, Águas de Lindóia. **Anais...** Águas de Lindóia: SBCS, 1996. 1 CD-ROM.

SHCACHTMAN, D.; LIU, W. Molecular pieces to the puzzle of the interaction between potassium and sodium uptake in plants. **Elsevier Science**, Amsterdam, v. 4, n. 7, p. 281-287, 1999.

SHUMACHER, M.V. POGGIANI, F.; SIMÕES, J.W. Transferências de nutrientes das copas para o solo através da deposição de folheto em povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus torelliana*, plantados em Anhembi, SP. **Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais**, n. 47, p. 56-61, 1994.

SICARD, C.; SAINT-ANDRE, L.; GELHAYE, D.; RANGER, J. Effect of initial fertilisation on biomass and nutrient content of Norway spruce and Douglas-fir plantations at the same site. **Trees**, Berlin, v. 20, p. 229-246, 2006.

SILVEIRA, R.L.V.A.; GAVA, J.L.; MALAVOLTA, E. O potássio na cultura do eucalipto. In YAMADA, T.; ROBERTS, T.L. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira** Piracicaba: POTAFÓS, 2005. cap. 20, p. 523-590.

- SILVEIRA, R.L.V.A.; HIGASHI, E.N.; GONÇALVES, A.N.; MOREIRA, A. Avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus*: diagnose visual, foliar e suas interpretações. In GONÇALVES, J.L.M.; BENDETTI, V. (Ed.) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. cap. 4, p. 70-104.
- SILVEIRA, R.L.V.A.; GONÇALVES, J.L.M.; GONÇALVES, A.N.; BRANCO, E.F. **Levantamento e estudo de mercado de fertilizantes em florestas brasileiras**: relatório técnico. Piracicaba: IPEF, 1995. 117 p.
- SILVEIRA, R.L.V.A.; HIGASHI, E.N.; GONÇALVES, A.N.; RAGOZZINI, P.E.A.; MOREIRA, A. **Nutrição mineral de mudas de *Eucalyptus grandis*** : crescimento, produção de matéria seca, concentração e acúmulo de nutrientes. Piracicaba: IPEF, 1998.
- SMETHURST P.; BAILLIE C.; CHERRY M.; HOLZ G. Fertilizer effects on LAI and growth of four *Eucalyptus nitens* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 176, n. 1, p. 531-542, 2003.
- SPSS. **SIGMAPLOT software**; version 11th ed. Chicago, 2008.
- STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 17-31, 2004a.
- STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; RYAN, M.G.; GOMES, A.N. Water use, water limitation, and water use efficiency in a *Eucalyptus* plantation. **Bosque**, Valdivia, v. 25, p. 35-41, 2004b.
- SUN, D.; DICKINSON, G. Responses to salt stress of 16 *Eucalyptus* species, *Grevillea robusta*, *Lophostemon confertus* and *Pinus caribaea* var. hondurensis. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 60, p. 1-14, 1993.
- SUTCLIFFE, J.F.; BAKER, D.A. **As plantas e os sais minerais**. Tradução de A. Lamberti e V.M. Lotto. São Paulo: EPU, 1989. 80 p. (Temas de Biologia. 33).
- TEIXEIRA, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; ARTHUR JÚNIOR, J.C.; DEZORDI, C. *Eucalyptus* sp seedling response to potassium fertilization and soil water. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 1, p. 47-63, 2008
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3thed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 722 p.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATTER, J.R. The water balance. **Publications in Climatology**, Centerton, v. 8, n. 1, 104 p., 1955.
- VALERI, S.V.; ISMAEL, J.J.; TORRES, R.M., CORRADINI, L. Efeitos de potássio no crescimento e idade de corte de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, em areia quartzosa e latossolo vermelho - escuro. In: SOLO-SUELO, 1996, Águas de Lindóia. **Anais...** Águas de Lindóia: SBCS, 1996. 1 CD-ROM.

- VIÉGAS, R.A.; QUEIROZ, J.E.; SILVA, L.M.M.; SILVEIRA, J.A.G.; ROCHA, I.M.A.; VIÉGAS, P.R.A. Plant growth, accumulation and solute partitioning of four forest species under salt stress. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 258-262, 2003.
- VITOUSEK, P.M.; SANFORD, R.L. Nutrient cycling in most tropical Forest. **Annual Review of Ecology and Systematics**, Palo Alto, v. 17, p. 137-167, 1986.
- WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, Oxford, v. 11, p. 41-76, 1947.
- WOODWARD, A.J.; BENNETT, I.J. The effect of salt stress and abscisic acid on proline production, chlorophyll content and growth of in vitro propagated shoots of *Eucalyptus camaldulensis*. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, Amsterdam, v. 82, p. 189-200, 2005.
- XAVIER, A.C.; SOARES, J.V.; ALMEIDA, A.C. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, Vicosa, v. 26, n. 4, p. 421-427, 2002.
- YIN GUANG-CAI, ZHOU GUO-YI, MORRIS JIM, HUANG ZHI-HONG, CHU GUO-WEI, ZHOU GUANG-YI. Sap flow response of *Eucalyptus* (*Eucalyptus urophylla*) to environmental stress in south china. **Journal of Zhejiang University Science**, v. 5, p. 1218-1225, 2004.
- ZAIA, F.C.; GAMA-RODRIGUES, A.C. Ciclagem e balanço de nutrientes em povoamentos de eucalipto na região norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 28, p.843-852, 2004.
- ZAMBOLIM. Estratégias para o manejo de doenças. In YAMADA, T. (Ed.). **Workshop: A interface Solo-Raiz (rizosfera) e relações com a disponibilidade de nutrientes, a nutrição e as doenças de plantas**. Piracicaba: POTAFÓS, 1998.
- ZHOU, J.H.; SHANG, F.L. The characteristics of Na uptake and the effect of K on Na uptake in the rhizosphere of sugar beet. **Sugar Crops of China**, Beijing, v. 3, p. 1-6, 1998.