

SEÇÃO IV - FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS

MINERALIZAÇÃO DE NITROGÊNIO EM ECOSSISTEMAS FLORESTAIS NATURAIS E IMPLANTADOS DO ESTADO DE SÃO PAULO⁽¹⁾

J. L. M. GONÇALVES⁽²⁾, K. C. F. S. MENDES⁽³⁾, C. M. SASAKI⁽³⁾

RESUMO

No presente estudo, foram usados povoamentos homogêneos de *Eucalyptus grandis* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, em diferentes estádios de crescimento, bem como fragmentos de florestas naturais de Cerrado e Mata Atlântica. Amostras de solo (0-15 cm) foram incubadas por períodos sucessivos de 3, 3, 4, 4, 6 e 10 semanas, num total de 30 semanas, sob condições aeróbias e anaeróbias, em laboratório (temperatura igual a 20°C). Em campo, amostras de solo foram incubadas *in situ* no período do inverno (início da primeira semana de 07/96) e verão (início da segunda semana de 12/96). As quantidades acumuladas de N mineralizado, em condições aeróbias e anaeróbias, mostraram uma relação exponencial com o tempo de incubação. A equação $N_t = N_0 + b/t$ ajustou-se melhor aos dados do que a equação proposta por Stanford & Smith (1972), $N_t = N_0 (1 - e^{-kt})$, em que N_0 é o N potencialmente mineralizável, N_t são as quantidades acumuladas de N mineralizado e t é o tempo de mineralização. Esta equação superestimou os valores de N_0 em vários sítios e condições de incubação, além de não modelar-se adequadamente aos dados. As quantidades totais de N_0 (camada 0-15 cm), sob condições aeróbias, foram, em média, de $103 \pm 53 \text{ kg ha}^{-1}$ de N e, sob condições anaeróbias, em média, de $281 \pm 175 \text{ kg ha}^{-1}$ de N. Acredita-se que as reservas médias de N dos sítios pesquisados sejam suficientes para três a cinco rotações de cultivo (7 anos cada) de *E. grandis*. Em condições de laboratório, em alguns sítios, as quantidades de N potencialmente mineralizável (N_0) foram maiores em solos sob mata nativa. Por exemplo, o N_0 estimado num fragmento de cerrado, em condições anaeróbias, 173 mg kg^{-1} de N no solo, foi superior ao obtido num florestamento de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, recém-implantado, 44 mg kg^{-1} de N no solo, o qual foi semelhante ao N_0 obtido em um florestamento de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com

⁽¹⁾ Recebido para publicação em abril de 1999 e aprovado em abril de 2001.

⁽²⁾ Professor do Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ/USP. Bolsista do CNPq. E-mail: jlmgonca@carpa.ciagri.usp.br

⁽³⁾ Mestre em Ciências Florestais, Departamento de Ciências Florestais, ESALQ/USP. E-mail: cmsasaki@carpa.ciagri.usp.br

20 anos de idade, 45 mg kg⁻¹ de N no solo. A floresta adulta de eucalipto foi capaz de manter no solo níveis de N₀ similares aos da floresta nativa. Tomando por base as razões N₀/N_t (N_t é o N total do solo), deduziu-se que apenas 5 a 15% do teor de matéria orgânica do solo é decomponível. Esta variação dependeu das características do solo, principalmente aquelas relacionadas com o teor e qualidade da matéria orgânica do solo (MOS) e sua textura. Relacionando as quantidades de N₀ (estimado no laboratório) com as quantidades de N mineralizadas (N_M) em campo, verificou-se grande potencial preditivo de N_M a partir de N₀.

Termos de indexação: *Eucalyptus*, *Pinus*, Cerrado, Mata Atlântica, solo florestal, nitrogênio, mineralização.

SUMMARY: NITROGEN MINERALIZATION IN NATURAL AND FOREST PLANTATION ECOSYSTEMS OF SÃO PAULO STATE

*This study analyzes homogenous stands of *Eucalyptus grandis* and *Pinus caribaea* var. *hondurensis* in different growth stages as well as fragments of natural vegetation of "Cerrado" and Atlantic Forest. The climatic, edaphic and floristic conditions of the chosen areas are representative of the native forests and forest plantations established at the Western plateau of the state of São Paulo. Soil samples (0-15 cm) were incubated under aerobic and anaerobic laboratory conditions by successive periods of 3, 3, 4, 4, 6 and 10 weeks in a total of 30 weeks. In both conditions, the accumulated amounts of mineralized N followed an exponential relationship with the incubation time. The equation $N_t = N_0 + b/t$ was better adjusted to the data than the equation proposed by Stanford & Smith (1972), $N_t = N_0 (1 - e^{-kt})$, where N_0 is the potentially mineralizable N, N_t is the accumulated amount of mineralized N and t is the time of mineralization. This equation overestimated the values of N_0 in several sites and incubation conditions, besides not modeling appropriately to the data. The use of the first equation to model the N mineralization kinetics is suggested. The N mineralization rates stabilized after 8 to 15 weeks of incubation. Under aerobic conditions, the total amounts of N_0 (layer 0-15 cm) were in the average of 103 ± 53 kg ha⁻¹ of N, and under anaerobic conditions, in the average of 281 ± 175 kg ha⁻¹ of N. Considering that the N_0 values obtained aerobically were underestimated, some of the main reasons may be: (a) the potential harmful effects of soil leaching with saline solution (CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹) on the microbial communities and (b) removal of great amount of soluble organic-N, potentially mineralizable, by leaching. The medium pools of N of the evaluated sites were estimated to be enough for 3 to 5 cultivation rotations (7 years each) of *E. grandis*. At the end of this period, response to N fertilization will probably be quite significant.*

*Index terms: *Eucalyptus*, *Pinus*, Brazilian savanna, Atlantic Forest, forest soil, Nitrogen, mineralization.*

INTRODUÇÃO

O Brasil possui atualmente cerca de cinco milhões de hectares reflorestados com plantações homogêneas, predominando as espécies do gênero *Eucalyptus* e *Pinus*. Essas florestas têm sido estabelecidas em áreas originalmente cobertas por vegetação clímax, do tipo Cerrado e Mata Atlântica. A médio e longo prazo, a sustentabilidade da produção das florestas plantadas corre sério risco, por causa da baixa fertilidade e pequenas reservas

de nutrientes dos solos usados para fins de reflorestamento, comumente, Latossolos de textura média e Neossolo Quartzarênico. Além disso, pouco se conhece sobre os potenciais impactos ocasionados pela substituição das florestas naturais por plantações florestais homogêneas sobre o ambiente. Como agravante, para elevar os índices de produtividade, os sistemas silviculturais usados são muito intensivos, contemplando, inclusive, o plantio de espécies florestais de rápido crescimento, com grande capacidade de extração e exportação de nutrientes (Gonçalves et al., 1997a).

Os teores de matéria orgânica e N-total do solo têm estreitas relações com os potenciais de mineralização dos solos. Teoricamente, quanto maior o potencial produtivo de biomassa do ecossistema, maior é o aporte de matéria orgânica do solo, conseqüentemente, maior a quantidade de N mineralizada e maior a disponibilidade de N, e vice-versa. Vários fatores influem na cinética de mineralização de N: textura, estrutura, temperatura, umidade, pH, fertilidade do solo, interação solo-planta etc. Pouco se sabe sobre a cinética e potencial de mineralização de N em ecossistemas florestais naturais, bem como sobre as alterações causadas nestas características pela substituição destes ecossistemas por plantações homogêneas de eucaliptos e pinus. Essas informações são fundamentais num plano de manejo sustentável do solo, tanto para florestas com fins de produção de matéria-prima (p. ex. madeira), como para áreas de preservação permanente em que se deseja recompor a floresta natural.

Alguns pesquisadores têm observado que, raramente, as plantações extensivas de florestas respondem à fertilização nitrogenada, sob condições de clima tropical e subtropical (Barros et al., 1990; Herbert & Schönau, 1990; Gonçalves et al., 1997a). Isto ocorre porque as diversas fontes naturais de N, principalmente a mineralização do N orgânico ao longo do ciclo da cultura, são suficientes para atender à demanda das árvores (Gonçalves et al., 1997b). Contudo, considerando as altas taxas de exportação de N (Bellote et al., 1980; Poggiani, 1985; Reis et al., 1987; Gonçalves, 1995) e o possível esgotamento das reservas de N orgânico potencialmente mineralizável, espera-se que as florestas manejadas intensivamente respondam à fertilização nitrogenada após vários ciclos de cultivo. O déficit de N é estreitamente relacionado com o esgotamento das fontes de C facilmente mineralizáveis, já que a dinâmica do N está intimamente relacionada com a do C (McGill & Christie, 1983). As pesquisas relativas a esse tema são raras em outros países com tradição florestal e praticamente inexistentes no Brasil.

Vários métodos para estimar as taxas de mineralização, absorção e lixiviação de N têm sido propostos em campo e em laboratório. Dentre os métodos de campo, a incubação seqüencial de colunas de solo pouco perturbadas tem sido indicada como o método mais adequado, seja por causar menor distúrbio no solo, seja por ser bastante sensível às variações ambientais (Nadelhofer et al., 1983; Raison et al., 1987; Binkley & Hart, 1989; Whynot & Weetman, 1991). Dentre os métodos de laboratório, as incubações aeróbias e anaeróbias de amostras de solo têm sido promissoras (Stanford & Smith, 1972; Pottker & Tedesco, 1979; Salcedo et al., 1985), permitindo a obtenção de índices de N mineralizado, de N potencialmente mineralizável e de taxas de mineralização de N e C bem

correlacionados com as quantidades de N absorvidas pelas plantas (Stanford et al., 1973; Lemos et al., 1988). Estes métodos fornecem uma boa estimativa das reservas de N mineralizável presentes por ocasião da amostragem e permitem estabelecer comparações entre os sítios, embora não reflitam as flutuações naturais que ocorrem sob condições de campo (Lamb, 1980; Hart & Binkley, 1985).

As seguintes vantagens do método anaeróbio de mineralização de N em relação ao método aeróbio foram constatadas por alguns pesquisadores ou puderam ser verificadas e deduzidas a partir desta pesquisa: (a) não há problemas relacionados com o estabelecimento de um nível ótimo ou de perdas de umidade durante o período de incubação, (b) maiores quantidades de N são mineralizadas em dado período de tempo, (c) temperaturas mais elevadas podem ser usadas, o que reduz o período de incubação, sem necessidade de se preocupar com a temperatura ideal para os microrganismos nitrificadores, (d) somente o $N-NH_4^+$ precisa ser analisado (Keeney 1982), (e) não há remoção de formas solúveis de N-orgânico durante o processo de lixiviação, como constatado por Gianello et al. (1995), (f) as soluções salinas usadas para a extração de $N-NH_4^+$ são mais concentradas (geralmente KCl $2\ mol\ L^{-1}$), assegurando a extração total ou quase total do N mineralizado, e (g) as práticas laboratoriais são mais simples e rápidas. As quantidades de N obtidas por este método têm apresentado boas correlações com as quantidades de N absorvidas pelas plantas (Keeney & Bremner, 1966; Sims et al., 1967; Sims & Blackmon, 1967; Cornforth & Walmsley, 1971; Ryan et al., 1971; Osborne & Storrier, 1976).

O presente estudo teve como objetivos: (a) caracterizar a cinética de mineralização de N e estimar as quantidades de N potencialmente mineralizável em plantações homogêneas de eucalipto e pinus, em áreas cobertas com florestas naturais de Cerrado e Mata Atlântica (Floresta Estacional Semidecidual), localizadas em vários municípios do estado de São Paulo; (b) determinar se o potencial de mineralização de N é suficiente para suprir as necessidades de N dessas plantações florestais; e (c) obter modelos matemáticos capazes de prever as quantidades de N mineralizadas em condições de campo a partir de dados obtidos em condições controladas de laboratório.

MATERIAL E MÉTODOS

Locais, características ambientais e coberturas florestais das áreas experimentais

Foram coletadas amostras de solo em 16 sítios florestais localizados nos municípios de Agudos, Ibicatu, Luis Antônio, Itatinga, Botucatu e Itararé,

no estado de São Paulo. Estes sítios foram selecionados por apresentarem fragmentos florestais de vegetação de Cerrado, Floresta Estacional Semidecidual e plantios comerciais de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, em diferentes estádios de crescimento (Quadros 1 e 2). As condições edafoclimáticas e florísticas das áreas escolhidas são representativas das matas nativas e plantações florestais estabelecidas no planalto ocidental paulista (bacia hidrográfica do Rio Paraná).

Em cada fragmento florestal de mata nativa, foi instalada uma parcela experimental com 900 m² (30 x 30 m). Nas áreas de eucalipto e pinus, foram instaladas parcelas constituídas por 121 plantas, ou seja, 11 linhas com 11 árvores cada. Todas as árvores das parcelas de eucalipto e pinus foram consideradas nas avaliações dendrométricas. Considerando uma área média de 7,5 m² por árvore, cada parcela ocupava uma área média de aproximadamente 910 m². Em todas as parcelas experimentais (eucalipto e pinus), foram avaliados o crescimento

Quadro 1. Sítio, município, tipo de clima, tipo de solo e cobertura vegetal (tipo, idade, incremento médio anual de volume sólido de madeira com casca - I.M.A.) onde foram coletados os solos para os experimentos de incubação

Sítio	Município	Clima ⁽¹⁾	Solo	Cobertura vegetal			Equipamento preparo solo
				Tipo	Idade	I.M.A.	
					ano	m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹	
1	Agudos - SP	Cwa	LVA ⁽³⁾	<i>Pinus caribaea</i> var <i>hondurensis</i>	0,3	-	Subsolador
2	Agudos - SP	Cwa	LVA ⁽³⁾	<i>Pinus caribaea</i> var <i>hondurensis</i>	20	35	Grade pesada
3	Agudos - SP	Cwa	LVA ⁽³⁾	Fragmento de Savana (floresta estacional; Cerrado) ⁽²⁾	-	-	-
4	Ibicatu - SP	Cwa	PV ⁽⁴⁾	Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, submontana ⁽²⁾	-	-	-
5	Ibicatu - SP	Cwa	PV ⁽⁴⁾	Cana-de-açúcar	≈ 1	50 t ha ⁻¹ ano ⁻¹	Arado, grade leve
6	Luis Antônio - SP	Cwa	LVA ⁽³⁾	Fragmento de Savana (floresta estacional; Cerrado) ⁽²⁾	-	-	-
7	Luis Antônio - SP	Cwa	LVA ⁽³⁾	<i>Eucalyptus grandis</i>	3,4	23	Subsolador, grade pesada
8	Luis Antônio - SP	Cwa	LVA ⁽³⁾	<i>Eucalyptus grandis</i>	3,4	19	Grade pesada
9	Luis Antônio - SP	Cwa	LVA ⁽³⁾	<i>Eucalyptus grandis</i>	0,3	-	Subsolador
10	Itatinga -SP	Cwa	LVA ⁽³⁾	<i>Eucalyptus grandis</i>	7	30	Grade "bedding"
11	Itatinga -SP	Cwa	LVA ⁽³⁾	<i>Eucalyptus grandis</i> (área reformada)	1	40	Subsolador
12	Botucatu - SP	Cwa	LVA ⁽³⁾	Fragmento de Savana (floresta estacional; Cerradão) ⁽²⁾	-	-	-
13	Botucatu - SP	Cwa	LVA ⁽³⁾	<i>Eucalyptus grandis</i>	0,3	-	Subsolador
14	Botucatu - SP	Cwa	LVA ⁽³⁾	<i>Eucalyptus grandis</i>	15 ⁽⁷⁾	35	Grade "bedding"
15	Itararé - SP	Cfa	LV ⁽⁶⁾	<i>Eucalyptus grandis</i>	9	50	Grade pesada
16	Itararé - SP	Cfa	LV ⁽⁶⁾	Fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, submontana ⁽²⁾	-	-	-

⁽¹⁾ Tipo de clima segundo a classificação de Köppen. ⁽²⁾ Tipo de vegetação nativa conforme Mapa de Vegetação do Brasil (IBGE, 1995).

⁽³⁾ LVA = Latossolo Vermelho-Amarelo álico textura média relevo plano e suave ondulado. ⁽⁴⁾ LV = Latossolo Amarelo distrófico textura média relevo plano e suave ondulado. ⁽⁵⁾ PV = Argissolo Amarelo distrófico textura arenosa/média relevo ondulado e suave ondulado. ⁽⁶⁾ LV = Latossolo Vermelho álico textura argilosa relevo suave ondulado e plano. ⁽⁷⁾ Povoamento manejado no sistema de talhadia, tendo sido realizado o primeiro corte raso aos oito anos de idade, atualmente a brotação está com sete anos de idade.

Quadro 2. Características físicas e químicas dos solos (na camada de 0-15 cm) dos 16 sítios estudados

Sítio	Argila ⁽¹⁾	Silte ⁽¹⁾	Areia ⁽¹⁾	M.O. ⁽²⁾	pH CaCl ₂ ⁽²⁾	P-resina ⁽²⁾	K ⁽²⁾	Ca ⁽²⁾	Mg ⁽²⁾	Al ⁽²⁾	H ⁽²⁾	S ⁽²⁾	T ⁽²⁾	V	m
g kg ⁻¹				mg dm ⁻³			mmolc dm ⁻³						—%—		
1	180	80	740	8	3,6	3	0,8	1	2	17	34	4	55	7	82
2	130	60	800	10	4,3	3	0,3	4	3	5	21	7	33	21	41
3	140	60	800	35	3,8	6	1,0	1	2	13	38	4	56	8	75
4	160	60	780	14	4,9	4	2,4	31	12	2	20	45	67	68	3
5	140	60	800	2	4,5	7	1,0	7	4	2	16	11	29	38	18
6	190	80	730	8	3,9	6	0,4	1	1	9	25	2	36	7	79
7	240	100	660	17	3,9	3	0,6	1	1	14	45	3	62	5	83
8	200	90	710	43	3,8	11	0,7	1	1	13	43	3	59	5	81
9	150	80	770	22	3,9	7	0,4	3	1	13	48	5	65	7	74
10	150	80	770	10	3,8	4	0,5	1	1	11	24	2	37	7	81
11	150	60	790	11	3,9	6	0,6	3	2	11	27	6	44	14	66
12	270	100	640	34	3,9	7	1,0	8	5	14	65	14	94	15	51
13	200	60	740	18	3,7	12	0,7	6	3	13	45	10	68	15	56
14	430	180	390	38	3,9	8	0,5	14	2	18	84	17	119	14	54
15	310	120	570	32	4,1	5	0,4	8	1	13	56	9	79	12	62
16	360	150	490	23	3,9	5	1,0	3	2	18	68	6	92	7	75

⁽¹⁾ EMBRAPA (1997). ⁽²⁾ Rajj et al. (1987).

em altura, em diâmetro à altura do peito (DAP), o fator de forma dos troncos e a sobrevivência das árvores. Com base nessas variáveis, estimou-se o incremento médio anual de volume sólido de madeira com casca (I.M.A.) de cada sítio florestal (Quadro 1).

Mineralização de N sob condições de laboratório

Em todos sítios florestais (Quadro 1), foram realizadas amostragens de solo na camada de 0-15 cm para as avaliações das taxas de mineralização de N sob condições de laboratório (incubação aeróbia e anaeróbia). Vinte amostras simples compuseram uma amostra composta, a qual foi seca à sombra, homogeneizada e passada em peneira com malha de 2 mm.

Mineralização aeróbia de N (conforme método de Stanford & Smith, 1972): Para a incubação aeróbia do solo, foram usados funis de polietileno com capacidade para 250 g de solo. Na parte inferior do funil, foi colocada uma bucha de lã de vidro com a finalidade de reter o solo. Em cada funil, foram incubados 60 g de solo misturados com 8 g de vermiculita (partículas entre 0,8 e 0,4 mm de diâmetro). Sobre a mistura solo-vermiculita foi colocada uma camada de lã de vidro, para evitar a dispersão do solo ao adicionar-se a solução extratora.

A extração do N mineralizado foi realizada percolando-se o solo com 200 mL de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, adicionando-se, a seguir, 50 mL de solução nutritiva, constituída de K₂SO₄ (0,0025 mol L⁻¹), MgSO₄ (0,002 mol L⁻¹) e Ca(H₂PO₄)₂, (0,005 mol L⁻¹). Não foi necessário retirar o excesso de solução com bomba

de vácuo, porque todas as amostras de solo apresentaram boa drenagem; esta etapa é fundamental para solos com mineralogia predominantemente caulínica e de argilas 2:1. Os funis foram cobertos com um filme de polietileno, para evitar perdas de água por evaporação, e incubados a uma temperatura estável de 20°C ± 1°C.

Após a extração inicial do N, os solos foram incubados por períodos sucessivos de 3, 3, 4, 4, 6 e 10 semanas, num total de 30 semanas. Após cada período de incubação, foram realizadas as mesmas operações descritas anteriormente.

Mineralização anaeróbia de N (conforme método de Waring & Bremner, 1964): Para a extração inicial de N no experimento de incubação anaeróbia, foram colocados 10 g de solo seco (< 2 mm) em tubos de centrífuga de 50 mL. Após a adição de 30 mL de KCl 2 mol L⁻¹, os tubos foram agitados por 45 min e centrifugados a 2.000 rpm, durante 15 min. Depois, as quantidades iniciais de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ foram determinadas no sobrenadante, conforme método descrito abaixo.

Para as incubações, foram acrescentados, nesses tubos de centrífuga, 30 mL de solução nutritiva constituída de: MgSO₄ (0,002 mol L⁻¹) e Ca(H₂PO₄)₂, (0,005 mol L⁻¹). Os tubos foram agitados manualmente até a dispersão dos solos e depois tampados com papel de alumínio, para prevenir perdas de água por evaporação e crescimento de algas.

A primeira extração de N foi realizada três semanas após o início da incubação, adicionando-se 5,2 g de KCl (sal anidro) a cada tubo de centrífuga, para obter uma concentração de 2 mol L⁻¹ de KCl. Os tubos foram agitados e centrifugados de forma

semelhante à usada para a extração do N presente antes da incubação. Estas operações foram realizadas após 3, 6, 10, 14, 20 e 30 semanas de incubação.

As determinações das concentrações de N-NH_4^+ e N-NO_3^- mineralizados nos extratos foram feitas com o emprego do Sistema de Análise em Fluxo – FIA – (Ruzicka & Hansen, 1975). O N-NH_4^+ foi determinado pelo método condutimétrico; o N-NO_3^- , pelo método colorimétrico, sendo os limites de detecção obtidos de 0,25 e de 0,05 $\mu\text{g mL}^{-1}$, respectivamente. Para calcular as concentrações de N-NH_4^+ e N-NO_3^- no solo, cada concentração obtida pelo sistema FIA foi multiplicado pelo volume de extrato e dividida pela massa de terra seca da amostra. Portanto, as concentrações de N-NH_4^+ e N-NO_3^- no solo foram expressas em mg kg^{-1} de terra seca. A densidade do solo foi utilizada para converter as concentrações de N mineral do solo em conteúdo por área (kg ha^{-1}).

Análise estatística: Tanto as incubações aeróbias como as anaeróbias foram realizadas, usando o delineamento experimental do tipo inteiramente casualizado, com 16 tratamentos (sítios florestais) e três repetições (amostras da camada de 0-15 cm de solo).

A cinética de mineralização de N, o N potencialmente mineralizável (N_0) e a constante de mineralização de N (k) foram modelados e estimados por uma equação exponencial recomendada por Stanford & Smith (1972). Estes pesquisadores, partindo da premissa de que apenas uma fração do N total do solo é potencialmente mineralizável, propuseram que o processo de mineralização de N segue uma cinética de primeira ordem, $dN/dt = -kN$, onde N é igual a $N_0 - N_t$; N_0 é igual ao N potencialmente mineralizável (mg kg^{-1} de solo); N_t é igual ao N mineralizado acumulado até o tempo t (semanas), e k é a constante de mineralização de N (semana^{-1}). Integrando esta expressão, obtém-se a seguinte equação linear:

$$\log(N_0 - N_t) = \log N_0 - kt/2,303, \text{ cuja forma} \\ \text{exponencial é } N_t = N_0(1 - e^{-kt}).$$

Conforme recomendação de Stanford & Smith (1972), antes de ajustar essa equação aos dados, o primeiro passo foi estimar N_0 pela equação: $1/N_t = 1/N_0 + b/t$, sendo b uma simples constante. Nesta estimativa, foi eliminada a quantidade de N obtida no t_0 , por ter sido mineralizado antes da incubação das amostras de solo. Após este passo, estimou-se k pela equação $\log(N_0 - N_t) = \log N_0 - kt/2,303$. O valor de N_0 estimado nesta equação não foi necessariamente igual ao N_0 estimado anteriormente.

Para descrever a cinética de mineralização de N e estimar N_0 , foi usada também a equação: $N_t = a + b/t$, em que N_t é o N mineralizado (mg kg^{-1} de solo), acumulado até o tempo t (semanas). Observa-se que, nesta equação, quando t tende para o ∞ , a relação b/t tende para 0, por conseguinte a é o valor máximo

de N_t , ou seja N_0 . Desta forma, a equação pode ser apresentada como: $N_t = N_0 + b/t$.

Mineralização, absorção e lixiviação de N no solo sob condições de campo

Amostragem: Em todos os sítios florestais, com exceção dos sítios 4, 5, 15 e 16, foram instalados no solo, aleatoriamente, seis conjuntos de três tubos de PVC (30 cm de comprimento e cinco cm de diâmetro, distantes no máximo 20 cm entre si) para quantificar o N mineralizado, absorvido e lixiviado na camada de 0-15 cm do solo, segundo método proposto por Raison et al. (1987). Seis tubos em cada parcela, um de cada conjunto, foram removidos e analisados imediatamente para as determinações das concentrações iniciais de N. Com relação aos restantes, seis tubos foram capeados para evitar as lixiviações e seis tubos foram deixados abertos. Estes tubos permaneceram no campo, incubados, por 45 dias e depois foram removidos. Esses procedimentos foram repetidos no período do inverno (início da primeira semana de 07/96) e verão (início da segunda semana de 12/96).

As amostras de solo removidas dos tubos de PVC capeados e abertos foram homogeneizadas, separadamente, duas a duas, em amostras compostas para as determinações de N-NH_4^+ e N-NO_3^- mineralizadas, absorvidas e lixiviadas. As amostras dos conjuntos de tubos 1 e 2, 3 e 4 e, 5 e 6 deram origem a três amostras compostas.

Para as análises químicas, 40 g de solo fresco foram agitados com 80 mL de $\text{KCl } 2 \text{ mol L}^{-1}$ por uma hora na temperatura ambiente. Os extratos foram filtrados e as concentrações de N-NH_4^+ e N-NO_3^- determinadas, conforme método descrito anteriormente. Subamostras de solo com 10 g foram submetidas à secagem a 105°C por 24 h para a determinação dos teores de umidade.

Estimaram-se, com esses procedimentos, as quantidades de N-NH_4^+ , N-NO_3^- e N total mineralizadas, absorvidas e lixiviadas, em kg ha^{-1} , nas camadas de solo compreendidas entre 0 e 15 cm.

Análise estatística: No campo, os seis conjuntos de tubos de PVC foram instalados no delineamento inteiramente casualizado, com três repetições (amostras compostas dos conjuntos de tubos 1 e 2, 3 e 4 e, 5 e 6). Para comparar os valores médios de N mineralizado, lixiviado e absorvido, utilizou-se o teste de Tukey ($p = 0,05$), após a análise de variância. Pelo teste t ($p = 0,05$), compararam-se os valores médios de N mineralizado, lixiviado e absorvido dos 12 sítios florestais, obtidos no inverno e no verão.

As quantidades de N mineralizado, lixiviado e absorvido no campo, obtidas nos dois períodos de incubação, foram correlacionadas entre si, com os teores de argila e matéria orgânica do solo e com os valores de N_0 , obtidos para as amostras de solo incubadas no laboratório (condições aeróbias e anaeróbias). Modelos de regressões múltiplas foram

ajustados, tendo N_0 , teores de argila e matéria orgânica do solo, como variáveis independentes, e N total mineralizado, no inverno e verão, como variáveis dependentes. Procurou-se com isso obter equações que possam prever as quantidades de N mineralizável no campo em diferentes ecossistemas florestais.

Demonstração dos cálculos adotados para a determinação das quantidades de N mineralizado, absorvido e lixiviado (segundo Raison et al., 1987).

As equações a seguir foram usadas para determinar as quantidades de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ mineralizado, absorvido e lixiviado no solo durante o período de amostragem (inverno e verão).

$$\Delta N-NH_4^+ = \text{amonificação líquida durante o período de incubação} = NH_4^+ - N_{e(t+1)c} - NH_4^+ - N_{b(t)}$$

$$\Delta N-NO_3^- = \text{nitrificação líquida durante o período de incubação} = NO_3^- - N_{e(t+1)c} - NO_3^- - N_{b(t)}$$

$$N_{\min} = \text{mineralização líquida de N durante o período de exposição} = \Delta N-NH_4^+ + \Delta N-NO_3^-$$

em que $NH_4^+ - N_{b(t)}$ e $NO_3^- - N_{b(t)}$ correspondem, respectivamente, aos teores de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ do solo no início do período experimental (tempo t), enquanto $NH_4^+ - N_{e(t+1)c}$ e $NO_3^- - N_{e(t+1)c}$ correspondem, respectivamente, aos teores de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ do solo após determinado período (tempo $t + 1$) de exposição, nos tubos que apresentavam a extremidade superior coberta (c).

Quando as taxas de amonificação e nitrificação líquidas no interior e no exterior dos tubos forem semelhantes, a quantidade de N absorvido (N_a) pela floresta durante o período de experimentação será dada por:

$$N_a = (N_{\min}) - (\text{DN-mineral natural do solo}) - (\text{perdas}) = [N_{e(t+1)c} - N_{b(t)}] - [N_{b(t+1)} - N_{b(t)}] - \text{perdas} = N_{e(t+1)c} - N_{b(t+1)} - \text{perdas}$$

em que $N_{e(t+1)c}$ é o teor de N-mineral do tubo com cobertura no fim do período de incubação e $N_{b(t)}$ e $N_{b(t+1)}$ referem-se aos teores de N mineral do solo no início e no fim do período de incubação, respectivamente.

As perdas constituem variações no teor de N-mineral (N_m), resultantes da lixiviação e denitrificação. A denitrificação é tida como zero, a menos que avaliações independentes indiquem o contrário. A lixiviação também é assumida como zero nos tubos cobertos (c), sendo máxima nos tubos não cobertos (o). Neste caso, a perda por lixiviação será dada por $[N_{e(t+1)c} - N_{e(t+1)o}]$ e, N_a pode ser simplificado da seguinte forma:

$$N_a = N_{e(t+1)c} - N_{b(t+1)} - N_{e(t+1)c} + N_{e(t+1)o} = N_{e(t+1)o} - N_{b(t+1)}$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cinética de mineralização de N e estimativa de N_0

A mineralização acumulada de N, em condições aeróbias e anaeróbias, mostrou relação exponencial com o tempo de incubação (Figuras 1, 2 e 3). A equação $N_t = N_0 + b/t$ ajustou-se melhor aos dados do que a equação proposta por Stanford & Smith (1972), $N_t = N_0 (1 - e^{-kt})$, embora os coeficientes de determinação, para as duas equações, tenham sido superiores a 90% ($p < 0,01$) (Figura 3). A equação proposta por Stanford & Smith (1972) superestimou os valores de N_0 em vários sítios e condições de incubação (Quadro 3), além de não se modelar adequadamente aos dados (Figura 3), o que também foi verificado por Cabrera (1993).

Projetando, imaginariamente, os dados observados de mineralização de N a valores bem elevados de tempo de incubação, constata-se que o somatório dos resíduos entre valores observados e estimados pela equação de Stanford & Smith (1972) é baixo, daí a explicação para os altos coeficientes de determinação encontrados por essas equações, apesar de não serem adequadamente ajustadas aos dados (Figura 3).

Diante do exposto, sugere-se o uso da equação $N_t = N_0 + b/t$ para modelar a cinética de mineralização de N. Para a estimativa de N_0 por meio desta equação, recomenda-se usar t igual a 20 semanas à temperatura de incubação média de 20°C. Menor período será necessário para temperaturas maiores (recomenda-se, no máximo, 28°C). No presente estudo, as taxas de mineralização de N estabilizaram após oito a 15 semanas de incubação. Nestes períodos, deve ter ocorrido, predominantemente, a mineralização de formas mais lábeis de N orgânico.

As quantidades de N_0 , sob condições aeróbias, estimadas pela equação $N_t = N_0 + b/t$, variaram de 12 a 89 $mg\ kg^{-1}$ de solo (36 a 214 $kg\ ha^{-1}$; considerando uma camada de 0-20 cm de solo e densidade do solo = 1,2 $g\ cm^{-3}$), com média de $43 \pm 22\ mg\ kg^{-1}$ de solo ($103 \pm 53\ kg\ ha^{-1}$). Sob condições anaeróbias, os valores de N_0 variaram de 40 a 269 $mg\ kg^{-1}$ de solo (96 a 646 $kg\ ha^{-1}$), com média de $117 \pm 73\ mg\ kg^{-1}$ de solo ($281 \pm 175\ kg\ ha^{-1}$) (Quadro 3). Os valores de N_0 obtidos sob condições anaeróbias foram, em média, 2,7 vezes maiores do que aqueles obtidos sob condições aeróbias.

Tomando por base que as estimativas de N_0 , nos dois métodos, foram feitas por meios biológicos, que espécies de *Eucalyptus* plantadas em solos semelhantes ao do presente estudo assimilam em sua biomassa aérea e radicular quantidades de N que variam comumente de 300 a 700 $kg\ ha^{-1}$ (idade de 6 a 8 anos) e que as maiores reservas de N estão na camada de 0-20 cm de solo (Gonçalves et al., 1997b; Salcedo et al., 1985), admite-se que os valores de N_0 obtidos aerobiamente estejam subestimados. Várias razões

Quadro 3. Teor de matéria orgânica (M.O.), C total (C_t), N total (N_t), N mineralizado em 30 semanas a 20°C (N_m), N potencialmente mineralizável (N₀) e constante de mineralização de N (k) na camada de 0-15 cm dos solos amostrados nos diversos sítios florestais

Síto	M.O.	C _t	N _t ⁽¹⁾	N _m	N ₀ ⁽²⁾	N ₀ ⁽³⁾	N ₀ /N _t ⁽⁴⁾	k ⁽²⁾
	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹			Incubação aeróbia		%	semana ⁻¹
1	8	4.507	451	36	46	39	9	0,032
2	10	5.562	556	28	35	30	5	0,035
3	35	20.093	2.009	59	76	65	3	0,029
4	14	7.972	797	31	69	35	4	0,015
5	2	1.383	138	10	15	12	9	0,026
6	8	4.849	485	21	26	23	5	0,032
7	17	9.764	976	25	34	26	3	0,033
8	43	24.781	2.478	30	44	32	1	0,030
9	22	12.835	1.284	20	29	21	2	0,033
10	10	5.533	553	28	38	31	6	0,029
11	11	6.247	625	30	41	33	5	0,029
12	34	19.899	1.990	85	122	89	4	0,033
13	18	10.151	1.015	45	53	48	5	0,041
14	38	21.784	2.178	81	111	83	4	0,034
15	32	18.787	1.879	56	68	60	3	0,038
16	23	13.518	1.352	53	83	57	4	0,027
Média	20	11.729	1.173	40	56	43	4	0,031
± s	13	7.284	728	22	30	22	3	0,006
Incubação anaeróbia								
1	8	4.507	451	43	57	44	10	0,040
2	10	5.562	556	44	50	45	8	0,052
3	35	20.093	2.009	167	343	173	9	0,018
4	14	7.972	797	106	120	107	13	0,057
5	2	1.383	138	77	149	86	62	0,017
6	8	4.849	485	39	46	40	8	0,049
7	17	9.764	976	105	150	110	11	0,032
8	43	24.781	2.478	107	151	113	5	0,032
9	22	12.835	1.284	73	103	76	6	0,033
10	10	5.533	553	50	69	53	10	0,034
11	11	6.247	625	63	86	66	11	0,033
12	34	19.899	1.990	269	465	269	14	0,026
13	18	10.151	1.015	75	87	75	7	0,056
14	38	21.784	2.178	249	392	244	11	0,030
15	32	18.787	1.879	164	249	166	9	0,031
16	23	13.518	1.352	214	345	205	15	0,030
Média	20	11.729	1.173	115	179	117	10	0,036
± s	13	7.284	728	75	136	73	10	0,012

⁽¹⁾ N total estimado considerando-se uma relação média C total: N total = 10 : 1, obtida por Kiehl (1979), para os mesmos solos no estado de São Paulo. ⁽²⁾ N potencialmente mineralizável e constante de mineralização de N estimados pela equação de Stanford & Smith (1972). ⁽³⁾ N potencialmente mineralizável estimado pela equação: $N_t = N_0 + b/t$. ⁽⁴⁾ N potencialmente mineralizável estimado por esta equação dividido por N_t.

podem ser apontadas, como, por exemplo, (a) os potenciais efeitos nocivos da lixiviação periódica do solo com solução salina (CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹) sobre a atividade das comunidades microbianas dos solos (Keeney, 1982), (b) a remoção, com as lixiviações, de grande quantidade de N-orgânico solúvel, potencialmente mineralizável e (c) perdas de N devidas à denitrificação.

Gianello et al. (1995), trabalhando com dez solos representativos do Rio Grande do Sul, verificaram que, em média, 37% do N-total lixiviado após 32 semanas de incubação aeróbia estavam em formas orgânicas solúveis. A despeito das evidências de que as quantidades de N mineralizado aerobiamente foram subestimadas, encontrou-se alta correlação entre os valores de N₀ obtidos,

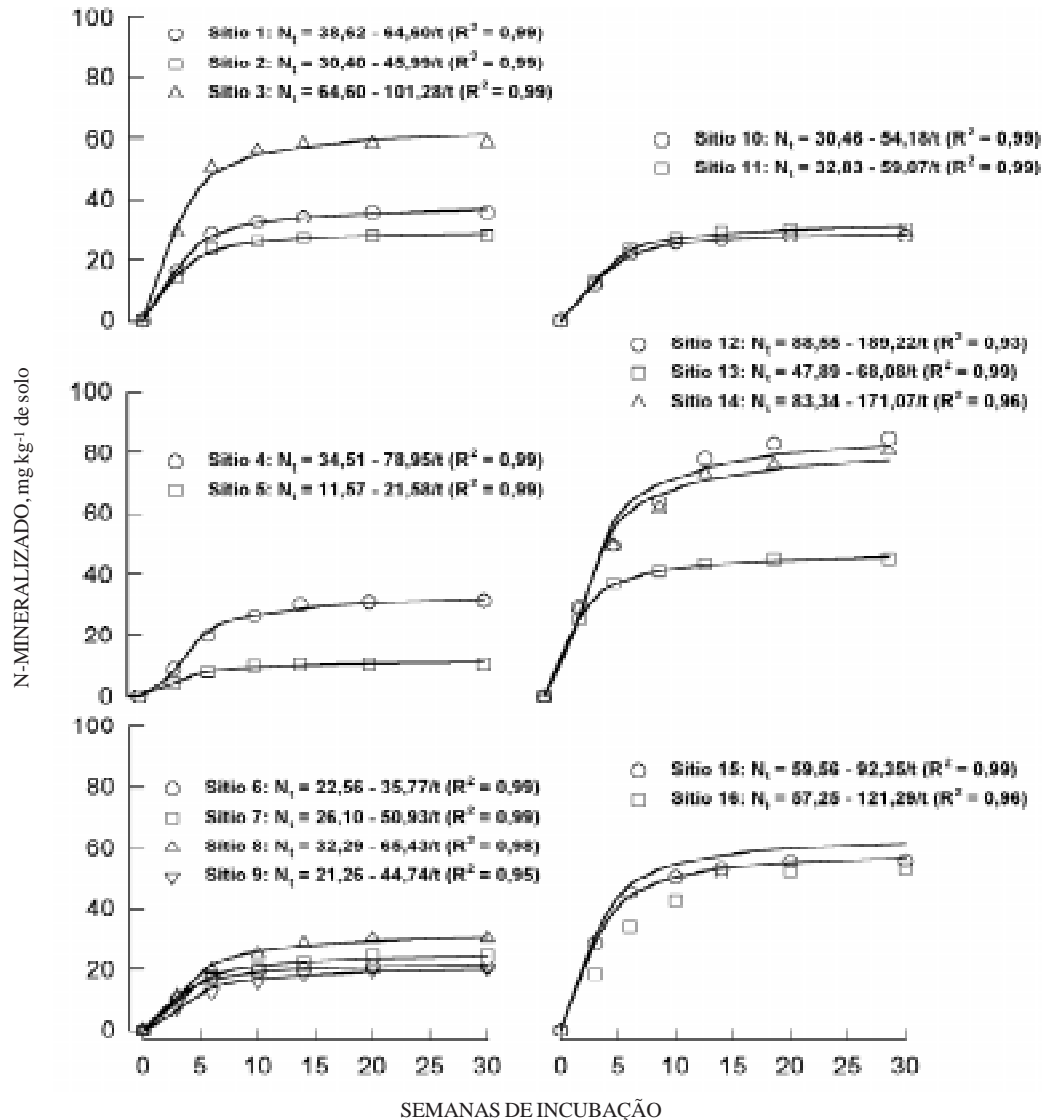


Figura 1. Curvas de mineralização aeróbia de N para a camada de 0-15 cm dos solos amostrados nos diversos sítios florestais. Todos os valores dos coeficientes de determinação são significativos a 1%.

aeróbia e anaeróbia, $r = 0,87$ ($n = 16$; $p = 0,05$); além disso, em ambos os métodos, a cinética de mineralização de N ajustou-se bem a um mesmo modelo de regressão (Figuras 1 e 2), o que evidencia serem os processos de mineralização de N semelhantes, com exceção dos índices de mineralização, provavelmente pela presença de mais fatores limitantes quando usado o método aeróbio.

As razões entre as percentagens de N_0 , estimadas em condições anaeróbias, e ao N_t (N-total) variaram, em sua maioria, entre 5 e 15%, maiores do que as estimadas em condições aeróbias, 3 a 9% (Quadro 3). Tomando por base essas razões, deduz-se que apenas 5 a 15% do teor de matéria orgânica do solo, principal fonte de N para as árvores, são decomponíveis. Esta variação dependeu da qualidade do sítio, principal-

mente aquelas relacionadas com o teor e qualidade da matéria orgânica do solo (MOS) e sua textura.

Os teores de argila e de MOS foram significativamente correlacionados com os valores de N_0 (estimado pela equação $N_t = N_0 + b/t$), em ambas as condições de incubação, sendo iguais a 0,72 e a 0,80, respectivamente, todos com $p < 0,01$, quando N_0 foi obtido em condições anaeróbias (Quadro 4).

Considerando apenas a exportação média de N em vários povoamentos de *E. grandis* (via madeira descascada) no estado de São Paulo, cerca de $120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ rotação}^{-1}$ (de sete anos) (Gonçalves, 1995), deduz-se que os estoques de N da camada de solo de 0-20 cm devem ser suficientes para apenas duas a três rotações de cultivo (sete anos cada).

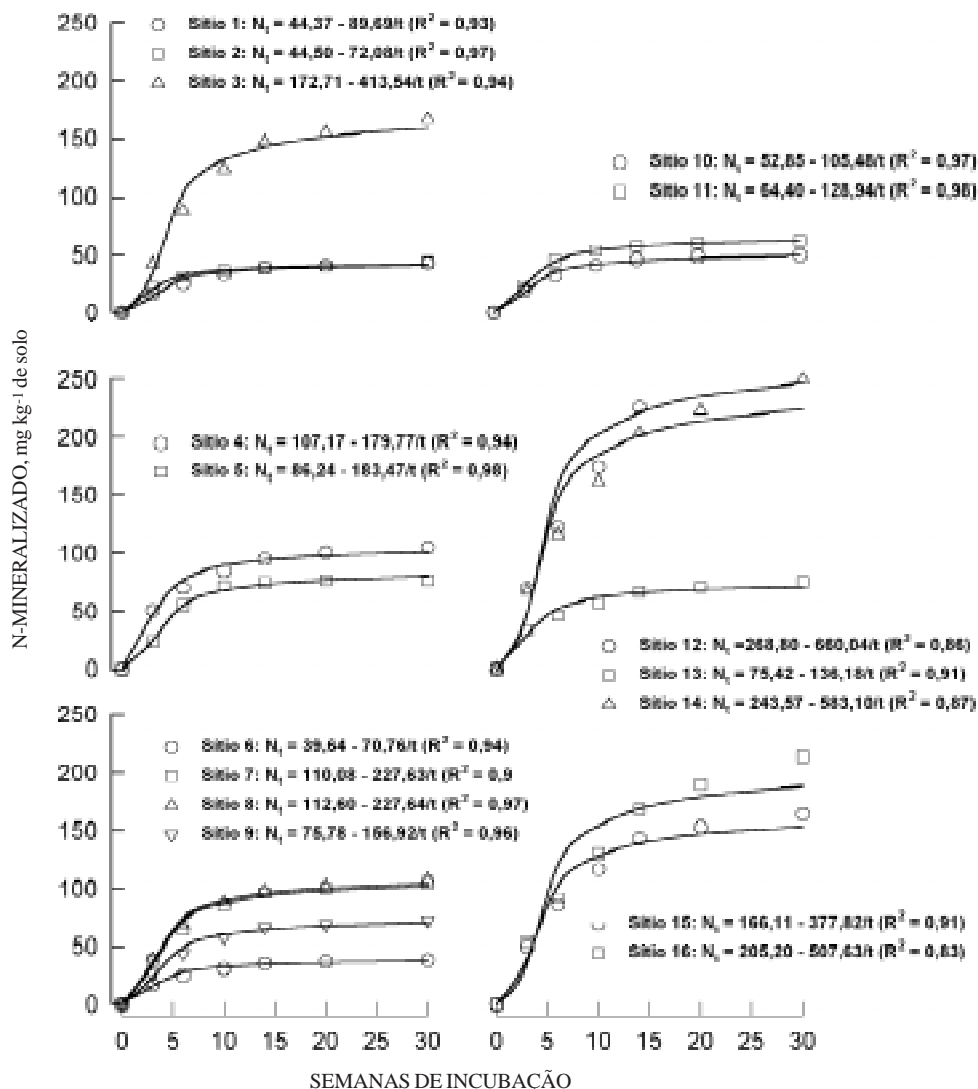


Figura 2. Curvas de mineralização anaeróbica de N na camada de 0-15 cm dos solos amostrados nos diversos sítios florestais. Todos os valores dos coeficientes de determinação são significativos a 1%.

Adicionalmente, admitindo que em camadas de solo inferiores a 20 cm também seja absorvida certa quantidade de N (bem inferior à camada superior), sejam realizadas adubações nitrogenadas equivalentes a 50-60 kg ha⁻¹ rotação⁻¹ (cerca de 40 a 50% de aproveitamento pelas árvores) e que, por meio das chuvas, sejam depositados cerca de 8-10 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, acredita-se que estas fontes de N devam ser suficientes para mais 1 a 1,5 rotações de cultivo. Portanto, estima-se que as reservas médias de N dos sítios pesquisados devam ser suficientes para três a cinco rotações de cultivo de *E. grandis*. No fim deste período, é provável que as respostas à adubação nitrogenada sejam bastante significativas.

Tendo em vista os resultados obtidos, considera-se o método de mineralização anaeróbica de N mais

recomendado, em análises laboratoriais de rotina, para a determinação da cinética de mineralização de N e estimativa de N_0 . A curva de mineralização de N e o valor de N_0 podem ser satisfatoriamente estimados em sucessivos períodos de incubação de duas semanas num período de tempo total igual a oito semanas, ao invés de 30 semanas, a uma temperatura de equilíbrio maior do que 20°C (como, por exemplo, 28°C).

Efeito da cobertura vegetal sobre as formas de N e quantidades de N_0 (condição anaeróbica)

Em alguns sítios, a presença da mata nativa resultou em maiores quantidades de N potencialmente mineralizável (N_0). Por exemplo, o N_0 estimado para o sítio 3 (fragmento de Cerrado), em

condições anaeróbicas, 173 mg de N kg⁻¹ de solo, foi superior ao do sítio 1 (florestamento de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, recém-implantado, com 0,3 ano de idade), 44 mg de N kg⁻¹ de solo, o qual foi semelhante ao N₀ obtido no sítio 2 (florestamento de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, com 20 anos de idade), 45 mg de N kg⁻¹ de solo (Quadro 3). Esses sítios apresentam o mesmo tipo de solo (Quadro 1), além de características granulométricas e químicas similares (Quadro 2). O maior N₀ obtido no sítio 3 deve-se, provavelmente, ao maior teor de MOS, 35 g kg⁻¹ de solo, comparativamente a 10 e 8 g kg⁻¹ de solo, respectivamente, para os sítios 2 e 1 (Quadro 3). O maior teor MOS no sítio 3 deve ter sido proporcionado pela maior produção líquida de matéria orgânica proveniente da decomposição de raízes, principalmente as finas, e incorporação ao solo de parte da serapilheira, pela atividade da fauna do solo. Coerentemente, no sítio 3, também foi encontrada maior quantidade de N total (N_t), bem como maior razão N₀:N_t (Quadro 3). Esta é uma evidência de que as formas de N contidas na MOS do sítio 3 devem ser mais decomponíveis, provavelmente em decorrência de maiores teores de aminoácidos, ácidos nucléicos e hexoaminas,

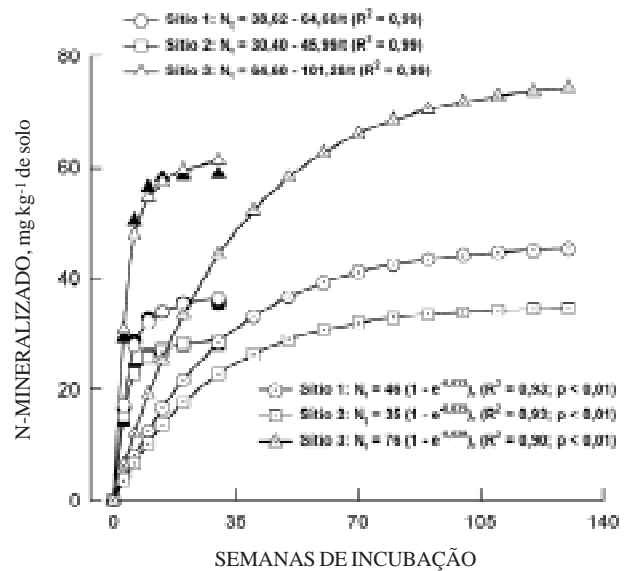


Figura 3. Dados experimentais de mineralização aeróbica de N dos sítios florestais 1, 2 e 3, e valores estimados pela equação $N_t = N_0 (1 - e^{-kt})$, proposta por Stanford & Smith (1972), comparativamente aos estimados pela equação $N_t = N_0 - b/t$.

Quadro 4. Coeficientes de correlação linear simples (r), e seus respectivos níveis de significância, entre quantidades totais de nitrogênio mineralizado, lixiviado e absorvido, no inverno e verão, e algumas características do solo (camada de 0-15 cm)

Variável	MOS	Argila	N ₀	N _{AV}	N _{AI}	N _{LV}	N _{LI}	N _{MV}
N mineralizado no inverno (N _{MI}) (mg kg ⁻¹)	0,39 ns	0,85 < 0,01	0,61 0,03	-0,13 ns	0,81 < 0,01	0,58 0,05	0,97 < 0,01	0,48 ns
N mineralizado no verão (N _{MV}) (mg kg ⁻¹)	0,58 0,05	0,43 ns	0,48 ns	0,42 ns	0,10 ns	0,96 < 0,01	0,56 0,05	
N lixiviado no inverno (N _{LI}) (mg kg ⁻¹)	0,35 ns	0,85 < 0,01	0,51 0,09	-0,06 ns	0,65 0,02	0,66 0,02		
N lixiviado no verão (N _{LV}) (mg kg ⁻¹)	0,57 0,05	0,53 0,08	0,51 0,09	0,20 ns	0,15 ns			
N absorvido no inverno (N _{AI}) (mg kg ⁻¹)	0,34 ns	0,66 0,02	0,69 0,01	-0,22 ns				
N absorvido no verão (N _{AV}) (mg kg ⁻¹)	0,08 ns	-0,14 ns	-0,11 ns					
N ₀ (condições anaeróbicas) (mg kg ⁻¹)	0,80 < 0,01	0,72 < 0,01						
Teor de argila (g kg ⁻¹)	0,51 0,09							
Teor de matéria orgânica MOS (g dm ⁻³)	1,00 < 0,01							

compostos mais comuns em florestas nativas de folhas largas (com grande diversidade de espécies, inclusive leguminosas) relativamente a povoamentos homogêneos de *Pinus* (Carlyle, 1986).

Os sítios 4 (fragmento de Floresta Estacional Semidecidual, submontana) e 5 (área usada há vários anos com cultivo agrícola, atualmente com plantação de cana-de-açúcar), próximos entre si, apresentaram teores de N_0 completamente distintos, 107 e 86 mg kg⁻¹ de solo, respectivamente (Quadro 3). Grandes diferenças também foram observadas para o nível de fertilidade do solo (camada de 0-15 cm): o sítio 4 apresentou-se mais fértil, com níveis de MOS e de N_t muito superiores aos do sítio 5 (Quadro 2). Aqui fica bem caracterizado o efeito depressivo de vários ciclos de cultivo agrícola sobre os níveis de MOS e nutrientes disponíveis, causado por perdas, como erosão, lixiviação, volatilização e exportação de nutrientes por colheita maior do que a reposição via adubação. Efeitos semelhantes têm sido relatados por outros pesquisadores (Carlyle et al., 1990).

Nos sítios 12 (fragmento de Cerradão) e 14 (florestado com *Eucalyptus grandis* há 15 anos), as quantidades de N_0 foram muito superiores às do sítio 13 (florestado com *Eucalyptus grandis*, recém-reformado, há 0,3 ano) (Quadro 3). Esses resultados destacam o grande efeito de florestas adultas sobre os estoques de N_0 , principalmente pelas grandes quantidades de N ciclado biogeoquimicamente. Observa-se que a floresta adulta de eucalipto foi

capaz de manter no solo níveis de N_0 similares aos da floresta nativa, típica da área, e que houve uma depleção muito grande da quantidade de N_0 com o corte raso da floresta, ocorrido poucos meses antes (cerca de seis meses). O mesmo efeito não foi observado nos sítios com povoamento de *Pinus* (sítios 1 e 2) relativamente ao fragmento de mata nativa localizado ao lado (sítio 3), como já discutido. Isto se deve, provavelmente, às maiores quantidades de N ciclado biogeoquimicamente em plantações de *Eucalyptus* (Reis & Barros, 1990) e às menores taxas de decomposição de resíduos vegetais de *Pinus* (Poggiani, 1985). Valores semelhantes de N_0 para plantações de *Eucalyptus* e mata nativa do tipo 'Cerrado' também foram observados entre os sítios 15 e 16 e sítios 6 a 9 (Quadro 3).

Sob condições aeróbias, a razão média N-NH₄⁺:N-NO₃⁻, quando se considera a média de todos os sítios foi igual a 3,6 ± 1,8; sob condições anaeróbias, não foi encontrado N-NO₃⁻ (Quadro 5). A predominância de N-NH₄⁺ em solos sob florestas, assim como a absorção desta fonte de N, também foi verificada por Smethurst & Nambiar (1990), Gonçalves & Carlyle (1994), Serrano (1997), Gonçalves et al. (1997b). A magnitude do processo de nitrificação em povoamentos florestais é pequena em relação àquela verificada na maioria das áreas usadas para fins agrícolas, decorrente da grande absorção de N-NH₄⁺ pelas árvores – substrato das bactérias nitrificadoras – e das condições adversas dos vários solos usados

Quadro 5. Quantidades médias de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ mineralizadas na camada de 0-15 cm de solo, sob condições aeróbias de laboratório, ao longo de 30 semanas de incubação, para os diversos sítios florestais

Sítio	Tempo de incubação (semanas)												Mineralização total		NH ₄ ⁺ :NO ₃ ⁻
	0-3		3-6		6-10		10-14		14-20		20-30		N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	
	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻			
mg kg ⁻¹															
1	15,3	1,4	10,1	1,8	1,6	2,4	0,4	0,9	1,4	0,2	0,0	0,0	28,8	6,7	4,3
2	13,8	0,8	8,0	1,1	1,2	1,3	0,4	0,6	0,0	0,8	0,0	0,2	23,3	4,8	4,9
3	25,2	4,0	16,2	4,9	0,7	5,3	0,0	1,8	0,0	0,3	0,0	0,3	42,1	16,6	2,5
4	3,3	5,4	5,1	5,9	0,7	5,9	0,0	3,8	0,0	0,8	0,0	0,3	9,2	22,1	0,4
5	2,2	2,0	1,7	2,0	0,4	1,3	0,0	0,5	0,0	0,2	0,0	0,0	4,4	6,0	0,7
6	8,9	1,4	6,0	1,2	0,7	1,3	0,0	0,6	0,4	0,4	0,0	0,0	15,9	4,9	3,3
7	8,4	1,1	6,2	1,3	1,1	2,0	1,3	1,0	1,1	0,9	0,0	0,1	18,1	6,4	2,8
8	10,4	0,8	7,6	1,0	4,5	0,6	2,7	0,6	1,2	0,5	0,0	0,1	26,5	3,6	7,4
9	5,8	1,3	4,0	1,2	2,3	1,0	2,0	0,7	1,2	0,2	0,0	0,6	15,3	5,1	3,0
10	11,5	0,6	9,1	0,7	2,6	1,2	0,0	0,9	0,5	0,8	0,0	0,0	23,7	4,1	5,7
11	12,3	0,6	8,3	2,0	1,4	2,6	1,3	0,6	0,5	0,2	0,0	0,2	23,9	6,2	3,8
12	28,7	0,9	17,9	2,2	11,2	2,9	11,7	2,6	3,1	2,0	0,0	1,7	72,5	12,3	5,9
13	23,7	1,3	9,8	2,1	1,0	3,1	0,0	2,5	0,5	0,7	0,0	0,1	35,0	9,8	3,6
14	28,5	0,7	16,5	4,1	5,7	6,4	4,9	6,6	1,0	1,8	0,0	4,3	56,6	23,9	2,4
15	26,1	2,2	13,5	3,6	0,0	4,7	0,0	2,9	0,0	2,3	0,0	0,3	39,6	16,1	2,5
16	17,2	1,1	13,9	1,7	5,9	2,9	5,6	3,3	0,0	0,8	0,0	0,7	42,6	10,4	4,1
Média	15,1	1,6	9,6	2,3	2,6	2,8	1,9	1,9	0,7	0,8	0	0,6	29,8	9,9	3,6
±S	8,9	1,3	4,8	1,5	2,9	1,8	3,2	1,7	0,8	0,7	0	1,1	17,7	6,5	1,8

para fins florestais, tais como: a baixa fertilidade natural e a elevada acidez. Na maioria dos solos usados para fins florestais, a demanda por N pelos organismos heterotróficos é tão grande, em resposta à disponibilidade de C, que sobra pouco $N-NH_4^+$ dos processos de mineralização da matéria orgânica para serem nitrificados (Jansson, 1958; Paul & Juna, 1981; Attiwill & Leeper, 1987). A maior parte do $N-NH_4^+$ é absorvida ou imobilizada. Os únicos solos que apresentaram razão média $N-NH_4^+ : N-NO_3^-$ inferior a 1 foram os dos sítios 4 e 5, cujos valores de saturação por bases e de pH foram mais elevados.

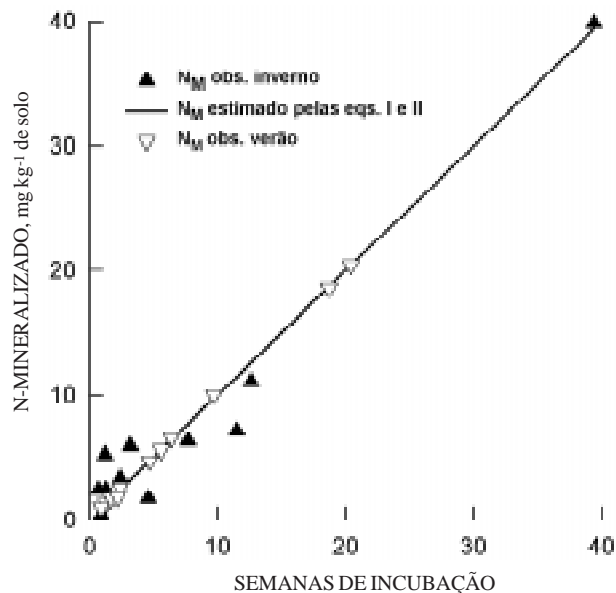
Sob condições de campo, as quantidades de N mineralizado (N_M), lixiviado (N_L) e absorvido (N_A) na camada de 0-15 cm de solo foram superiores no verão em seis, sete e três dos sítios florestais pesquisados, respectivamente, e inferiores nos demais sítios (Quadro 6). Não foram obtidas explicações plausíveis para este comportamento díspare entre sítios. Seriam necessários vários anos de amostragem sazonal do solo, com amplas variações climáticas, para fazer afirmações mais consistentes. Gonçalves et al. (1997b), ao longo de

dois anos de amostragens periódicas do solo (09/95 a 08/97; nas camadas de 0-5, 5-15 e 15-30 cm), observaram pequenas variações estacionais nas quantidades de N mineralizado, lixiviado e absorvido em povoamentos de *Eucalyptus grandis*, submetidos a diferentes métodos de manejo do solo, após oito meses do plantio. Nos oito meses iniciais pós-plantio, eles verificaram grandes diferenças estacionais e entre tratamentos na dinâmica de N no sistema.

No inverno, as quantidades de N_M mostraram-se altamente correlacionadas com o teor de argila do solo ($r = 0,84$; $p < 0,01$), medianamente correlacionadas com os valores de N potencialmente mineralizável sob condições anaeróbias (N_0) ($r = 0,61$; $p = 0,04$), e não correlacionadas com os teores de MOS ($r = 0,39$; $p = 0,20$). Por outro lado, as quantidades de N_M no verão só foram correlacionadas com o teor de MOS ($r = 0,58$; $p = 0,05$) (Quadro 4). As quantidades de N_M , N_L e N_A obtidas no inverno foram altamente correlacionadas entre si; no verão, N_M só se correlacionou com N_L , não se correlacionando com N_A . Relacionando as quantidades de N potencialmente mineralizáveis sob

Quadro 6. Quantidades médias de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ (mineralizado, lixiviado e absorvido) e relação $N-NH_4^+ : N-NO_3^-$, em condições de campo, no período do inverno (início na primeira semana de 07/96; 45 dias de incubação) e no período do verão (início na segunda semana de 12/96; 45 dias de incubação), na camada de 0-15 cm de solo

Sítio	Mineralizado			Lixiviado			Absorvido					
	$N-NH_4^+$	$N-NO_3^-$	N-total	$N-NH_4^+ : N-NO_3^-$	$N-NH_4^+$	$N-NO_3^-$	N-total	$N-NH_4^+ : N-NO_3^-$	$N-NH_4^+$	$N-NO_3^-$	N-total	$N-NH_4^+ : N-NO_3^-$
	kg ha ⁻¹				kg ha ⁻¹				kg ha ⁻¹			
Inverno (7/96)												
1	4,1	0,5	4,6 d	8,2	2,1	0,1	2,2 d	21,0	2,0	0,3	2,6 b	6,7
2	11,5	0,1	11,5 b	115,0	7,6	0,1	7,6 b	76,0	3,8	0,1	3,9 b	38,0
3	0,5	0,4	0,9 e	1,3	0,5	0,4	0,9 e	1,3	0,1	0,1	0,2 c	1,0
6	0,2	0,5	0,7 e	0,4	4,8	0,3	5,1 bc	16,0	0,1	0,2	0,0 c	0,5
7	0,1	0,7	0,7 e	0,1	0,2	0,1	0,4 e	2,0	0,1	0,6	0,3 c	0,2
8	1,7	0,7	2,4 d	2,4	1,4	0,2	1,6 de	7,0	0,3	0,4	1,0 c	0,8
9	0,9	0,3	1,3 e	3,0	0,1	0,4	0,4 e	0,3	0,9	0,1	1,2 c	9,0
10	0,4	0,8	1,2 e	0,5	0,2	0,2	0,3 e	1,0	1,2	0,2	0,8 c	6,0
11	2,4	0,8	3,2 d	3,0	0,4	0,5	0,9 e	0,8	0,2	0,1	2,4 b	2,0
12	6,4	6,2	12,6 b	1,0	0,7	4,0	4,8 bc	0,2	5,7	2,2	7,9 a	2,6
13	6,9	0,9	7,7 c	7,7	5,5	0,6	6,1 b	9,2	1,3	0,3	2,3 b	4,3
14	30,3	9,2	39,4 a	3,3	25,7	8,8	34,4 a	2,9	4,6	0,4	7,2 a	11,5
Média	5,5	1,8	7,2	3,1	4,1	1,3	5,4	3,1	1,7	0,4	2,5	4,1
Verão (12/96)												
1	3,4	2,2	5,6 c	1,5	2,2	1,4	3,6 c	1,6	1,2	0,8	2,0 b	1,5
2	0,9	0,8	1,7 de	1,1	0,9	0,5	1,4 d	1,8	0,0	0,3	0,3 d	0,0
3	15,7	1,0	18,7 a	15,7	14,4	0,4	14,8 z	36,0	1,2	0,6	1,8 b	2,0
6	2,2	2,5	4,7 c	0,9	0,0	2,8	2,8 c	0,0	2,2	0,1	2,1 b	22,0
7	1,1	1,3	2,4 de	0,8	1,8	1,2	3,0 c	1,5	0,0	0,1	0,1 e	0,0
8	4,1	2,3	6,4 c	1,8	3,4	1,8	5,2 b	1,9	0,7	0,5	1,2 c	1,4
9	5,6	4,1	9,7 b	1,4	3,2	1,2	4,4 b	2,7	2,4	2,8	5,2 a	0,9
10	0,5	0,8	1,3 e	0,6	2,8	0,6	3,4 c	4,7	0,6	0,3	0,6 d	2,0
11	0,5	1,1	1,7 e	0,5	0,9	0,7	1,6 d	1,3	0,2	0,3	0,3 d	0,7
12	0,8	0,2	0,9 e	4,0	0,0	0,0	0,0 e	0,0	0,8	0,2	0,5 d	4,0
13	0,9	1,2	2,2 de	0,8	0,5	1,2	1,7 d	0,4	0,5	0,1	0,5 d	5,0
14	5,4	15,1	20,4 a	0,4	3,4	15,8	19,1 a	0,2	2,0	0,1	1,4 c	20,0
Média	3,4	2,7	6,3	1,3	2,8	2,3	5,1	1,2	1,0	0,5	1,3	1,9



Eq. I (inverno): $N_M = 9936,7 \text{ argila}^{-1} + 9,8 \text{ argila}^{-1/2} + 4,1 \text{ MOS} - 533,5 \text{ MOS}^{-1} - 53,3 \text{ MOS}^{-1/2}$ ($R^2 = 0,95$; $p < 0,01$);

Eq. II (verão): $N_M = -0,75 N_0 - 1427,5 N_0^{-1} + 19,9 N_0^{-1/2} + 1,4 \text{ argila} - 14620,4 \text{ argila}^{-1} - 51,1 \text{ argila}^{-1/2} - 9,4 \text{ MOS} - 1117,1 \text{ MOS}^{-1} + 117,2 \text{ MOS}^{-1/2}$ ($R^2 = 0,99$; $p < 0,01$), onde Argila (g kg^{-1}), MOS = matéria orgânica do solo (g dm^{-3}) e $N_0 = N$ potencialmente mineralizável sob condições anaeróbias de incubação (mg kg^{-1}).

Figura 4. Valores de N mineralizado (N_M) observados e estimados pelas equações I e II, em condições de campo, no inverno (07/96) e no verão (12/96), na camada de 0-15 cm, após 45 dias de incubação. Os valores estimados por estas equações, nos dois períodos, seguem a mesma reta.

condições de laboratório, N_0 , com as quantidades mineralizadas sob condições de campo, N_M , verifica-se grande potencial preditivo de N_M a partir de N_0 . Este potencial é consideravelmente elevado através de regressões múltiplas, onde se consideram, como variáveis independentes, além de N_0 , também as características teor de argila e MOS.

Para a maioria dos sítios florestais, a forma predominante de N mineralizado no solo foi o N-NH_4^+ , particularmente nos sítios um e dois, cobertos com povoamentos de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, e sítio três, coberto com um povoamento adulto de eucalipto, no período do inverno, fato também observado sob condições de laboratório e discutido anteriormente. Essa também foi a forma de N mais lixiviada e absorvida. As relações $\text{N-NH}_4^+:\text{N-NO}_3^-$, de modo geral, foram bem maiores no período do inverno (Quadro 6). Gonçalves et al. (1997b) fizeram constatações similares. Nenhuma tendência clara de diferenças entre quantidades de N mineralizado, lixiviado e absorvido em povoamentos de florestas naturais comparativamente as florestas plantadas,

em solos semelhantes, foi verificada, tanto no período do inverno como no verão. Isto ocorreu, certamente, por razões relacionadas com grande variância dos dados causada por fatores não controlados em condições de campo e com o pequeno número de períodos de amostragem. Elevando o número de períodos de amostragem, espera-se que, particularmente, as quantidades de N mineralizado sejam estreitamente relacionadas com a cobertura florestal, como detectado para os valores de N potencialmente mineralizável (N_0) sob condições controladas de laboratório.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP), pelo auxílio financeiro que possibilitou a realização das análises laboratoriais. Às empresas Duratex S.A., Cia. Suzano de Papel e Celulose, Votorantim Celulose e Papel e Ripasa S.A. Celulose e Papel, nas pessoas do Eng^o. Raul Chaves e Téc. José Carlos, Eng^o. José Luiz Gava e Téc. J.R.S. Freitas, Eng^a. Celina Ferraz Valle e Téc. Walmir Franciscatti, e Eng^o. Rogério Salamuni e Téc. Juarez Rodrigues de Lima, respectivamente, pelo apoio logístico nas atividades de campo. À Química Alba Valéria Mazetto, do laboratório de Ecologia Aplicada da ESALQ, pela orientação e ajuda nas análises de laboratório.

LITERATURA CITADA

- ATTIWILL, P.M. & LEEPER, G.W. Forest soils and nutrient cycles. Carlton, Melbourne University Press, 1987. 202p.
- 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., eds. Relação solo-eucalipto. Viçosa, Folha de Viçosa, 1990. p.127-186.
- BELLOTE, A.F.J.; SARRUGE, J.R.; HAAG, P.H. & OLIVEIRA, G.D. Extração e exportação de nutrientes pelo *Eucalyptus grandis* Hill, ex-Maiden em função de idade: 1 - Macronutrientes. IPEF, 20:1-23, 1980.
- BINKLEY, D. & HART, S.C. The components of nitrogen availability assesments in forest soils. In: STEWART, B.A. Advances in soil science. New York, Springer Verlag, 1989.200p.
- CABRERA, M.L. Modelling the flush of nitrogen mineralization caused by drying and rewetting soil. Soil Sci. Soc. Am. J., 57:63-66, 1993.
- CARLYLE, J.C. Nitrogen cycling in forested ecosystems. For. Abstract., 47:307-336, 1986.
- CARLYLE, J.C.; LOWTHER, J.R.; SMETHURST, P.J. & NAMBIAR, E.K.S. Influence of chemical properties on nitrogen mineralization and nitrification in podzolized sands. Implications for forest management. Aust. J. Soil Res., 28:981-1000,1990.

- CORNFORTH, I.W. & WALMSLEY, D. Methods of measuring available nutrients in West Indian soil. *Plant Soil*, 35:389-399, 1971.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- GIANELLO, C.; CAMARGO, F.A.O. & VIDOR, C. Subestimação do nitrogênio potencialmente mineralizável do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25, Viçosa, 1995. Anais. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995. p.708-709.
- GONÇALVES, J.L.M. Efeito do cultivo mínimo sobre a fertilidade do solo e ciclagem de nutrientes. In: DISPERATI, A.A.; FERREIRA, C.A.; MACHADO, C.; GONÇALVES, J.L.M. & SOARES, R.V. SEMINÁRIO SOBRE CULTIVO MÍNIMO DO SOLO EM FLORESTAS, 1., Curitiba, 1995. Seminário. Curitiba, 1995. p. 43-60.
- GONÇALVES, J.L.M.; BARROS, N.F.; NAMBIAR, E.K.S. & NOVAIS, R.F. Soil and stand management for short-rotation plantations. In: NAMBIAR, S. & BROWN, A., eds. Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests. Canberra, ACIAR Austrália/CSIRO Austrália/CIFOR Indonésia, 1997a. p.379-418.
- GONÇALVES, J.L.M. & CARLYLE, J.C. Modelling the influence of moisture and temperature on net nitrogen in a forested sandy soil. *Soil Biol. Biochem.*, 26:1557-1564, 1994.
- GONÇALVES, J.L.M.; POGGIANI, F.; STAPE, J.L.; SERRANO, M.I.P.; MELLO, S.L.M.; MENDES, K.C.F.S.; BENTIVINHA, S.R.P. & OLIVEIRA, L.E.G. Efeito de práticas de cultivo mínimo e intensivo do solo sobre a ciclagem de nutrientes, fertilidade do solo, configuração do sistema radicular e nutrição mineral de povoamentos de *Eucalyptus grandis*. Piracicaba, 1997b. 83p. (Relatório para a FAPESP, processo nº 1994/4248-7)
- HART, S.C. & BINKLEY, D. Correlations among indices of forest soil nutrient availability in fertilized and unfertilized loblolly pine plantations. *Plant Soil*, 85:11-21, 1985.
- HERBERT, M.A. & SCHÖNAU, A.P.G. Fertilising commercial forest species in Southern Africa: research progress and problems. Part 2. *South Afr. For. J.*, 152:34-42, 1990.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Mapa de vegetação do Brasil. Rio de Janeiro, 1995.
- JANSSON, S.L. Tracer studies on nitrogen transformation in soil with special attention to mineralization - immobilization relationships. *Kunliga Lantbrukshogskolas Annaler*, 24:100-361, 1958.
- KEENEY, D.R. Nitrogen - Availability indices. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. Methods of soil analysis - Chemical and microbiological properties. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy Soil Science of American, 1982. p.711-733.
- KEENEY, D.R. & BREMNER, J.M. Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability. *Agron. J.*, 58:498-503, 1966.
- KIEHL, E.J. Manual de edafologia. Relações solo-planta. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979. 264p.
- LAMB, D. Soil nitrogen mineralization in a secondary rainforest succession. *Oecologia*, 47:257-263, 1980.
- LEMOS, E.E.P.; SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Comparação entre o N mineralizado através de incubações com e sem percolação e o N absorvido pelo milho em solo podzólico vermelho-amarelo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:127-130, 1988.
- McGILL, W.B. & CHRISTIE, E.K. Biogeochemical aspects of nutrient cycle interactions in soils and organisms, In: BOLIN, B. & COOK, R.B., eds. The major biogeochemical cycles and their interactions. New York, John Wiley & Sons, 1983. p.271-301.
- NADELHOFFER, K.J.; ABER, J.D. & MELILLO, J.M. Leaf litter production and soil organic matter dynamics along a nitrogen - availability gradient in Southern Wisconsin (USA). *Can. J. For. Res.*, 13:12-21, 1983.
- OSBORNE, G.F. & STORRIER, R.R. Influence of different sources of nitrogen fertilizer on the value of soil nitrogen tests. *Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb.*, 16:881-886, 1976.
- PAUL, E.A. & JUNA, N.G. Mineralization and immobilization of soil nitrogen by microorganisms. In: LARK, F.E. & ROSSWALL, T., eds. Terrestrial nitrogen cycles. Processes, ecosystem strategies and management impacts. *Ecol. B.*, 33:179-195, 1981.
- POGGIANI, F. Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de plantações florestais de *Eucalyptus* e *Pinus*. Implicações silviculturais. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1985. 210p. (Tese de Livre Docência)
- POTTKER, D. & TEDESCO, M.J. Efeito do tipo e tempo de incubação sobre a mineralização da matéria orgânica e nitrogênio total em solos do Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 3:20-24, 1979.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E. LOPES, A.S. & BATAGLIA, O.C. Análise química de solo para fins de fertilidade. Campinas, Fundação Cargill, 1987. 170p.
- RAISON, R.J.; CONNELL, M.J. & KHANNA, P.K. Methodology for studying fluxes of soil mineral-N *in situ*. *Soil Biol. Biochem.*, 19:521-530, 1987.
- REIS, M.G.F.; BARROS, N.F. & KIMMINS, J.P. Acúmulo de nutrientes em uma seqüência de idade de *Eucalyptus grandis* W. Hill (ex-Maiden) plantado no cerrado, em duas áreas com diferentes produtividades, em Minas Gerais. *R. Árv.*, 11:1-15, 1987.
- REIS, M.G.F. & BARROS, N.F. Ciclagem de nutrientes em plantios de eucalipto. In: BARROS, N.F. & NOVAIS, R.F., eds. Relação solo-eucalipto. Viçosa, Folha de Viçosa, 1990. p.265-301.
- RUZICKA, J. & HANSEN, E.H. Flow injection analysis. Part I. The concept of a new, simple, ultrafast continuous flow analyser. *Anal. Chim. Acta*, 78:145-157, 1975.
- RYAN, J.A.; SIMS, J.L. & PEASLEE, D.E. Laboratory methods for estimating plant available nitrogen in soil. *Agron. J.*, 63:48-51, 1971.
- SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. & ALVES, G.D. Mineralização do carbono e do nitrogênio em solo cultivado com cana-de-açúcar. *R. Bras. Ci. Solo*, 9:33-38, 1985.
- SERRANO, M.I.P. Mineralização, absorção e lixiviação de N em povoamentos de *Eucalyptus grandis* sob cultivo mínimo e intensivo do solo. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1997. 86p. (Tese de Mestrado)

- SIMS, J.L. & BLACKMON, B.G. Predicting nitrogen availability to rice: II. Assessing available nitrogen in silt loams with different previous year crop history. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 31:676-680, 1967.
- SIMS, J.L.; WELLS, J.P. & TACKETT, D.L. Predicting nitrogen availability to rice: I. Comparison of methods for determining available nitrogen to rice from field and reservoir soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 31:672-676, 1967.
- SMETHURST, P.J. & NAMBIAR, E.K.S. Distribution of carbon and nutrients and fluxes of mineral nitrogen after clear-felling a *P. radiata* plantation. *Can. J. For. Res.*, 20:1490-1497, 1990.
- STANFORD, G.; LEGG, J.D. & SMITH, S.J. Soil nitrogen availability evaluation based on nitrogen mineralization potential and uptake of labeled and unlabeled nitrogen by plant. *Plant Soil*, 39:113-124, 1973.
- STANFORD, G. & SMITH, S.J. Nitrogen mineralization potential of soil. *Proc. Soil Sci. Soc. Am. J.*, 36:465-472, 1972.
- WARING, S.A. & BREMNER, J.M. Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature*, 201:951-952, 1964.
- WHYNOT, T.N. & WEETMAN, G.F. Repeated fertilization effects on nitrogen fluxes measured by sequential coring. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:1101-1111, 1991.