

# ALOCAÇÃO DE NUTRIENTES EM PLANTIOS DE EUCALIPTO NO BRASIL<sup>(1)</sup>

Reynaldo Campos Santana<sup>(2)</sup>, Nairam Félix de Barros<sup>(3)</sup>, Roberto  
Ferreira Novais<sup>(3)</sup>, Hélio Garcia Leite<sup>(4)</sup> & Nicholas Brian Comerford<sup>(5)</sup>

## RESUMO

Práticas de manejo florestal podem alterar a exportação de nutrientes do sítio. Este trabalho teve por objetivo estimar o conteúdo de nutrientes em árvores de eucalipto, em diferentes regiões do Brasil. Avaliou-se a influência de algumas características climáticas na produção e no conteúdo de nutrientes na biomassa, utilizando-se o banco de dados do Programa de Pesquisa em Solos e Nutrição de Eucalipto do Departamento de Solos – UFV. As características climáticas foram um importante componente dos modelos. A produção de biomassa e o conteúdo de nutrientes foram positivamente relacionados entre si e ambos foram menores nas regiões com menor disponibilidade de água. As estimativas apontaram que até à idade de 4,5 anos pós-plantio acumulam-se as maiores proporções de nutrientes (68 % do N, 69 % do P, 67 % do K, 63 % do Ca e 68 % do Mg) para a idade de corte de 6,5 anos. Isto indica que, após 4,5 anos, o potencial de resposta à aplicação de fertilizantes é menor. O conteúdo estimado de nutrientes acumulados na copa e na casca representou 65, 70, 64, 79 e 79 %, de N, P, K, Ca e Mg, respectivamente, até 6,5 anos de idade. Assim, a colheita apenas do lenho representa expressiva redução na exportação desses nutrientes proporcionando maior sustentabilidade da produção nas plantações de eucalipto.

**Termos de indexação:** nutrição florestal; biomassa; macronutrientes.

---

<sup>(1)</sup> Trabalho apresentado no XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2007 (Gramado, RS).

<sup>(2)</sup> Professor do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal dos Vales do Jequinhonha e Mucuri-UFVJM. CEP: 39.100-000 Diamantina (MG) E-mail: silviculturafvj@ yahoo.com.br

<sup>(3)</sup> Professor do DPS/Universidade Federal de Viçosa-UFV. CEP: 36.571-000 Viçosa (MG), bolsista do CNPq. E-mail: nfbarrros@ufv.br e rfnovais@ufv.br

<sup>(4)</sup> Professor do Departamento de Engenharia Florestal – UFV. Bolsista do CNPq. E-mail: hgleite@ufv.br

<sup>(5)</sup> Center Director and Professor, North Florida Research and Education Center, University of Florida, 155 Research Road, Quincy, Florida 32353. E-mail: nbc@ufl.edu

## SUMMARY: NUTRIENT ALLOCATION IN EUCALYPT PLANTATIONS IN BRAZIL

Forest management practices can alter nutrient exportation from the site. The purpose of this study was to estimate nutrient contents in the aboveground biomass of eucalyptus plantations in Brazil. The influence of key climatic variables on eucalypt productivity and nutrient content was evaluated, using the database from the Research Programa on Soil and Eucalyptus Nutrition of the Soil Science, Department - Federal University of Viçosa, Minas Gerais State, Brazil. Climatic characteristics were an important component of the models. In regions with low water availability the nutrient accumulation in aboveground biomass as well as biomass production were lower. The highest proportion of all nutrients (68 % N, 69 % P, 67 % K, 63 % Ca, and 68 % Mg) was accumulated in the biomass within 4.5 years after planting for harvesting after approximately 6.5 years. After 4.5 years, the potential of fertilizer response was lower. Canopy and stem bark together accounted for 65 % N, 70 % P, 64 % K, 79 % Ca, and 79 % Mg in the aboveground biomass. Debarking in the field can therefore substantially reduce nutrient exportation and contribute to a more sustainable production in eucalyptus plantations.

*Index terms:* Forest nutrition; biomass; macronutrients.

## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o plantio de eucalipto no Brasil expandiu-se para regiões além daquelas tradicionais, como a Sul e Sudeste, tornando necessária a obtenção de informações sobre a produção e demanda de nutrientes desses novos plantios.

A produção de uma floresta é determinada pela quantidade de radiação solar interceptada pela copa e pela eficiência de conversão da radiação em biomassa. Essa eficiência é principalmente influenciada pela disponibilidade de água e de nutrientes. Aumentando o suprimento destes fatores, além do ponto de deficiência, tende a aumentar a produção (Epstein & Bloom, 2006) que é fortemente influenciada pelas interações entre eles até que seja atingido um nível ótimo.

Os fatores de crescimento podem tornar-se limitantes para as plantas por poucos minutos (temperatura); por dias, semanas (água) ou até mesmo meses (nutrientes). A radiação solar e a concentração de CO<sub>2</sub> da atmosfera são fatores não-manejáveis em condições normais e tendem a não limitar o crescimento nos trópicos. Nestas condições, a água e os nutrientes são os principais limitantes da produtividade florestal (Barros & Comerford, 2002) reduzindo-a em relação ao potencial máximo permitido pela disponibilidade de radiação (Linder et al., 1996).

A sustentabilidade da produtividade de uma floresta é determinada, dentre outros fatores, pelo balanço de nutrientes no sistema solo-planta. Evidências da interação entre água e nutrientes influenciando a produção de biomassa têm sido obtidas em experimentos de longa duração com *Pinus radiata* na

Austrália (Raison et al., 1992) e com *E. globulus* em Portugal (Pereira et al., 1994) e respostas positivas à adição de diferentes nutrientes e, ou, às suas interações com a água têm sido relatadas para plantios de eucalipto no Brasil (Barros & Comerford, 2002; Stape, et al., 2006). A produção de biomassa é também determinada pelas características genéticas da espécie e maiores produtividades estão associadas com maiores exportações de nutrientes do sítio (Santana et al., 2002).

Para adoção de estratégias adequadas de manejo a longo prazo, os silvicultores devem conhecer as relações entre a quantidade de nutrientes que é exportada e a biodisponibilidade dos nutrientes no sítio de cultivo, para poder aplicar técnicas que visem ao manejo florestal sustentável por várias rotações.

Este estudo visou a avaliar a biomassa, o conteúdo e a alocação de nutrientes em árvores de eucalipto em diferentes idades e regiões do Brasil.

## MATERIAL E MÉTODOS

O Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, entre os anos de 1981 e 2000, formou um banco de dados sobre a produção de biomassa e conteúdo de nutrientes nela contidos em plantios de eucalipto cultivados em várias condições edafoclimáticas brasileiras. As espécies e os clones de eucalipto utilizados constituíam o melhor material genético disponível na época da amostragem para cada região. As práticas de manejo florestal podem ter variado, mas representaram o que melhor se conhecia na época. Em geral, o preparo do solo foi realizado por

grade *bedding* ou arado de disco, nas linhas de plantio. A fertilização foi feita em faixa, sulco ou cova na época de plantio e em cobertura, aos 18 meses de idade.

A biomassa e o conteúdo de nutrientes foram determinados em povoamentos de seis meses a 11 anos de idade, em parcelas (600 m<sup>2</sup>) distribuídas aleatoriamente e representativas de cada região. Todas as árvores das parcelas tiveram seu diâmetro (a 1,3 m de altura do solo) e sua altura comercial medidos. Neste trabalho, foram mensuradas 1.217 árvores-amostras, em 20 regiões de cinco Estados (Quadro 1). Em cada parcela, uma árvore média (árvore-amostra) foi abatida e seus componentes (folha, galho, casca e lenho) foram pesados no campo. Subamostras foram coletadas e secas a 65 °C em estufa com circulação forçada de ar. Após a determinação da

matéria seca dos componentes das árvores (folha, galho, casca e lenho), as amostras do material vegetal foram moídas, passadas por peneiras e submetidas à digestão nítricoperclórica; as concentrações de P (colorimetria), K (fotometria de emissão de chama), Ca e Mg (espectrometria de absorção atômica) foram determinadas no extrato, enquanto o N foi determinado pelo método de Kjeldahl.

A biomassa e o conteúdo dos nutrientes dos componentes das árvores, por hectare, foram obtidos ao multiplicar a matéria seca e o conteúdo de nutrientes de cada componente das árvores-amostra pelo número de árvores em um hectare. A estimativa de produção de biomassa e do conteúdo de nutrientes da parte aérea em diferentes regiões foi obtida conforme proposto por Santana (2000).

**Quadro 1. Material genético, número de árvores-amostra e valores médios de características climáticas utilizadas no ajuste das equações de produção de biomassa e conteúdos de nutrientes da parte aérea, em eucalipto cultivado em diversas regiões do Brasil**

Região	Material genético*	n	Característica climática				
			P	PMS	EVP	W	T
			mm				°C
Três Marias – MG	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9	177	1.280	240	1.320	-40	23
Lençóis Paulista – SP	1	35	1.200	240	1.200	0	20
Luiz Antônio – SP	1, 2, 3, 5	207	1.440	240	1.380	60	20
Carbonita – MG	1	12	1.280	240	1.260	20	22
Itamarandiba – MG	10	23	1.280	240	1.260	20	22
Bom Despacho – MG	1	13	1.440	240	1.260	180	21
Paraopeba – MG	1	11	1.440	240	1.260	180	21
Itapetininga – SP	1, 2	13	1.280	320	1.080	200	20
Angatuba – SP	1, 2	16	1.280	320	1.080	200	20
Depressão Central – RS	2	53	1.440	720	780	660	14
Guanhães – MG	1	40	1.280	240	1.080	200	22
Viçosa – MG	1	11	1.360	240	900	460	21
Timóteo – MG	1, 4, 10	36	1.520	320	1.080	440	21
São Miguel Arcanjo – SP	1, 2	12	1.440	480	1.080	360	20
Itapeva – SP	1	18	1.440	480	1.080	360	20
Ipatinga – MG	1, 5	20	1.520	320	1.080	440	22
Litoral Norte – ES	1, 3	249	1.200	320	1.080	120	24
São José dos Campos – SP	1, 2	34	1.840	480	600	1.240	19
Paraibuna – SP	1, 2	18	1.840	480	540	1.300	20
Monte Dourado – PA	3	219	2.320	560	1.140	1.180	26

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (1999), resultados médios obtidos no período de 1931 a 1990; \* 1 – *Eucalyptus grandis*, 2 – *E. saligna*, 3 – *E. grandis* x *E. urophylla*, 4 – *E. cloesiana*, 5 – *E. urophylla*, 6 – *E. camaldulensis*, 7 – *E. citriodora*, 8 – *E. tereticornis*, 9 – *E. pellita*, 10 – híbridos; n (nº de árvores-amostra); P (precipitação pluvial média anual); PMS (precipitação média acumulada nos seis meses secos; de abril a setembro foram os seis meses secos para todos os locais, exceto para Monte Dourado-PA, cujo período seco foi de julho a dezembro, e para a Depressão Central-RS, definido de novembro a abril); EVP (evaporação, tanque Classe A); W (P – EVP, disponibilidade potencial de água); e T (temperatura média anual).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em todas as equações que estimam os conteúdos de N, P, K, Ca e Mg, observou-se que a biomassa apresentou relação positiva com os nutrientes, sendo uma variável muito importante para as referidas estimativas (Quadro 2). Relação positiva entre biomassa e nutrientes foi também obtida por vários pesquisadores (Novais & Barros, 1997; Santana et al., 1999). Entretanto, apesar da maior contribuição da biomassa para estimá-los, quando se têm, ao mesmo tempo, várias regiões em estudo, o seu uso isolado não foi suficiente para discriminar corretamente as variações dos conteúdos de nutrientes das árvores entre regiões. Por conseqüência, utilizaram-se outras variáveis independentes juntamente com a biomassa, para se obter melhor discriminação do conteúdo de nutrientes entre locais.

As equações do (Quadro 2) apresentam duas variáveis independentes relacionadas com a disponibilidade de água. A variável  $PMS/P$  é a relação entre a precipitação pluvial dos seis meses de maior restrição hídrica e a variável  $W$ , a disponibilidade potencial de água nos 12 meses do ano. A variável  $PMS/P$  apresentou relação positiva com o conteúdo dos nutrientes estudados, o que pode evidenciar a maior disponibilidade de água, a qual implica maior conteúdo de tais nutrientes nas árvores de eucalipto. A variável  $W$  apresentou menor contribuição para a estimativa do conteúdo de todos

os nutrientes, quando comparada com  $PMS/P$ . A estimativa do conteúdo de nutrientes foi diferente em função da variável  $W$ . O Ca e o Mg apresentaram relação positiva e o N, o P e o K, relação negativa (Quadro 2). Esta relação negativa não é normalmente esperada em sistemas biológicos. Ressalta-se que a interpretação isolada de uma das variáveis independentes utilizadas para estimar o conteúdo de nutrientes em um modelo de regressão linear múltiplo pode, por si só, não fazer sentido biológico. No entanto, ao apresentar significância estatística, o seu poder preditivo, associado às demais variáveis respeitando-se as amplitudes daquelas utilizadas na modelagem, leva à melhor estimativa do conteúdo de nutrientes.

O conteúdo dos nutrientes estimados variou entre as regiões, o que reflete a capacidade produtiva delas. Por exemplo, comparando-se N, P, K, Ca e Mg na parte aérea, entre a região de maior e a de menor conteúdo, aos 6,5 anos de idade, as diferenças foram de 266, 20, 192, 639 e 87 kg ha<sup>-1</sup>, ou 2,2; 2,2; 2,8; 5,8 e 4,0 vezes superiores, respectivamente (Quadros de 3, 4 e 5). Em geral, as estimativas dos nutrientes das plantas foram menores nas regiões de menor disponibilidade de água. Nessas regiões, tal fato, associado à alta demanda evaporativa, ocasiona déficits hídricos periódicos. A ação combinada desses fatores reduz a absorção e, conseqüentemente, o conteúdo de nutrientes e a biomassa. Resultados semelhantes foram obtidos por Turner et al. (1996), em estudos desenvolvidos na Austrália.

**Quadro 2. Equações para estimativa da biomassa (t/ha) e do conteúdo de nutrientes (kg/ha) na biomassa da parte aérea do eucalipto, em diferentes regiões do Brasil**

	Equação	R <sup>2</sup>
1	$B = e^{(-3,0505 - 0,4898 DX)ID + 1,3655 LnID + 0,1203 Ln(W+41) + 0,9051 LnT + 2,4326 LnPMS/LnP}$	0,85
2	$N = e^{(-0,62916 DX - 0,88154 DXI + 0,77518 LnB - 0,02044 Ln(41+W) + 0,4335 LnT + 0,97597 LnPMS/LnP}$	0,99
3	$P = e^{(-5,25609 - 0,52522 DX - 1,07605 DXI + 0,74743 LnB - 0,06894 Ln(41+W) + 0,36925 LnT + 5,13666 LnPMS/LnP}$	0,89
4	$K = e^{(-3,2875 - 0,39159 DX - 0,84712 DXI + 0,79452 LnB - 0,01945 Ln(41+W) + 0,23861 LnT + 5,06753 LnPMS/LnP}$	0,85
5	$Ca = e^{(-6,04274 - 0,24224 DX - 1,38063 DXI + 0,90858 LnB + 0,01512 Ln(41+W) + 0,22817 LnT + 8,32776 LnPMS/LnP}$	0,89
6	$Mg = e^{(-3,96257 - 0,4422 DX - 1,41166 DXI + 0,78123 LnB + 0,03003 Ln(41+W) + 0,07991 LnT + 4,94793 LnPMS/LnP}$	0,92

Fonte: Santana (2000) -  $DX$  variável *Dummy*,  $W$  = disponibilidade potencial de água (mm);  $T$  = temperatura média anual (°C);  $PMS$  = precipitação pluvial nos seis meses secos (mm);  $P$  = precipitação média anual, mm;  $B$  = biomassa (t/ha) da parte aérea ou do tronco ou do lenho aplicando-se  $DX = 0$ , para a estimativa da biomassa da parte aérea, ou  $DX = 1$ , para a estimativa da biomassa de tronco; Conteúdo de nutrientes (kg/ha) para  $N$ ,  $P$ ,  $K$ ,  $Ca$  ou  $Mg$  em que:  $DX = 0$  e  $DXI = 0$ , para obter o conteúdo de nutriente na biomassa da parte aérea;  $DX = 1$  e  $DXI = 0$ , conteúdo de nutriente na biomassa do tronco;  $DX = 0$  e  $DXI = 1$ , conteúdo de nutriente na biomassa do lenho.

Todos os coeficientes das equações, incluindo  $B_0$ , foram significativos a 1 %, exceto o coeficiente da variável  $LnT$  na equação de Mg, que foi significativo a 8 %).

**Quadro 3. Estimativas de biomassa<sup>(1)</sup> e de conteúdo<sup>(2)</sup> de nitrogênio em plantios de eucalipto com diferentes idades, em diferentes regiões do Brasil**

Região	Idade (ano)								
	4,5			6,5			8,5		
	Parte Área	Tronco	Lenho	Parte Área	Tronco	Lenho	Parte Área	Tronco	Lenho
	Biomassa (t ha <sup>-1</sup> )								
Três Marias – MG	41	37	32	68	63	55	98	92	80
Lençóis Paulista – SP	57	51	44	94	87	76	136	128	112
Luiz Antônio – SP	61	54	47	100	93	81	144	136	119
Carbonita – MG	63	57	49	105	97	85	151	143	124
Itamarandiba – MG	63	57	49	105	97	85	151	143	124
Bom Despacho – MG	70	63	55	116	108	94	168	158	138
Paraopeba – MG	70	63	55	116	108	94	168	158	138
Itapetininga – SP	75	67	58	123	114	100	178	168	146
Angatuba – SP	75	67	58	123	114	100	178	168	146
Depressão Central – RS	81	73	63	134	124	108	194	183	159
Guanhães – MG	75	67	58	124	115	100	178	168	146
Viçosa – MG	76	68	59	126	117	102	182	171	149
Timóteo – MG	82	74	64	135	126	109	195	184	160
São Miguel Arcanjo – SP	88	79	69	146	135	117	210	198	172
Itapeva – SP	88	79	69	146	135	117	210	198	172
Ipatinga – MG	86	77	67	141	131	114	204	192	167
Litoral Norte – ES	87	78	68	144	134	117	208	197	171
São José Campos – SP	94	84	73	155	143	125	223	211	183
Paraibuna – SP	95	85	74	157	146	127	227	214	186
Monte Dourado – PA	122	109	95	201	187	162	290	274	238
	Nitrogênio (kg ha <sup>-1</sup> )								
Três Marias – MG	147	72	50	217	109	76	288	147	103
Lençóis Paulista – SP	166	81	57	245	123	86	325	166	116
Luiz Antônio – SP	167	82	57	247	124	87	328	167	117
Carbonita – MG	184	90	63	271	137	95	361	184	128
Itamarandiba – MG	184	90	63	271	137	95	361	184	128
Bom Despacho – MG	190	93	65	280	141	98	372	190	132
Paraopeba – MG	190	93	65	280	141	98	372	190	132
Itapetininga – SP	202	99	69	297	150	104	395	201	140
Angatuba – SP	202	99	69	297	150	104	395	201	140
Depressão Central – RS	202	99	69	298	150	105	396	202	141
Guanhães – MG	203	100	69	300	151	105	399	203	142
Viçosa – MG	197	96	67	291	146	102	386	197	137
Timóteo – MG	215	106	74	318	160	111	422	215	150
São Miguel Arcanjo – SP	236	116	81	349	175	122	463	236	165
Itapeva – SP	236	116	81	349	175	122	463	236	165
Ipatinga – MG	227	111	78	335	169	118	445	227	158
Litoral Norte – ES	253	124	86	373	188	131	496	253	176
São José Campos – SP	234	115	80	346	174	121	459	234	163
Paraibuna – SP	238	117	81	352	177	123	467	238	166
Monte Dourado – PA	327	160	112	483	243	169	642	327	228

<sup>(1)</sup> e <sup>(2)</sup> Estimativas obtidas pelo uso das equações apresentadas no quadro 2. Para biomassa, considerou-se que o lenho corresponde a 87 % da biomassa de tronco; parte aérea = folha + galho + casca + lenho; e tronco = casca + lenho.

**Quadro 4. Estimativas do conteúdo<sup>(1)</sup> de fósforo e potássio em plantios de eucalipto com diferentes idades, em diferentes regiões**

Região	Idade (ano)								
	4,5			6,5			8,5		
	Parte <sup>(2)</sup> Área	Tronco	Lenho	Parte Área	Tronco	Lenho	Parte Área	Tronco	Lenho
kg ha <sup>-1</sup>									
Fósforo									
Três Marias – MG	14	8	4	20	11	6	26	15	8
Lençóis Paulista – SP	13	7	4	19	11	6	25	14	8
Luiz Antônio – SP	12	6	3	17	10	5	23	13	7
Carbonita – MG	14	8	4	20	11	6	27	15	8
Itamarandiba – MG	14	8	4	20	11	6	27	15	8
Bom Despacho – MG	13	7	4	19	10	5	25	14	7
Paraopeba – MG	13	7	4	19	10	5	25	14	7
Itapetininga – SP	17	9	5	25	14	7	32	18	10
Angatuba – SP	17	9	5	25	14	7	32	18	10
Depressão Central – RS	25	14	7	36	20	10	47	27	14
Guanhães – MG	14	8	4	21	12	6	27	16	8
Viçosa – MG	13	7	4	19	11	6	25	14	7
Timóteo – MG	16	9	5	23	13	7	31	17	9
São Miguel Arcanjo – SP	23	13	7	34	19	10	44	25	13
Itapeva – SP	23	13	7	34	19	10	44	25	13
Ipatinga – MG	17	9	5	25	14	7	32	18	10
Litoral Norte – ES	22	12	6	32	18	9	42	24	12
São José Campos – SP	19	11	5	28	16	8	37	21	11
Paraibuna – SP	20	11	6	28	16	8	37	21	11
Monte Dourado – PA	26	14	7	37	21	11	49	28	14
Potássio									
Três Marias – MG	73	46	26	109	70	40	146	95	54
Lençóis Paulista – SP	89	55	31	132	84	48	177	114	65
Luiz Antônio – SP	83	51	29	123	79	45	165	107	61
Carbonita – MG	94	58	33	140	89	51	188	121	69
Itamarandiba – MG	94	58	33	140	89	51	188	121	69
Bom Despacho – MG	93	58	33	139	88	50	186	120	68
Paraopeba – MG	93	58	33	139	88	50	186	120	68
Itapetininga – SP	125	77	44	186	119	67	249	161	91
Angatuba – SP	125	77	44	186	119	67	249	161	91
Depressão Central – RS	200	124	70	298	190	108	398	257	146
Guanhães – MG	105	65	37	156	99	56	209	135	76
Viçosa – MG	100	62	35	149	95	54	199	129	73
Timóteo – MG	122	76	43	182	116	66	244	158	89
São Miguel Arcanjo – SP	175	109	62	261	166	94	349	225	128
Itapeva – SP	175	109	62	261	166	94	349	225	128
Ipatinga – MG	128	79	45	191	121	69	255	165	94
Litoral Norte – ES	156	96	55	232	148	84	310	200	114
São José Campos – SP	156	96	55	232	148	84	310	200	114
Paraibuna – SP	158	98	56	236	150	85	315	203	116
Monte Dourado – PA	202	125	71	301	192	109	403	260	148

<sup>(1)</sup> Estimativas obtidas pelo uso das equações apresentadas no quadro 2; parte aérea = folha + galho + casca + lenho; e tronco = casca + lenho.

**Quadro 5. Estimativas do conteúdo<sup>(1)</sup> de cálcio e magnésio em plantios de eucalipto com diferentes idades, em diferentes regiões**

Região	Idade (ano)								
	4,5			6,5			8,5		
	Parte <sup>(2)</sup> Área	Tronco	Lenho	Parte Área	Tronco	Lenho	Parte Área	Tronco	Lenho
kg ha <sup>-1</sup>									
Cálcio									
Três Marias – MG	84	60	17	132	97	27	185	138	39
Lençóis Paulista – SP	122	87	25	193	142	40	269	201	57
Luiz Antônio – SP	112	79	22	176	129	36	246	183	52
Carbonita – MG	130	93	26	206	151	43	287	214	60
Itamarandiba – MG	130	93	26	206	151	43	287	214	60
Bom Despacho – MG	131	93	26	207	152	43	289	215	61
Paraopeba – MG	131	93	26	207	152	43	289	215	61
Itapetininga – SP	211	150	42	333	244	69	464	346	98
Angatuba – SP	211	150	42	333	244	69	464	346	98
Depressão Central – RS	489	347	98	771	565	160	1076	801	226
Guanhães – MG	155	110	31	244	179	51	341	254	72
Viçosa – MG	149	106	30	235	172	49	328	244	69
Timóteo – MG	201	143	40	317	232	66	442	329	93
São Miguel Arcanjo – SP	352	250	71	556	407	115	775	577	163
Itapeva – SP	352	250	71	556	407	115	775	577	163
Ipatinga – MG	211	150	42	333	244	69	465	346	98
Litoral Norte – ES	269	192	54	425	312	88	593	442	125
São José Campos – SP	300	213	60	473	347	98	660	492	139
Paraibuna – SP	306	217	61	482	354	100	673	501	142
Monte Dourado – PA	393	279	79	620	455	128	865	645	182
Magnésio									
Três Marias – MG	20	12	4	29	18	6	39	24	8
Lençóis Paulista – SP	29	17	6	43	26	9	57	35	12
Luiz Antônio – SP	29	17	6	42	26	9	56	35	12
Carbonita – MG	31	18	6	46	28	10	61	38	13
Itamarandiba – MG	31	18	6	46	28	10	61	38	13
Bom Despacho – MG	33	19	7	49	30	10	65	40	14
Paraopeba – MG	33	19	7	49	30	10	65	40	14
Itapetininga – SP	45	26	9	66	40	14	88	54	18
Angatuba – SP	45	26	9	66	40	14	88	54	18
Depressão Central – RS	78	46	16	116	70	24	154	95	32
Guanhães – MG	37	22	7	55	33	11	73	45	15
Viçosa – MG	37	22	7	55	33	11	73	45	15
Timóteo – MG	45	27	9	66	40	14	88	54	19
São Miguel Arcanjo – SP	64	38	13	94	57	19	126	77	26
Itapeva – SP	64	38	13	94	57	19	126	77	26
Ipatinga – MG	47	28	9	69	42	14	92	56	19
Litoral Norte – ES	53	31	11	78	47	16	104	64	22
São José Campos – SP	60	36	12	89	54	18	119	73	25
Paraibuna – SP	61	36	12	91	55	19	121	74	25
Monte Dourado – PA	74	44	15	110	66	23	146	90	31

<sup>(1)</sup> Estimativas obtidas pelo uso das equações apresentadas no quadro 2; parte aérea = folha + galho + casca + lenho; e tronco = casca + lenho.

As quantidades demandadas de nutrientes para produzir uma mesma biomassa em plantações de eucalipto permitem verificar se variações nas quantidades de nutrientes imobilizados na biomassa dependem mais da produção desta ou das condições de clima e solo de cada sítio. Assim, ao fixar uma mesma estimativa de biomassa da parte aérea ( $100 \text{ t ha}^{-1}$ ) nas equações preditivas para as diferentes regiões, foram estimadas variações na quantidade de nutrientes nela imobilizados (Quadro 6). As maiores variações entre as quantidades de nutrientes foram estimadas para o Ca e o Mg. Por outro lado, o N foi o nutriente que apresentou menor variação com um coeficiente de variação de 5,3 % entre regiões. Apesar das diferentes condições ambientais entre regiões, a estimativa de variação do conteúdo dos nutrientes na biomassa não foi ampla. Para N, P e K o coeficiente de variação foi inferior a 20 % entre regiões, sendo o maior coeficiente de 38,2 % para Ca.

A pequena variação no acúmulo de nutrientes na biomassa indicaria ou pequena plasticidade do eucalipto na absorção e acúmulo de nutrientes ou baixa disponibilidade dos mesmos no solo. Esta última possibilidade é a mais provável.

A determinação de nutrientes absorvidos ao longo dos anos é importante para definir a fase de maior demanda e, eventualmente, fertilizar no período mais crítico. Observou-se que a estimativa da distribuição relativa de todos os nutrientes na parte aérea aumentou linearmente e, praticamente, não houve alteração com a idade, seguindo a mesma tendência da distribuição de biomassa (Figura 1). De acordo com as equações preditivas, aproximadamente 70 % da demanda de todos os nutrientes acumula até à idade de 4,5 anos, para um ciclo de corte de 6,5 anos. Em geral, para o eucalipto, a ciclagem bioquímica torna-se mais expressiva a partir de, aproximadamente, 4,5 anos de idade, época em que a copa está totalmente desenvolvida e a ciclagem dos nutrientes contribui expressivamente para a demanda nutricional (Gonçalves et al., 2000), reduzindo, assim, a pressão sobre as reservas do solo. Segundo Miller (1995), após o estabelecimento da ciclagem bioquímica, até 66 % da demanda dos nutrientes considerados móveis pode ser suprida pela retranslocação, o que reduz a probabilidade de resposta à fertilização.

**Quadro 6. Estimativa do conteúdo<sup>(1)</sup> de N, P, K, Ca e Mg na biomassa da parte aérea de eucalipto, para a produção de  $100 \text{ t ha}^{-1}$ , em diferentes regiões**

Região	N	P	K	Ca	Mg
	kg $100 \text{ t}^{-1} \text{ ha}^{-1}$				
Três Marias – MG	293	27	149	188	40
Lençóis Paulista – SP	256	20	139	204	45
Luiz Antônio – SP	247	17	123	176	42
Carbonita – MG	262	20	135	197	44
Itamarandiba – MG	262	20	135	197	44
Bom Despacho – MG	250	17	123	181	43
Paraopeba – MG	250	17	123	181	43
Itapetininga – SP	253	21	157	275	56
Angatuba – SP	253	21	157	275	56
Depressão Central – RS	238	29	236	590	92
Guanhães – MG	255	18	132	202	46
Viçosa – MG	243	16	124	191	46
Timóteo – MG	251	19	143	241	52
São Miguel Arcanjo – SP	261	25	194	395	70
Itapeva – SP	261	25	194	395	70
Ipatinga – MG	256	19	145	243	53
Litoral Norte – ES	281	24	173	304	58
São José dos Campos – SP	246	20	164	319	63
Paraibuna – SP	248	20	164	320	64
Monte Dourado – PA	281	22	173	329	63
Amplitude	238 - 293	16 - 29	123 - 236	176 - 590	40 - 92
Média	257,3	21,8	154,2	270,2	54,5
CV (%)	5,3	16,9	19,0	38,2	23,9

<sup>(1)</sup> Estimativas obtidas pelo uso das equações apresentadas no quadro 2; parte aérea = folha + galho + casca + lenho.

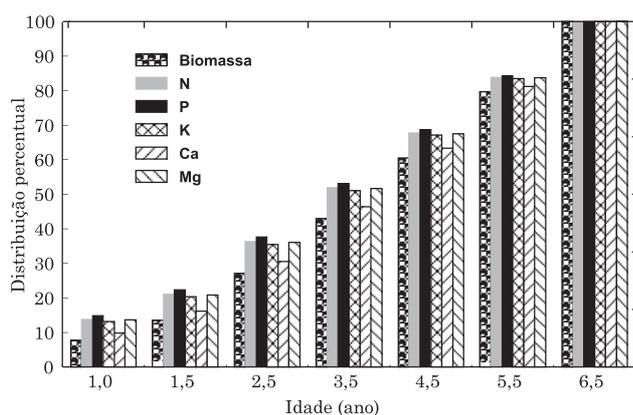


Figura 1. Distribuição relativa de biomassa e de nutrientes na parte aérea de eucalipto no Brasil, considerando a idade, assumindo 6,5 anos como idade de corte.

Segundo Novais et al. (1986), o nível crítico de manutenção refere-se ao teor do elemento que o solo deve ter, além do requerido para o crescimento e desenvolvimento inicial da muda, em condições de campo, para atingir determinada produtividade ao final do ciclo. Assim, para inferir sobre a fertilidade do solo em cada sítio, transformou-se o conteúdo de

nutrientes da planta em unidade de análise de solo. Baseado nesta estimativa, pode-se inferir que a fertilidade do solo provavelmente foi mais elevada nas regiões mais produtivas (Quadro 7). Os teores de K, Ca e Mg estimados para a região de Três Marias-MG, com produtividade de  $19,4 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , apresentaram-se abaixo dos valores de níveis críticos considerados adequados para produtividade de  $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , para a camada de 0 - 20 cm de solo, num ciclo de corte de dez anos, conforme sugerido por Novais et al. (1986). Este comportamento foi observado, por meio das estimativas, nas sete regiões de menor produtividade. Ao considerar apenas o K e o Ca, verificou-se que 13 das 20 regiões apresentaram teores inferiores aos do nível crítico de manutenção para as produtividades obtidas. Por conseguinte, o nível crítico de manutenção, ou seja, o teor de nutrientes no solo abaixo do qual há possibilidade de média a alta resposta à fertilização de manutenção indica que os plantios de eucalipto dessas regiões, provavelmente, responderão à aplicação de tais nutrientes. A produção obtida, apesar de os teores estimados estarem abaixo dos críticos, pode ser explicada pela possível exploração radicular abaixo dos 20 cm de profundidade ou uma maior eficiência de utilização dos nutrientes pelas árvores nesses sítios em comparação com os relatados por Novais et al. (1986).

Quadro 7. Incremento médio anual (IMA) de Biomassa e volume do tronco de eucalipto e teores de P, K, Ca e Mg no solo necessários para atender à demanda da árvore, de acordo com a região de cultivo

Região	IMA <sup>(1)</sup>		Nutriente <sup>(2)</sup>			
	Biomassa	Volume	P	K	Ca	Mg
	t ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>		cmolc dm <sup>-3</sup>	
Três Marias – MG	9,7	19,4	5,6	<b>35</b>	<b>0,24</b>	<b>0,07</b>
Lençóis Paulista – SP	13,4	26,8	5,4	<b>42</b>	<b>0,35</b>	<b>0,11</b>
Luiz Antônio – SP	14,3	28,6	4,8	<b>39</b>	<b>0,32</b>	<b>0,11</b>
Carbonita – MG	14,9	29,8	5,7	<b>45</b>	<b>0,38</b>	<b>0,11</b>
Itamarandiba – MG	14,9	29,8	5,7	<b>45</b>	<b>0,38</b>	<b>0,11</b>
Bom Despacho – MG	16,6	33,2	5,2	<b>44</b>	<b>0,38</b>	<b>0,12</b>
Paraopeba – MG	16,6	33,2	5,2	<b>44</b>	<b>0,38</b>	<b>0,12</b>
Itapetininga – SP	17,5	35,1	6,9	<b>59</b>	<b>0,61</b>	0,16
Angatuba – SP	17,5	35,1	6,9	<b>59</b>	<b>0,61</b>	0,16
Depressão Central – RS	19,1	38,2	10,0	95	1,41	0,29
Guanhães – MG	17,7	35,4	5,8	<b>50</b>	<b>0,45</b>	0,14
Viçosa – MG	18,0	36,0	5,3	<b>47</b>	<b>0,43</b>	0,14
Timóteo – MG	19,4	38,8	6,5	<b>58</b>	<b>0,58</b>	0,17
São Miguel Arcanjo – SP	20,8	41,5	9,4	83	1,02	0,24
Itapeva – SP	20,8	41,5	9,4	83	1,02	0,24
Ipatinga – MG	20,2	40,3	6,9	<b>61</b>	<b>0,61</b>	0,17
Litoral Norte – ES	20,6	41,2	8,9	<b>74</b>	0,78	0,19
São José dos Campos – SP	22,0	44,0	7,8	<b>74</b>	0,87	0,22
Paraibuna – SP	22,5	44,9	7,9	<b>75</b>	0,88	0,23
Monte Dourado – PA	28,8	57,5	10,4	96	1,13	0,27

<sup>(1)</sup> Valores estimados para árvores com 6,5 anos; relação matéria seca volume = 0,5; <sup>(2)</sup> nutrientes na biomassa do tronco, transformados em unidade de análise de solo, considerando a profundidade de solo de 0 a 20 cm, densidade igual a 1 e uma recuperação de 100 % do nutriente pelas árvores; os valores em negrito estão abaixo do nível crítico de manutenção para as diferentes produtividades sugeridos por Novais et al. (1986).

No outro extremo, na região de Monte Dourado-PA, com produtividade de  $57,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , os teores de nutrientes preditos apresentaram-se acima dos níveis críticos de manutenção, o que pode estar evidenciando baixa resposta à aplicação desses nutrientes. Em 16 das 20 regiões, os teores estimados para o K foram inferiores aos do nível crítico de manutenção. Portanto, para a manutenção de elevadas taxas de crescimento de eucalipto, especialmente em solos que suportam mais de uma rotação, deverá ser feita a fertilização potássica.

O conhecimento da alocação de nutrientes nos componentes das plantas permite ao silvicultor optar por técnicas de colheita que reduzam a exportação de nutrientes do sítio. Neste estudo, a predição da alocação diferiu entre os componentes e entre os nutrientes. O conteúdo de nutrientes na copa variou de 108 a 240  $\text{kg ha}^{-1}$ , para N, de 7 a 16, para P, de 39 a 109, para K, de 35 a 206, para Ca, e de 11 a 46, para Mg, considerando um ciclo de corte de 6,5 anos (Quadros de 3, 4 e 5). Em média, a alocação de N, P, K, Ca e Mg na copa foi de 50, 44, 36, 27 e 39 %, respectivamente, em relação à quantidade da biomassa da parte aérea (Quadro 8). Com o aumento da idade, notou-se tendência de redução dos nutrientes alocados na copa e aumento dos nutrientes alocados no tronco. Este resultado mostra a sensibilidade das equações adotadas a uma variação biológica conhecida, uma vez que com o aumento da idade a proporção de copa reduz e a de tronco aumenta.

**Quadro 8. Alocação percentual média de biomassa da parte aérea e de nutrientes nos diferentes componentes da árvore em plantios de eucalipto no Brasil, de acordo com a idade do povoamento**

	Idade ano	Copa <sup>(1)</sup> %	Tronco <sup>(1)</sup> %	Lenho <sup>(1)</sup> %	Casca <sup>(2)</sup> %
Biomassa	4,5	10	90	78	13
	6,5	7	93	81	13
	8,5	6	94	82	13
Nitrogênio	4,5	51	49	34	31
	6,5	50	50	35	30
	8,5	49	51	36	30
Fósforo	4,5	45	55	29	47
	6,5	44	56	29	48
	8,5	43	57	30	47
Potássio	4,5	38	62	35	43
	6,5	36	64	36	43
	8,5	35	65	37	43
Cálcio	4,5	29	71	20	72
	6,5	27	73	21	72
	8,5	26	74	21	72
Magnésio	4,5	41	59	20	66
	6,5	39	61	21	66
	8,5	38	62	21	66

Biomassa da parte aérea = folha + galho + casca + lenho; tronco = casca + lenho; e copa = folha + galho.

<sup>(1)</sup> percentagem em relação à biomassa da parte aérea e <sup>(2)</sup> percentagem em relação à biomassa de tronco.

Baseada na prognose obtida pelas equações, a biomassa da casca representa, em média, 13 % da biomassa do tronco (Quadro 8). Entretanto, contém 72 % de Ca, 66 de Mg, 47 de P, 43 de K e 30 de N do total de nutrientes exportados do sítio pela colheita do tronco. Considerando um ciclo de corte de 6,5 anos (Quadros de 3, 4 e 5), a amplitude de variação do conteúdo de nutrientes na casca foi, em  $\text{kg ha}^{-1}$ , de 70 a 405 (Ca), de 12 a 46 (Mg), de 5 a 10 (P), de 30 a 83 (K) e de 33 a 74 (N). A casca do eucalipto é importante no ciclo biogeoquímico, por ser dreno de nutrientes e por ser normalmente retirada do sítio pela colheita florestal.

Estudos em vários ecossistemas têm demonstrado expressiva redução no Ca trocável do solo, em virtude de sua absorção pelas florestas (Binkley, 1989; Federer et al., 1989). Para condições de clima tropical com solos altamente intemperizados, a exportação de nutrientes pode comprometer a produtividade futura em sítios pobres neste nutriente, se não for adotado um correto manejo florestal e da fertilidade do solo.

A imobilização de maior proporção de nutrientes na biomassa em relação à camada superficial do solo pode ser considerada um mecanismo de conservação de nutrientes em florestas tropicais. Esta imobilização pode evitar perda por erosão e lixiviação (Cuevas & Lugo, 1998) e contribui para aumentar o teor de nutrientes das suas camadas superficiais, visto que o sistema radicular do eucalipto explora camadas profundas do seu perfil e pode realocar os nutrientes para as camadas superficiais. A intensidade da colheita florestal adotada determina a quantidade de nutrientes exportados do sítio. Admitindo um ciclo de 6,5 anos, pode-se inferir, por meio das estimativas realizadas, que no tronco estão contidos 50 % de N, 56 de P, 64 de K, 73 de Ca e 61 de Mg da biomassa aérea. Estes percentuais podem ser sensivelmente reduzidos se ocorrer o descascamento no campo. A colheita apenas do lenho é ecologicamente mais correta para as condições tropicais de solos altamente intemperizados; quanto mais pobre for o solo, mais relevante será a permanência da casca, o que contribuirá para manter a qualidade e a capacidade produtiva dos solos.

## CONCLUSÕES

1. A proporção de biomassa da copa reduziu com a idade e a do tronco e do lenho aumentou.

2. A proporção média de biomassa da casca em relação à biomassa da parte aérea foi de 10 % e em relação à biomassa do tronco, de 13 %.

3. A maior proporção de todos os nutrientes (de 63 a 69 %) na biomassa acumulou-se até à idade de 4,5 anos, quando foi considerado um ciclo de corte de 6,5 anos.

4. Aproximadamente, 75 % de N, P, K, Ca e Mg estão em outros componentes da parte aérea da árvore, e não no lenho, evidenciando a importância do descascamento e manutenção da copa no campo.

### AGRADECIMENTOS

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos para realização deste trabalho.

À Universidade da Flórida (UFL), em particular ao Departamento de Solos e da Água, por possibilitar a realização deste trabalho na referida universidade.

Ao Programa de Pesquisa em Solos e Nutrição de Eucalipto do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, pela cessão dos dados utilizados neste trabalho.

### LITERATURA CITADA

- BARROS, N.F. & COMERFORD, N.B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2. p.487-592.
- BINKLEY, D. Contributing to 20-yr decrease in soil pH in an old-field plantation of loblolly pine. *Biogeochemistry*, v.8, p.39-54, 1989.
- CUEVAS, E. & LUGO, A.E. Dynamics of organic matter and nutrient return from litterfall in stands of ten tropical tree plantation species. *For. Ecol. Manag.*, 112:263-279, 1998.
- EPSTEIN, E. & BLOOM, A.J. Nutrição mineral de plantas: Princípios e perspectivas. Londrina, Planta, 2006. 402p.
- FEDERER, C.A.; HORNBECK, J.W.; TRITTON, L.M.; MARTIN, C.W.; PIERCE, R.S. & SMITH, C.T. Long-term depletion of calcium and other nutrients in Eastern U.S. forests. *Environ. Manag.*, 13:593-601, 1989.
- GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G. & GAVA, J.L. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M. & BENEDETTI, V., eds. Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba, IPEF, 2000. p.1-49.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. Disponível em: <<http://www.inmet.br> 1999>. Acesso em: 15 de mar. de 1999.
- LINDER, S.; MCMURTRIE, R.E. & LANDSBERG, J.J. Global change impacts on managed forests. In: WALKER, B. & STEFFEN, W., eds. Global change and terrestrial ecosystems. Cambridge, Cambridge University Press, 1996. p.275-290. (IGBP Book Series, 2)
- MILLER, H.G. The influence of stand development on nutrient demand, growth and allocation. *Plant Soil*, 168-169:225-232, 1995.
- NOVAIS, R.F. & BARROS, N.F. Sustainable agriculture and forestry production systems on acid soils: Phosphorus as a case-study. In: MONIZ, A.C.; FURLANI, A.M.C.; SCHAFFERT, R.E.; FAGERIA, N.K.; ROSOLEM, C.A. & CANTARELLA, H., eds. Plant-soil interactions as low pH: Sustainable agriculture and forestry production. Viçosa, MG, Brazilian Soil Science Society, 1997. p.39-51.
- NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. & NEVES, J.C.L. Interpretação de análise química do solo para o crescimento de *Eucalyptus* spp. – níveis críticos de implantação e de manutenção. *R. Árvore*, 10:105-111, 1986.
- PEREIRA, J.S.; MADEIRA, M.V.; LINDER, S.; ERICSSON, T.; TOMEÁ, M. & ARAUÁ J.M.C. Biomass production with optimized nutrition in *Eucalyptus globulus* plantations. In: PEREIRA, J.S. & PEREIRA, H., eds. Eucalyptus for biomass production. Brussels, Commission of the European Communities, 1994. p.13-30.
- RAISON, R.J.; MYERS, B.J. & BENSON, M.L. Dynamics of *Pinus radiata* foliage in relation to water and nitrogen stress I. Needle production and properties. *For. Ecol. Manag.*, 2:139-158, 1992.
- SANTANA, R.C. Predição de biomassa e alocação de nutrientes em povoamentos de eucalipto no Brasil. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2000. 56p.(Tese de Doutorado)
- SANTANA, R.C.; BARROS, N.F. & NEVES, J.C.L. Eficiência nutricional e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do Estado de São Paulo. *R. Árvore*, 26:447-457, 2002.
- SANTANA, R.C.; BARROS, N.F. & NEVES, J.C.L. Produção de biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do Estado de São Paulo. *Sci. For.*, 56:155-169, 1999.
- STAPE, J.L.; BINKLEY, D.; JACOB, W.S. & TAKAHASHI, E.N. A twin-plot approach to determine nutrient limitation and potential productivity in eucalyptus plantations at landscape scales in Brazil. *For. Ecol. Manag.*, 223:358-362, 2006.
- TURNER, J.; KNOTT, J. & LAMBERT, M.J. Fertilization of *Pinus radiata* after thinning: I. Productivity gains. *Austr. For.*, 59:7-12, 1996.

