

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

**Resposta à fertilização nitrogenada e estoque de nitrogênio
biodisponível em solos usados para plantações de *Eucalyptus***

Ana Paula Pulito

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

**Piracicaba
2009**

**Ana Paula Pulito
Engenheiro Florestal**

Resposta à fertilização nitrogenada e estoque de nitrogênio biodisponível em solos usados para plantações de *Eucalyptus*

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

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

**Piracicaba
2009**

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

Pulito, Ana Paula

Resposta à fertilização nitrogenada e estoque de nitrogênio biodisponível em solos usados para plantações de *Eucalyptus* / Ana Paula Pulito. - - Piracicaba, 2009.
58 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2009.
Bibliografia.

1. Eucalipto 2. Fertilizantes nitrogenados 3. Nitrogênio 4. Produtividade 5.
Sustentabilidade I. Título

CDD 634.9734
P981r

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

A Deus por sempre iluminar o meu caminho e me dar força e coragem para superar os obstáculos.

Ao meu marido Daniel Fernando por me aguentar na alegria e na tristeza. Seu amor, paciência e companheirismo foram essenciais para o término deste trabalho. Te amo muito.

Aos meus filhos, Matheus e Maria Luiza, que ainda tão pequenos já são meus pilares que me sustentam nos momentos mais difíceis. Por vocês sigo sempre em frente, sem me arrepender nem olhar para traz.

Ao meu irmão Carlos Alberto Pulito (Cacau) (em memória) por todo exemplo deixado de perseverança e amor pela vida.

A minha irmã Vera (Vevé) pelo seu amor, conselhos e por sempre acreditar em mim.

Ao meu irmão Luiz Antonio (Lolô) pelo companheirismo e amizade.

OFEREÇO

Aos meus pais José Roberto Pulito (em memória) e Maria Luiza Dal Bó Pulito (em memória), por todo sonho que me deixaram sonhar, por toda a vida que me deixaram viver, por todo exemplo que deixaram dentro de mim, enfim, por me fazerem suportar a dor da ausência, apenas pela certeza do nosso reencontro.

A distância me impede de tocá-los, mas não impede que eu os sinta e os ame como se estivessem ao meu lado...e estão...

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Gloriosa Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, e aos meus professores pelo aprendizado desde a graduação.

Ao Prof. Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves, pelas oportunidades, pela confiança depositada desde a graduação e também pelo apoio nos momentos mais difíceis. Mais que um mestre, você tem sido um amigo.

Ao pesquisador Philip Smethurst (CSIRO) pelo apoio, idéias e ensinamentos.

Ao Prof. Dr. José Luiz Stape pelos ensinamentos, sugestões, incentivo e amizade.

Ao Prof. Dr. Marcos Kamogawa por todo apoio nas análises e sugestões no trabalho.

Ao meu companheiro de trabalho do Programa Temático de Silvicultura e Manejo e colega de graduação e pós, o Engenheiro Florestal José Carlos Arthur Junior (Vortei), pela sua amizade, apoio nos momentos difíceis, pelo estímulo, pelo aprendizado e principalmente, pela imprescindível ajuda na confecção dos gráficos e nos cálculos estatísticos.

As empresas florestais Duratex S.A., Votorantim Celulose e Papel S/A e Suzano Papel e Celulose S.A. pelo apoio financeiro e pela disponibilização de suas áreas para desenvolvimento do projeto. Agradeço também a Internacional Paper pela disponibilização de uma área experimental.

Aos engenheiros florestais Raul Chaves e Vanessa Cavaglieri (Duratex), José Luiz Gava (Suzano), Cláudio Roberto Silva (VCP), e aos técnicos Dimas, Luciano, Vlamiir, Aílton (VCP), João Aírton (Duratex), Fernando (Suzano), José Ângelo (IP) e ao IPEF, por contribuir para a ampliação da base científica do manejo florestal no Brasil.

Aos meus braços direitos (e estagiários), Aline Cristina Miranda (estudante de Ciências Biológicas pela UniAraras) e Luiz Fabiano de Moraes (estudante de Engenharia Florestal pela FAIT), por todo apoio, auxílio, amizade e companheirismo. Obrigado por sempre estarem tão prontos a ajudar. Sem vocês esse projeto não seria o mesmo.

Aos ex, Daniel (Lingüiça), José Renato (P-lota), Eloá (Foi-c), Rômulo (Zé-Krioca), Jansen (Konel) e Claudia, e aos atuais, Flávia (Glacial) e Ricardo (Retirante), Tauan (Versa), Bruno (Mensalão) e Mariana (Koxonet), estagiários do PTSM, por todo apoio, colaboração, convívio e, principalmente, pela amizade. Eu aprendo muito com vocês todos os dias.

A Alba Valéria Masetto e toda a equipe do Laboratório de Ecologia Aplicada do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP pelo auxílio nas análises de solo e vegetais.

A Lilian A. de C. Duarte e a toda a equipe do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental, CENA/USP, pelo apoio nas horas de desespero e pela amizade que acabou nascendo entremeios às análises.

A minha tia Maria José (Zeza) e a minha prima Lucimara por cuidarem de mim.

Aos meus sogros, Joaquim e Lúcia, por me adotarem como filha.

E a todos os amigos, familiares e colegas de trabalho que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho, seja através de auxílios técnicos e científicos, como pelas sugestões e até pelo companheirismo e torcida para que tudo saísse dentro do previsto.

MEU (E)TERNO

AGRADECIMENTO!

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	10
2 DESENVOLVIMENTO.....	13
2.1 O Nitrogênio.....	13
2.2 Resposta à fertilização nitrogenada.....	14
2.3 Disponibilidade de N no solo.....	19
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1 Localização e caracterização das áreas experimentais.....	23
3.2 Análises laboratoriais das amostras de solo e de folha.....	27
3.3 Mineralização anaeróbica de N.....	32
3.4 Análise estatística.....	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1 Nitrogênio potencialmente mineralizável.....	34
4.2 Resposta à fertilização nitrogenada.....	41
4.3 Potencial futuro de resposta à fertilização nitrogenada.....	45
5. CONCLUSÕES.....	48
REFERÊNCIAS.....	50

RESUMO

Resposta à fertilização nitrogenada e estoque de nitrogênio biodisponível em solos usados para plantações de *Eucalyptus*

Apesar do N ser o nutriente requerido em maiores quantidades pelas plantas superiores, vários pesquisadores tem observado que raramente as plantações de *Eucalyptus* respondem a fertilização nitrogenada nas regiões sob condições tropicais e subtropicais. Esta falta de resposta, provavelmente, é porque dentre as fontes de N, a mineralização do N orgânico, ao longo do ciclo da cultura, seja a fonte principal e suficiente para atender a demanda das árvores. Porém, devido ao 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 presente estudo teve como objetivo avaliar (a) o teor de N potencialmente mineralizável (N_0) em solos usados para plantações de eucalipto em São Paulo; (b) a resposta à fertilização nitrogenada em diferentes estádios de desenvolvimento dessas plantações; (c) a relação de N_0 com a resposta à fertilização nitrogenada; (d) a eficiência do uso de atributos edáficos correlacionados com N_0 para prever a resposta à fertilização nitrogenada. Onze experimentos de fertilização, incluindo taxas de aplicadas de até 240 kg ha^{-1} de N foram estabelecidos em plantações experimentais de *E. grandis* ou *E. grandis* x *urophylla* de diversos sítios, em diferentes estádios de crescimento, no estado de São Paulo, Brasil. Os sítios possuem precipitação média anual entre 1200 a 1500 mm por ano, concentradas principalmente no verão-outono, com temperatura média anual de 20-21°C. A maioria dos experimentos está sob os solos Latossolo Vermelho e Vermelho-Amarelo e Neossolo Quartzarênico, compreendendo uma ampla faixa de teores de matéria orgânica (18 a 55 g kg^{-1}) e de argila (80 a 670 g kg^{-1}), na camada de 0-20 cm. A mineralização de N foi mensurada em laboratório, pelo método químico de incubação anaeróbia, a fim de estimar o N_0 . A fertilização com N acelerou o crescimento das árvores em até 12% até os dois anos de idade. Numa idade intermediária, entre 3 e 4 anos, essa resposta caiu para 6%. Na idade de corte, não foi observada resposta à fertilização. As Produtividades Relativas (PR) nos povoamentos jovens e de idade média não se correlacionaram com a razão N_0/N_t . Isso indica que o N disponível existente no solo é suficiente para atender a demanda das árvores. O N total (N_t) representou 3 a 5% da MO. As razões entre as concentrações de N_0 e de N_t variaram, na sua grande maioria, entre 10 a 16%. O N_0 encontrado, na camada superficial (0-20 cm), foi positivamente correlacionado com os teores de MO, de N_t e de argila, mostrando-se um bom indicador da disponibilidade de N nos solos. Os estoques de N_0 da camada superficial (0-20 cm) são suficientes para 4 a 5 rotações de cultivo (7 anos cada), se levado em consideração a saída média de N do sistema via exportação pela colheita (apenas madeira), e as entradas via fertilização e deposição atmosférica.

Palavras-chave: *Eucalyptus*; Produtividade; Nitrogênio potencialmente mineralizável; Sustentabilidade

ABSTRACT

Response to nitrogen fertilization and stock of available nitrogen in soils used in eucalyptus crops.

In spite of N being a nutrient required in greater quantities by superior plants, many researchers have observed that rarely the eucalyptus crops response to nitrogen fertilization in tropical or subtropical regions. This lack of response is probably caused because from the N sources, the mineralization of organic N, along the crop cycle, is the main and enough source to supply the trees needs. However, due to the shortage of organic N reserves with mineralization potential, it is expected that the intensive managed forests react to nitrogen fertilization after several crop cycles. The objective of this research work is to evaluate (a) the content of potentially mineralizable N (N_0) in soils used in eucalyptus crops in Sao Paulo; (b) the response to nitrogen fertilization in different development stages of those crops; (c) the relation between N_0 and the nitrogen fertilization effect; (d) the edaphic attributes use efficiency correlated to N_0 to predict the response to nitrogen fertilization. Eleven fertilization experiments, including rates applied until 240 kg ha^{-1} of N were established in experimental crops of *E. grandis* or *E. grandis x urophylla* of varied areas, in different growth stages in Sao Paulo state, Brazil. Those areas have a mean annual rain precipitation between 1200 and 1500 mm per year concentrated on summer and fall seasons, and a mean annual temperature of 20-21 °C. The most of the experiments are under Oxisols and Quartzipsamments comprising a wide range content of organic matter (18 a 55 g kg^{-1}) and clay (80 a 670 g kg^{-1}), on 0-20 cm depth. The N mineral exploration was measured in laboratory using a chemical method of anaerobic incubation to estimate the N_0 . The nitrogen fertilization accelerated the trees growth in almost 12% until two years old. In middle ages, between three and four years, the response decreased until 6%. There was no observed response to fertilization at the cut age. Likewise there was no correlation between the Relative Productivity (RP) and the N_0/N_t inside young and middle-aged crops. This shows that the existing available N in soil is enough to supply the trees needs. The total N (N_t), represents 3% to 5% of organic matter. The reasons between N_0 and N_t concentrations vary in a great majority, between 10% and 16%. The founded N_0 in 0-20 cm depth was positive correlated with the organic matter, N_t and clay contents, appearing as a great indicator of the possibilities of N in soils. The N_0 stocks in 0-20 cm depth are enough to up to 4 to 5 crop rotations (7 years each one) if considering the mean system exit of N, by exportation because of harvesting (wood only), and the entrance by fertilization and atmospheric deposition.

Keywords: *Eucalyptus*; Productivity; Potentially mineralizable N; Sustainability

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, o setor florestal tem crescente relevância para o país, sendo que, atualmente, apenas os plantios de eucalipto ocupam uma área de 3,5 milhões de hectares, concentrados principalmente nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Bahia (SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA - SBS, 2008). A escolha deste gênero é justificada pela sua alta produtividade e adaptabilidade em diferentes condições de solo e clima (GONÇALVES, 2002). Porém, admite-se, freqüentemente, que a sustentabilidade da produção das florestas plantadas, a médio e longo prazo, corre sério risco, pois, pouco se conhece sobre os impactos ambientais ocasionados pela substituição das florestas naturais por plantações florestais homogêneas (GONÇALVES et al., 2001). Os maiores problemas estão relacionados com a baixa fertilidade e pequenas reservas de nutrientes dos solos usados para fins de reflorestamento (BARROS et al., 1990; BELLOTE et al., 2000; GONÇALVES et al., 2008a), comumente, Latossolos de textura média e Neossolos Quartzarênicos (GONÇALVES et al., 2000, 2008b). Sob tais circunstâncias, o plantio sucessivo de espécies florestais com grande capacidade de extração de nutrientes tem grande impacto sobre as pequenas disponibilidades e reservas minerais dos solos, resultando em quedas de qualidade dos sítios, quando não devidamente manejados, necessitando, portanto, de uma estratégia de fertilização para adequado desenvolvimento das plantas, sem perda de produtividade em rotações subseqüentes.

A fertilização em plantios florestais é uma atividade relativamente nova se comparada às culturas agrícolas (BARROS et al., 1990), portanto ainda persistem muitas dúvidas em relação a esse assunto. A fertilização nitrogenada, que tem como objetivo repor o N que não foi disponibilizado pelos solos ou pela fixação biológica de N_2 , tem obtido respostas inconstantes nos plantios de eucalipto (VALERI et al., 1983). Apesar do N ser o nutriente requerido em maiores quantidades pelas plantas superiores, diversos pesquisadores têm observado que raramente as plantações extensivas de florestas respondem à fertilização nitrogenada, sob condições de clima

tropical e subtropical (GONÇALVES et al., 1997; HERBERT; SCHÖNAU, 1989; BARROS et al., 1990). Isso ocorre, provavelmente, porque dentre as principais fontes de N, a mineralização do N orgânico (em média $40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) ao longo do ciclo da cultura, seja a fonte principal e suficiente para atender a demanda das árvores (GONÇALVES et al., 2001,2008a), uma vez que a demanda média anual de N em florestas de eucaliptos no estado de São Paulo e Minas Gerais varia de 20 a $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, como observado por Gonçalves et al. (2008a) e também estimado por Bellote et al. (1980), Reis et al. (1987), Poggiani (1985) e Gonçalves (1995a). Porém, devido às altas taxas de exportação de N (BELLOTE et al., 1980; GONÇALVES, 1995a; POGGIANI, 1985; REIS et al.,1987), às pequenas quantidades de N aplicadas via fertilização (BARROS et al., 1990; GONÇALVES, 1997), às técnicas inadequadas de fertilização (GODINHO et al., 1997), somado ao 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. Em trabalhos mais recentes, alguns sítios têm apresentado um alto potencial de resposta à aplicação de N, principalmente em solos com menor teor de matéria orgânica (SMETHURST et al., 2003).

A dificuldade para determinar as quantidades de N que devem ser aplicadas como fertilizantes às culturas provém, em parte, da impossibilidade de se prever com precisão a contribuição do solo. Gonçalves et al. (1996) elaboraram uma tabela de recomendação da fertilização nitrogenada de plantações de eucalipto baseada no teor de matéria orgânica do solo. Contudo, apesar da MO do solo ser a principal fonte de N no solo, este tipo de recomendação tem como inconveniente o fato de não levar em consideração a biodisponibilidade de N, regulada pela qualidade da MO, por fatores climáticos e edáficos e pelo manejo florestal (CANTARELLA; RAIJ, 1986; LARCHER, 2004).

O desenvolvimento de um método químico que permita a obtenção de um bom índice da disponibilidade de N é desejável do ponto de vista prático, pois as análises químicas, em geral são mais rápidas e precisas que ensaios biológicos (GIANELLO; BREMNER, 1986; HOPMANS et al., 1980). Assim, vários métodos laboratoriais têm

sido propostos para estimar o N potencialmente mineralizável (N_0) disponível nos solos. Entre eles se destaca a incubação anaeróbia (GONÇALVES et al., 2001), proposta por Keeney e Bremner (1966).

Para tanto, foram testadas as seguintes hipóteses:

- I. O teor de N biodisponível é inversamente correlacionado com a resposta à fertilização nitrogenada em plantações de eucalipto.
- II. Os atributos do solo, correlacionados com o N potencialmente mineralizável, são bons indicadores de respostas à fertilização nitrogenada.

Assim, os objetivos do estudo foram avaliar: (a) o teor de N potencialmente mineralizável (N_0) em solos usados para plantações de eucalipto no estado de São Paulo; (b) a resposta à fertilização nitrogenada em diferentes estádios de desenvolvimento dessas plantações; (c) a relação de N_0 com a resposta à fertilização nitrogenada; (d) a eficiência do uso de atributos edáficos correlacionados com N_0 para prever a resposta à fertilização nitrogenada.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 O Nitrogênio

Entre os elementos principais, o N tem um grande significado, pois, juntamente com o P, são os nutrientes em maiores quantidades em povoamentos de eucalipto (GONÇALVES et al., 1997, 2008a). Entre o abastecimento de N e o aumento de biomassa há uma estreita relação (LARCHER, 2004). Dessa forma, o N é o nutriente requerido em maiores quantidades pelas plantas superiores (BARROS et al., 1990; KHANNA, 1990) e sua disponibilidade normalmente limita a produção florestal (RAISON et al., 1987,1992).

Embora a atmosfera seja constituída por cerca de 78% de N, Larcher (2004) ressalta que o maior reservatório do elemento é a crosta terrestre. A precipitação pluviométrica e a fixação biológica de N₂ atmosférico constituem os principais processos responsáveis pelas entradas de N nos solos (LARCHER, 2004), entretanto, o conteúdo de N do solo é relativamente baixo (BARROS et al., 1990). O teor de N total do solo varia de 0,02% ou menos no subsolo até valores superiores a 2,5% em turfas (WOLLUM; DAVEY, 1975). A maior porção do N do solo encontra-se na forma orgânica, e somente uma fração diminuta (5 – 10%) está na forma inorgânica, disponível às plantas. Assim, o potencial de suprimento de N de um solo para as plantas será maior se o seu teor de matéria orgânica for mais elevado (RAISON, 1987). Contudo, a liberação do N da matéria orgânica depende da sua mineralização, considerado como o processo mais importante da dinâmica de N nos solos florestais (KHANNA, 1990). A mineralização é influenciada por diversos fatores como pela absorção das plantas, liviação, denitrificação (KHANNA, 1990), relação C/N do substrato, fertilidade, aeração, umidade, temperatura do solo (BARROS et al., 1990; GONÇALVES; CARLYLE, 1994; HOPMANS et al., 1980; NOBLE; HERBERT, 1991; THEODOROU; BOWEN, 1983b) e a estabilização física da matéria orgânica (PAUL, 1984), fatores que influenciam na atividade microbiana.

Basicamente, todo o N fixado no sistema solo-planta é incorporado a compostos orgânicos por organismos do solo e por plantas. O N na forma orgânica, para ser

absorvido pelas plantas, tem que ser convertido, por meio da atividade de vários microorganismos, numa série de reações (aminação, amonificação e nitrificação), para a forma inorgânica. Das formas de N inorgânico, a amoniacal (NH_4^+) e nítrica (NO_3^-) são as de maior relevância na nutrição das plantas (KERBAUY, 2004). Porém, no Brasil, o eucalipto, por ser plantado em solos, na maioria das vezes, com elevada acidez, espera-se que a forma NH_4^+ seja a de maior importância (BARROS et al, 1990).

A temperatura e a umidade são características importantes considerando-se o ciclo do N, pois a amonificação ocorre sobre o limite de temperatura adequado à atividade biológica (0 – 70°C), sendo a nitrificação ainda mais dependente de temperatura, estando seu ponto ótimo entre 20 a 35°C, dependendo do tipo de solo e clima (BARROS et al.,1990). Quanto à umidade, esses autores afirmam que a taxa de mineralização aumenta com o incremento da umidade disponível, mas este efeito é neutralizado pelo decréscimo da aeração em solos contendo alta umidade.

Dentre outros fatores que contribuem para o fluxo de N, merece destaque o comportamento das populações microbianas do solo, que através da sua atividade biológica, representam uma importante fonte de N (THEODOROU; BOWEN, 1983a, 1983b). Estas populações microbianas são consideradas um reservatório quando imobilizam nutrientes para o seu próprio consumo e como fonte quando mineralizam compostos orgânicos. Os compostos podem ser absorvidos pelas plantas, porém, esta atividade está intimamente relacionada às características edafoclimáticas (GONÇALVES; CARLYLE, 1994).

2.2 Resposta à fertilização nitrogenada

Há um ganho substancial na produtividade em resposta à fertilização mineral na grande maioria das plantações de eucalipto no Brasil (BARROS; NOVAIS, 1995; GONÇALVES et al., 1997, 2000). O tipo mais comum de resposta à fertilização encontrada em plantações florestais é aquela na qual ocorre uma aceleração de crescimento das árvores em idade mais jovem (GONÇALVES et al., 2008b). Porém,

depois do período de rápido crescimento, as florestas voltam ao seu ritmo de crescimento dependendo da qualidade do sítio (NAMBIAR, 1999). A fertilização nitrogenada, que geralmente é realizada no Brasil via formulação NK ou NPK (GODINHO et al., 1997; BARROS, et al., 1990), é um exemplo desse tipo de resposta. O N acelera o ritmo inicial de crescimento da floresta, mas diferenças entre os tratamentos não são mais significativas após 30 meses de idade (BARROS et al., 1990; GONÇALVES et al., 1997, 2008b; HERBERT; SCHÖNAU, 1989). Isso porque o eucalipto possui alta demanda de N na fase inicial de crescimento (NOBLE; HERBERT, 1991), pois a maior parte do acúmulo de biomassa foliar ocorre nessa fase (BARROS et al., 1990, 2000; REIS et al., 1987, 1990). Em idades mais avançadas, após o terceiro ano, o ritmo de crescimento das árvores diminui o que reflete na demanda de N, em grande parte atendida pelo N disponibilizado pela mineralização da serapilheira (ciclagem biogeoquímica) e pela retranslocação interna (ciclagem bioquímica) (BARROS et al., 1990, 2000; GONÇALVES et al., 1995a, 2000).

Por ser o N o nutriente requerido em maiores quantidades pelas plantas superiores (BARROS et al., 1990; KHANNA, 1990) e possuir um ciclo complexo, com diversos fatores de influência (NOBLE; HERBERT, 1991), nas últimas décadas, centenas de experimentos de fertilização nitrogenada têm sido conduzidos com diversas culturas no Brasil e em diversos países.

Os primeiros estudos visando avaliar os efeitos da fertilização nitrogenada sobre o crescimento do eucalipto no Brasil foram realizados por Mello (1968). Ele avaliou o efeito de doses crescentes de N no crescimento do *E. saligna* em solo de textura média. Foi observado efeito positivo no crescimento em altura apenas até os 18 meses de idade; após essa fase não houve diferenças significativas de crescimento entre as doses de N. Da mesma forma, Knudson et al. (1972) observaram que o uso do NP proporcionou respostas positivas do *E. saligna* cultivado em solos arenosos, sob vegetação de cerrado, até um ano de idade.

Estudando o efeito da fertilização NPK no desenvolvimento de *E. grandis* plantado em duas regiões da África do Sul, Shönau e Pennefather (1975) observaram que o N não apresentou efeitos significativos. Para os autores, a resposta pode não ter

ocorrido porque a área era uma antiga plantação de *Acacia mearnsii*, o que pode causado enriquecimento do solo com o nutriente.

Em um experimento de fertilização com NPK com *E. grandis*, Donald e Schultz (1977) constataram que até os três anos e cinco meses o efeito dessa fertilização foi significativa. Porém, à medida que as árvores se aproximavam da maturidade, esta resposta diminuía, não havendo mais diferenças significativas entre os tratamentos adubados e não adubados. Stape e Benedetti (1997), em estudo da resposta à aplicação de NPK em floresta conduzidas por talhadia, não observaram resposta ao N. Acredita-se que a dose de N aplicada (57 kg ha^{-1}) foi baixa em relação as taxas de mineralização observadas em condições tropicais, mesmo em solos com teores de 1 a 2% de matéria orgânica.

Em estudo conduzido em solos arenosos com *E. grandis*, Valeri et al. (1983), observaram que o N não afetou a altura das plantas em qualquer época analisada (24, 36 e 48 meses). No diâmetro, o N teve um efeito até os seis meses, com a utilização de 33 kg ha^{-1} . Para esses autores não era esperada a não resposta à fertilização nitrogenada, pois se trata de um solo altamente lixiviável e pobre em N. A hipótese levantada foi que as árvores absorveram N em camadas profundas do solo. Barros et al. (1981) em ensaios conduzidos em solos argilosos de cerrado, encontraram resposta a dose mais elevada de N (32 g por planta) até os cinco anos de idade.

Essa falta de resposta a fertilização nitrogenada ocorre, provavelmente, porque, entre as diversas fontes de N, a mineralização do N orgânico (em média $40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) ao longo do ciclo da cultura, seja a fonte principal e suficiente para atender a demanda das árvores (GONÇALVES et al., 2001, 2008a), uma vez que a demanda média anual de N em florestas de eucaliptos no estado de São Paulo e Minas Gerais varia de 20 a $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, como observado por Gonçalves et al. (2008a) e também estimado por Bellote et al. (1980), Reis et al. (1987), Poggiani (1985) e Gonçalves (1995a). Algumas outras hipóteses foram levantadas para tentar explicar esta inconstância na resposta do eucalipto à fertilização nitrogenada, como: i) utilização de doses de N inferiores à demanda nutricional da planta (BARROS et al., 1990; GONÇALVES, 1997, 2008b); ii) falta de parcelamento e épocas inadequados de

aplicação (VALERI et al., 1983); iii) demanda de N, em grande parte atendida pelo N disponibilizado, em idades mais avançadas, pelas ciclagens biogeoquímica e bioquímica (BARROS et al., 1990, 2000; GONÇALVES et al., 1995a, 2000).

Porém, independentemente das condições climáticas, da magnitude da resposta à fertilização, que depende da demanda nutricional do genótipo implantado e de solos sob baixa fertilidade, a resposta à fertilização nitrogenada pode aumentar após várias rotações devido às exportações de nutrientes que ocorrem via colheita (BELLOTE et al., 1980; GONÇALVES, 1995a, 1997; POGGIANI, 1985; REIS et al., 1987, STAPE; BENEDETTI, 1997), somado ao possível esgotamento das reservas de N orgânico potencialmente mineralizável (GONÇALVES et al., 2001). Uma das peculiaridades das respostas das culturas à fertilização nitrogenada é que elas, em geral, aumentam com o tempo de uso do solo e à aplicação de fertilizantes, ao contrário do que ocorre com as respostas aos outros nutrientes como P e K (CANTARELLA; RAIJ, 1986). Isso se deve à ausência de efeito residual direto dos adubos nitrogenados e devido a tendência de uma menor liberação de N proveniente da mineralização da matéria orgânica que acompanha a diminuição, em longo prazo, do teor de matéria orgânica nos solos sob cultivo intensivo (FLINN et al., 1980), principalmente nos solos férteis e originalmente sob florestas. Dessa forma, espera-se que as florestas manejadas intensivamente respondam à fertilização nitrogenada após vários ciclos de cultivo.

Atualmente, alguns trabalhos, verificaram um alto potencial de resposta à aplicação de N, principalmente em solos com menor teor de MO (LACLAU et al., 2005; SMETHURST et al. 2003). Balanços nutricionais em experimentos de campo mostraram, de uma maneira consistente no Congo, que a fertilização nitrogenada, através de sucessivas rotações, tem sustentado o crescimento de plantações de eucalipto (LACLAU et al., 2005).

Diversos pesquisadores vêm estudando a influência do teor de MO no solo na resposta do eucalipto à fertilização nitrogenada. Noble e Herbert (1991) encontraram uma resposta em relação à aplicação de N, em termos de área basal, inversamente proporcional aos teores de C orgânico no solo. Segundo estes autores é possível recomendar a aplicação de N baseando-se na concentração de MO do solo. Seguindo

a mesma linha, Gonçalves et al. (1996) propuseram classes de resposta e recomendações para a fertilização com N baseadas em concentrações de MO do solo e teor de argila. As recomendações para N são de 60, 40 e 20 kg ha⁻¹, para solos com concentrações de MO do solo entre 0-20, 21-50 e > 50 g kg⁻¹, respectivamente. Eles consideraram que as concentrações de MO do solo e os teores de argila, além da relação com a disponibilidade de N, afetam diretamente a produtividade potencial. Embora os trabalhos de Noble e Herbert (1991) e Gonçalves et al. (1996) representem um avanço relativamente grande, há informações que indicam a necessidade de considerar-se outras condicionantes no processo de recomendação de fertilização nitrogenada para eucalipto, como clima, tipo de solo e outros (BARROS et al., 2000; CANTARELLA; RAIJ, 1986), a fim de se conseguir maior precisão e menor desperdício de fertilizantes nitrogenados.

Para muitas culturas a análise de solo fornece parâmetros adequados para a recomendação de P e K. Para o N essa técnica em geral não apresenta resultados satisfatórios (RAIJ, 1981), devido à complexidade das reações bioquímicas e aos fatores climáticos pouco previsíveis, que, conjuntamente regem o comportamento deste nutriente no solo. Assim, a dificuldade para determinar as quantidades de N que devem ser aplicadas como fertilizantes às culturas provém, em parte, da impossibilidade de se prever com precisão a contribuição do solo. Essa depende, além das características do solo, tais como pH, porcentagem de matéria orgânica etc., de fatores externos como o manejo do solo, a temperatura e a umidade (CANTARELLA; RAIJ, 1986; STANFORD; SMITH, 1972). Todos esses fatores conferem um caráter dinâmico à experimentação com fertilizantes, especialmente com N, tornando-se necessária a realização de avaliações periódicas. Estudos sobre a decomposição da matéria orgânica e a mineralização de N em solos sob plantações homogêneas de *Eucalyptus* ainda são necessários em nosso país (GONÇALVES et al., 2008a).

2.3 Disponibilidade de N no solo

Tendo em vista que o N apresenta uma dinâmica extremamente alta nos ecossistemas, estando constantemente sendo convertido em formas inorgânicas (via mineralização) e orgânicas (via imobilização), deve-se considerar como N disponível não apenas o N-NH_4^+ e o N-NO_3^- trocável, mas também a fração lábil da matéria orgânica, ou seja, a fração facilmente mineralizada pelos microorganismos (GIANELLO; BREMNER, 1986; GONÇALVES et al., 2008a).

A partir da introdução do conceito de N potencialmente mineralizável (N_0) por Stanford e Smith (1972), varias hipóteses têm sido utilizadas para explicar o comportamento da mineralização do N do solo, com o emprego de diversos parâmetros empíricos (CAMARGO et al., 1995). O objetivo principal dos estudos de mineralização é a obtenção de índices da disponibilidade de N para as plantas. No entanto, a magnitude da liberação de N através de incubação depende do método empregado (POTTKER; TEDESCO, 1979).

Diversos métodos para estimar as taxas de mineralização, absorção e lixiviação de N em nível de campo e laboratório têm sido testados. Dentre os métodos de campo, a incubação seqüencial de colunas de solo pouco perturbadas tem sido indicada como o método mais adequado (GONÇALVES, et al., 2001), seja por causar menor distúrbio ao solo ou por ser bastante sensível às variações ambientais (RAISON et al., 1987). Os principais métodos propostos são baseados na oxidação biológica ou química da matéria orgânica. Os métodos biológicos são baseados na estimativa do N mineral produzido com a incubação do solo sob condições favoráveis a mineralização do N, enquanto que os métodos químicos procuram simular a ação dos microorganismos sobre a matéria orgânica mediante o emprego de agentes oxidantes e extratores. Não é viável a aplicação de métodos biológicos, principalmente a incubação *in situ*, em análise de rotina para prescrições e recomendações de fertilização, pois os trabalhos de campo e de laboratório são muito intensos (GONÇALVES et al., 2008a).

Dentre os métodos de laboratório, as incubações aeróbias e anaeróbias de amostras de solo têm se mostrado promissoras (STANFORD; SMITH, 1972; WARING;

BREMNER, 1964), permitindo a obtenção de índices de N mineralizado, de N potencialmente mineralizável e de taxas de mineralização de N e C que se correlacionam com as quantidades de N absorvidas pelas plantas (STANFORD et al., 1973). Apesar destes métodos não refletirem as flutuações naturais que ocorrem sob condições de campo, fornecem uma boa estimativa dos “pools” de N mineralizável presentes no tempo de amostragem e, permitem estabelecer comparações entre os diferentes sítios de amostragem (RAISON et al., 1987). O método de incubação aeróbia tem sido o mais utilizado, apesar do método anaeróbio ser mais rápido e prático (POTTKER; TEDESCO, 1979). Além disso, há boa relação entre os dois métodos, como mostraram Waring e Bremner (1964) e Pottker e Tedesco (1979). O desenvolvimento de um método químico que permita a obtenção de um bom índice da disponibilidade de N é desejável do ponto de vista prático, pois as análises químicas, em geral são mais rápidas e precisas que ensaios biológicos (GIANELLO; BREMNER, 1986; HOPMANS et al., 1980).

Stanford e Smith (1972) propuseram deduzir o N mineralizado através de amostras incubadas de solo, para determinar seu potencial de mineralização e taxa constante de mineralização, combinando seus parâmetros com a temperatura e umidade no solo. Equações foram desenvolvidas com o objetivo de prever o N mineralizado até um tempo t , de acordo com as variações semanais ou mensais de temperatura e umidade (STANFORD et al., 1973). Estas equações conseguiram, em experimentos de campo, prever com erro de 10% a necessidade de fertilização nitrogenada, mostrando que os parâmetros N_0 (quantidade de N passível de ser mineralizada) e k (taxa de mineralização de N) são bastante promissores.

Os primeiros métodos se basearam em incubações aeróbias e anaeróbias, em laboratório, sob condições controladas de temperatura e umidade (KEENEY; BREMNER, 1966; WARING; BREMNER, 1964). Os resultados obtidos com esses métodos foram satisfatórios, indicando que tanto a incubação aeróbia quanto a anaeróbia possuem potencial para avaliar a disponibilidade de N no solo e boa relação com o N absorvido pelas árvores. Uma desvantagem desses métodos é que eles não permitem avaliar o efeito das condições ambientais na disponibilidade de N

(GONÇALVES et al., 2008a). Todavia, sob condições padronizadas artificiais, é possível estabelecer comparações entre diversos locais quanto à qualidade do substrato, as quais não seriam possíveis sob condições ambientais variáveis (BINKLEY; HART, 1989; GONÇALVES et al., 2001, 2008a).

Gianello e Bremner (1986) propuseram um método baseado em Keeney e Bremner (1966), porém com temperaturas mais elevadas (100°C) e menos tempo de incubação (apenas 4 horas). O objetivo dos autores era de propor um método químico rápido e preciso, para que esse pudesse ser introduzido em análises laboratoriais de rotina. O estudo, utilizando 33 solos brasileiros, mostrou que os resultados obtidos pelo método correlacionaram-se positivamente com o método de incubação anaeróbia ($r = 0,95$) proposto por Keeney e Bremner (1966) e com metodologias de incubação aeróbias ($r = 0,92$). Os autores enfatizaram que o método proposto por eles é somente para avaliação do N orgânico potencialmente disponível no solo e que o N inorgânico do solo e fatores como o clima e manejo devem ser considerados quando este método for usado como auxílio na recomendação de fertilizante. Uma vantagem deste método é que os aparelhos e os reagentes utilizados podem ser também usados para determinar o N inorgânico do solo em metodologias descritas por Keeney e Bremner (1966).

Pottker e Tedesco (1979) compararam os métodos de incubação aeróbica e anaeróbia, em estudo com 30 solos do Rio Grande do Sul. Os resultados obtidos pelos dois métodos foram altamente correlacionados entre si. A MO e o N total apresentaram alta correlação com o N mineralizado, principalmente, os dados analisados via incubação anaeróbia, podendo ser usados como indicadores da disponibilidade de N nos solos.

O método anaeróbio de mineralização de N possui algumas vantagens em relação ao método aeróbio que foram verificadas por alguns pesquisadores: i) não há problemas relacionados ao estabelecimento de um nível ótimo ou de perdas de umidade durante o período de incubação (GONÇALVES et al., 2001; WARING; BREMNER, 1964); ii) maiores quantidades de N são mineralizados em um dado período de tempo (GONÇALVES et al., 2001); iii) temperaturas mais elevadas podem ser usadas, o que reduz o período de incubação, sem necessidade de se preocupar

com a temperatura ideal para os organismos nitrificadores (GONÇALVES et al., 2001); iv) somente o N-NH_4^+ precisa ser analisado (POTTKER; TEDESCO, 1979); v) não há remoções de formas solúveis de N orgânico durante o processo de lixiviação (GIANELLO et al., 1995); vi) as soluções salinas usadas para a extração de N-NH_4^+ são mais concentradas (geralmente $\text{KCl } 2 \text{ mol L}^{-1}$), assegurando a extração total ou quase total do N mineralizado (GONÇALVES et al., 2001); vii) as práticas laboratoriais são mais simples e rápidas (GONÇALVES et al., 2001; POTTKER; TEDESCO, 1979); viii) as quantidades de N obtidas por este método têm apresentado boas correlações com as quantidades de N absorvidas pelas plantas (KEENEY; BREMNER, 1966; RYAN et al., 1971; SALCEDO et al., 1985). Assim, o método anaeróbio, que se correlaciona altamente com os resultados fornecidos pelo método aeróbio, deve ser utilizado preferencialmente por ser mais rápido, prático e preciso (POTTKER; TEDESCO, 1979; WARING; BREMNER, 1964). Além do mais, Pottker e Tedesco (1979), encontraram para o método de incubação anaeróbia, melhores correlações entre os teores de MO e N total com o N mineralizado, do que no método aeróbico. Desse modo, o método anaeróbio pode ser incluído em análises de rotina para avaliar a capacidade potencial da disponibilidade de N que os solos possuem de prover para o crescimento das plantas (WARING; BREMNER, 1964).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização das áreas experimentais

Para a elaboração deste trabalho foram selecionadas 11 áreas florestadas com *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus grandis* x *urophylla* no Estado de São Paulo, com idades variando de 1 a 11,4 anos, todas manejadas com práticas de cultivo mínimo. As áreas pertencem a empresas florestadoras do estado de São Paulo e ao Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP e estão localizadas em diferentes municípios (Figura 1 e Tabela 1): Agudos e Botucatu (Duratex S.A); Angatuba e São Miguel Arcanjo (Suzano Papel e Celulose S.A.); três áreas em Capão Bonito, Paraibuna e Votorantim (Votorantim Celulose e Papel S.A.) e Itatinga (Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga).

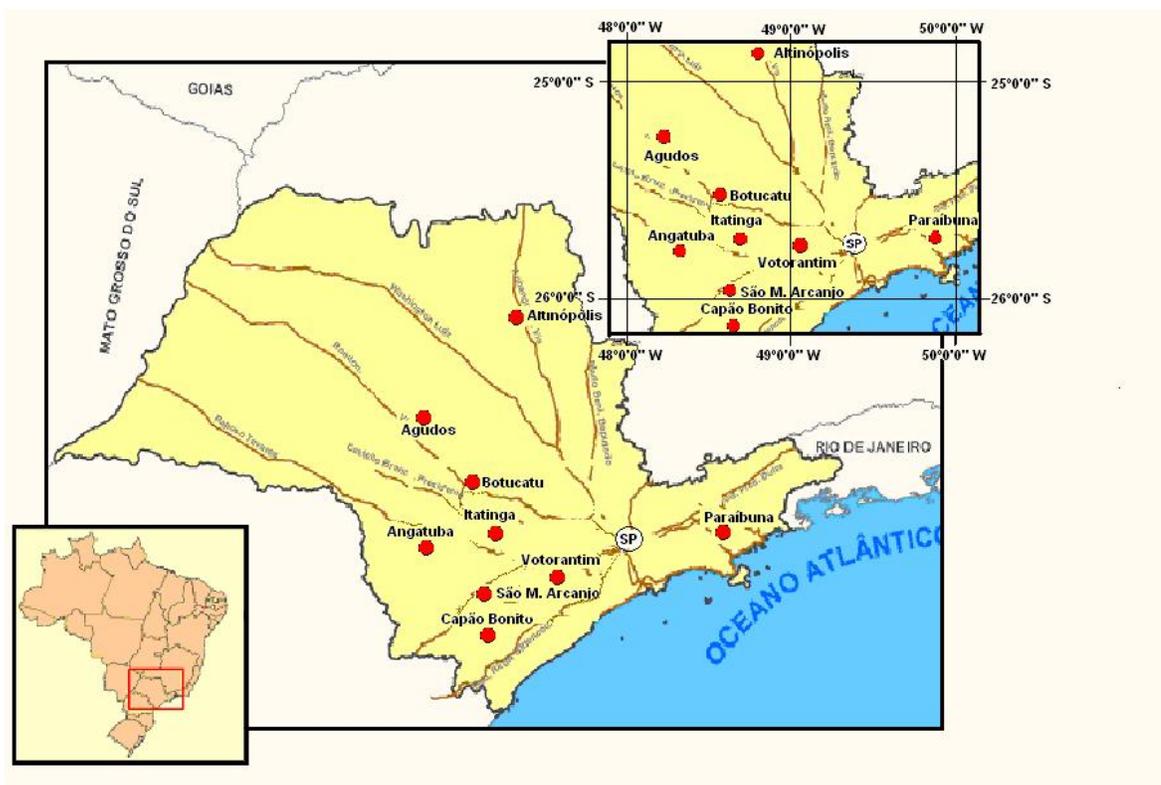


Figura 1 – Localização dos municípios no estado de São Paulo, onde estão as áreas experimentais

Tabela 1 – Sítio, município, latitude, longitude, altitude, relevo, genótipo e espaçamento de plantio onde foram coletadas as amostras de solo para a incubação anaeróbia e conduzido os experimentos sobre fertilização nitrogenada

Município	Latitude	Longitude	Altitude	Relevo	Genótipo	Espaçamento
	S	W	m			m
Agudos	22°28'	48°59'	580	Suave ondulado	<i>E. grandis</i> ⁽¹⁾	3,0x2,0
Altinópolis	21°01'	47°22'	889	Plano	<i>E. grandis</i> vs. <i>urophylla</i> ⁽²⁾	3,0x2,5
Angatuba	23°17'	48°28'	649	Plano	<i>E. grandis</i> vs. <i>urophylla</i> ⁽²⁾	3,0x2,0
Botucatu	22°53'	48°26'	804	Plano	<i>E. grandis</i> ⁽¹⁾	3,0x2,0
Capão Bonito 1	24°00'	48°20'	705	Plano	<i>E. grandis</i> vs. <i>urophylla</i> ⁽²⁾	3,0x3,0
Capão Bonito 2	24°00'	48°20'	705	Ondulado	<i>E. grandis</i> vs. <i>urophylla</i> ⁽²⁾	3,0x2,0
Capão Bonito 3	24°00'	48°20'	705	Ondulado	<i>E. grandis</i> vs. <i>urophylla</i> ⁽²⁾	3,0x2,0
Itatinga	23°06'	48°36'	845	Plano	<i>E. grandis</i> ⁽¹⁾	3,0x2,0
São M. Arcanjo	23°51'	47°51'	715	Plano	<i>E. grandis</i> vs. <i>urophylla</i> ⁽²⁾	3,0x2,0
Paraíbuna	23°23'	45°39'	634	Ondulado	<i>E. grandis</i> ⁽¹⁾	3,0x2,5
Votorantim	23°32'	47°26'	570	Ondulado	<i>E. grandis</i> vs. <i>urophylla</i> ⁽²⁾	3,0x2,0

⁽¹⁾ Plantios seminais; ⁽²⁾ Plantios clonais.

As áreas experimentais encontram-se em altitude entre 570 e 845. Segundo a classificação de Köppen, os climas foram classificados Aw (Agudos e Altinópolis) e Cwa (Angatuba, Botucatu, Capão Bonito, Itatinga, São Miguel Arcanjo, Paraíbuna e Votorantim). O Aw é um clima tropical com estação seca de inverno e temperaturas médias no mês mais frio do ano superior a 18°C; o clima Cwa é temperado úmido com inverno seco e verão quente. A precipitação média anual das áreas é entre 1170 e 1517 mm.

Segundo a classificação da EMBRAPA (1999), os solos foram classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (Itatinga, São Miguel Arcanjo e Paraíbuna), Neossolo Quartzarênico (Altinópolis, Angatuba e Botucatu), Latossolo Vermelho Distrófico (Agudos e Capão Bonito 2), Latossolo Amarelo Distrófico (Capão Bonito 1), Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico (Votorantim) e Cambissolo Háplico Distrófico (Capão Bonito 3). Estes são os principais solos utilizados em florestamentos no estado de São Paulo (GONÇALVES, 2002). Os teores de matéria orgânica variaram entre 18 e 55 g kg⁻¹ e os teores de argila entre 80 a 680 g kg⁻¹, na camada de 0-20 cm (Tabela 2).

Tabela 2 – Tipo de clima segundo a classificação de Köppen, temperatura média anual (T), precipitação pluviométrica (PP), evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF), tipo e textura do solo e data da instalação do experimento sobre fertilização nitrogenada

Município	Clima ⁽¹⁾	T	PP	ETP ⁽²⁾	ETR ⁽²⁾	DEF ⁽²⁾	Solo ⁽³⁾	Textura	Data
		°C	mm						
Agudos	Aw	21,6	1170	1040	977	62,6	LVd	média	Ago-2005
Altinópolis	Aw	20,7	1517	961	882	79,2	RQ	arenosa	Mai-2002
Angatuba	Cwa	20,6	1262	968	966	1,8	RQ	arenosa	Abr-2006
Botucatu	Cwa	20,2	1302	941	922	19,4	RQ	arenosa	Nov-2005
Capão Bonito 1	Cwa	20,1	1210	939	939	0,8	LAd	argilosa	Jun-1999
Capão Bonito 2	Cwa	20,1	1210	939	939	0,8	LVd	muito argilosa	Fev-2007
Capão Bonito 3	Cwa	20,1	1210	939	939	0,8	CXBd	média	Dez-2006
Itatinga	Cwa	19,9	1308	921	918	2,4	LVAAd	média	Abr-2002
São M. Arcanjo	Cwa	20,4	1174	959	953	5,5	LVAAd	muito argilosa	Ago-2006
Paraíbuna	Cwa	20,8	1249	981	959	22,3	LVAAd	argilosa	Mar-1997
Votorantim	Cwa	21,3	1287	1022	1003	19,2	PVAAd	muito argilosa	Out-2006

⁽¹⁾ Onde Aw significa clima tropical com estação seca de inverno e temperaturas médias no mês mais frio do ano superior a 18°C e Cwa significa clima temperado úmido com inverno seco e verão quente; ⁽²⁾ Obtidos pelo balanço hídrico do solo segundo Thornthwaite e Mather (1955), admitindo-se uma capacidade de armazenamento de água no solo de 125 mm; ⁽³⁾ Conforme EMBRAPA (1999): LVd = Latossolo Vermelho distrófico; RQ = Neossolo Quartzarênico; LAd = Latossolo Amarelo distrófico; LVd = Latossolo Vermelho distrófico; CXBd = Cambissolo Háptico distrófico; LVAAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico

Em todos os sítios haviam ou foram instalados experimentos com doses crescentes de N (Tabela 3), no delineamento blocos casualizados, com 3 repetições. As parcelas úteis possuíam bordadura dupla. Foram usados os seguintes tratamentos neste estudo: testemunha (sem aplicação de N), fertilização comercial (dose de N utilizada pelas empresas) e dose máxima de N aplicada.

Tabela 3 - Nutrientes disponibilizados via fertilização em cada sítio florestal, nos diferentes tratamentos, via fertilização ⁽¹⁾

Sítio	Tratamento	N	P	K	Ca ⁽²⁾	Mg ⁽²⁾	Kg ha ⁻¹			
							B	S	Zn	Cu
Agudos	Test	18	40	198	412	144	4,1	60	1,3	1,3
	N - 120	120	40	198	321	144	4,1	122	1,3	1,3
	N - 240	240	40	198	321	144	4,1	254	1,3	1,3
Altinópolis	Test	20	18	68	235	110	1,1	0	0	0
	N - 140	140	18	68	235	110	1,1	72	0	0
	N - 270	270	18	68	235	110	1,1	72	0	0
Angatuba	Test	42	37	83	72	6	4,6	27	0	0
	N - 140	140	37	83	72	6	4,6	147	0	0
	N - 250	250	37	83	72	6	4,6	307	0	0
Botucatu	Test	18	40	200	412	144	4,1	60	1,3	1,3
	N - 120	120	40	200	321	144	4,1	122	1,3	1,3
	N - 240	240	40	200	321	144	4,1	254	1,3	1,3
Capão Bonito 1	Test	12	35	105	321	144	2,5	0	0	0
	N - 60	60	35	105	321	144	2,5	0	0	0
	N - 100	100	35	105	321	144	2,5	0	0	0
Capão Bonito 2	Test	7	22	108	438	192	2,6	7	2,7	0,5
	N - 120	120	22	108	438	192	2,7	27	4,1	0,5
	N - 220	220	22	197	438	192	5,1	57	8,3	0,5
Capão Bonito 3	Test	7	22	154	340	144	4,8	7	2,5	0,5
	N - 70	70	22	154	340	144	2,6	17	2,5	0,5
	N - 100	100	22	154	340	144	2,6	17	2,5	0,5
Itatinga	Test	4	33	100	420	193	5,9	1	4,5	0,9
	N - 40	40	33	100	420	193	5,9	1	4,5	0,9
	N - 360	360	33	100	420	193	5,9	1	4,5	0,9
Paraíbuna	Test	5	14	72	0	3	0,2	1	0,1	0
	N - 45	45	14	72	0	3	0,2	1	0,1	0
	N - 90	90	14	72	0	3	0,2	1	0,1	0
São M. Arcanjo	Test	34	39	138	0	0	3,5	20	0	0
	N - 140	140	39	138	0	0	3,5	115	0	0
	N - 250	250	39	138	0	0	3,5	210	0	0
Votorantim	Test	7	22	146	18	0	3,0	7	2,1	0,5
	N - 75	75	22	146	18	0	4,1	14	2,1	0,5
	N - 100	100	22	146	18	0	0,6	14	2,1	0,5

⁽¹⁾ Nos sítios de Agudos, de Altinópolis, de Angatuba, de Botucatu, de Capão Bonito 2, de Capão Bonito 3, de Itatinga, de São Miguel Arcanjo e de Votorantim foram usados os fertilizantes sulfato de amônio, monofosfato de amônio, cloreto de potássio como fontes de N, P, K, B, Zn, Cu e S; nos sítios Capão Bonito 1 e Paraíbuna somente a fonte de N foi diferente: o nitrato de amônio. Em Agudos e Botucatu, apenas as testemunhas receberam o nitrato de amônio como fonte de N.

⁽²⁾ O calcário dolomítico foi a fonte de Ca e Mg nos sítios de Agudos, de Altinópolis, de Botucatu, de Capão Bonito 1, de Capão Bonito 2 e de Capão Bonito 3; o sítio de Angatuba recebeu 4 t ha⁻¹ de cinzas de biomassa como fonte de Ca e Mg.

Em todas as parcelas experimentais foram avaliados o diâmetro à altura de 1,30 m (DAP), a altura total e a sobrevivência das árvores. Com essas variáveis estimou-se o incremento médio anual (IMA) e o volume sólido de madeira com casca de cada sítio florestal. A Produtividade Relativa (PR) à fertilização nitrogenada máxima foi calculada pela fórmula:

$$PR (\%) = \frac{Pt}{Pmáx} \times 100$$

onde Pt é a produtividade de madeira com casca de um determinado tratamento e Pmáx é a produtividade de madeira com casca do tratamento que recebeu a maior dose de N.

3.2 Análises laboratoriais das amostras de solo e de folha

Os atributos químicos e físicos dos solos foram determinados para a camada de 0-20 cm em todos os sítios estudados, pois é a camada que tem mostrado os teores de nutrientes mais relacionados com o crescimento das árvores (GONÇALVES et al., 1990). Foram coletadas dez amostras simples de solo, por parcela, em um transecto diagonal à área útil da parcela, nas entrelinhas de plantio. Essas amostras deram origem a uma amostra composta por parcela, que foram secas ao ar, homogeneizadas, destorroadas e peneiradas a 2 mm.

A composição granulométrica (método da pipeta), a densidade do solo e a densidade de partículas foram realizadas segundo a metodologia apresentada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1999). As determinações de pH em CaCl_2 0,01 mol L^{-1} , carbono orgânico, fósforo disponível, S-SO_4^{2-} , cálcio, magnésio, potássio e alumínio trocável, acidez potencial, hidrogênio titulável, capacidade de troca de cátions, saturação de bases e de alumínio foram realizadas segundo Rajj et al. (2001).

A determinação do carbono total (C_t) no solo foi realizada em todas as áreas, somente no tratamento testemunha, na camada de 0-20 cm, pelo método da Dakota do Sul, modificado, por Quaggio e Raij (2001). Este método consiste na oxidação da matéria orgânica pelo dicromato ($Na_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$), sendo a sua quantificação feita por colorimetria e com auxílio de uma reta padrão. O N total (N_t) foi determinado pelo método micro-Kjeldahl (BREMNER, 1965) no Laboratório de Química Analítica Aplicada do Departamento de Ciências Exatas, da ESALQ/USP (Tabela 4).

Tabela 4 – Características físicas e químicas dos solos (camada 0-20 cm) nos 11 sítios estudados

Sítio	Argila	Silte	Areia		MO	pH	P-resina	K	Ca	Mg	H+Al	Al	T	S-SO ₄ ²⁻	V
			Grossa	Fina											
			g kg ⁻¹		g dm ⁻³	CaCl ₂	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³				%			
Agudos	167	27	307	499	21	3,9	3,3	4,8	4,8	2,4	58,8	13,1	70,7	7,0	17
Altinópolis	67	13	387	533	20	4,3	7,0	0,3	11,0	4,0	42,5	4,0	58,0	5,0	28
Angatuba	100	10	293	597	18	4,0	9,5	0,6	5,0	2,5	39,0	6,5	47,0	7,0	17
Botucatu	100	30	320	550	15	4,0	6,5	0,4	4,0	5,0	38,0	5,5	49,5	8,0	25
C. Bonito	478	104	87	331	28	3,9	2,7	1,2	1,7	2,3	89,7	18,7	94,9	9,7	5
C. Bonito 2	653	153	53	141	35	4,4	4,3	2,7	15,2	9,3	80,1	12,7	107,3	9,1	25
C. Bonito 3	272	234	10	484	22	4,1	5,0	1,4	9,9	9,5	81,7	16,3	102,5	8,1	21
Itatinga	193	22	375	410	19	2,6	2,4	0,9	2,1	2,4	60,3	11,4	65,6	7,9	8
Paraíbuna	365	55	439	141	21	4,1	5,2	1,9	6,8	4,2	45,0	6,6	58,0	8,8	22
S. M. Arcanjo	651	173	29	147	44	4,9	45,9	3,0	41,8	14,8	59,3	1,3	100,1	8,9	40
Votorantim	670	111	153	66	50	4,0	4,6	5,0	5,0	2,1	113,6	17,0	125,6	28,7	9

Para análise do conteúdo de nutrientes nas folhas, coletaram-se dois pares de folhas de cada ponto cardeal, do terço superior da copa, no antepenúltimo lançamento de folhas dos galhos, de cinco árvores por parcela. Essas amostras deram origem a uma amostra composta por parcela. As amostras compostas foram acondicionadas individualmente em sacos de papel e destinadas ao Laboratório de Ecologia Aplicada da ESALQ/USP, para a realização das análises químicas. Determinaram-se os fatores de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Zn, Mn, Fe (Tabela 5), conforme métodos descritos por Malavolta et al. (1989).

Tabela 5 – Teores foliares de nutrientes minerais nos diferentes tratamentos e sítios florestais

Sítio	Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S
		g Kg ⁻¹					
Agudos	Test	24,6	1,4	7,9	6,0	2,5	0,9
	N - 120	24,3	1,3	7,9	5,8	2,5	0,8
	N - 240	24,4	1,4	8,5	5,7	2,1	0,8
	DMS⁽¹⁾	3,8	0,4	1,0	1,1	0,3	0,2
Altinópolis	Test	21,3	1,4	6,5	5,1	2,5	0,8
	N - 140	21,7	1,3	6,3	4,6	2,4	0,8
	N - 270	21,1	1,4	6,6	4,8	2,4	0,9
	DMS	3,7	1,0	1,1	1,5	0,0	0,1
Angatuba	Test	17,3	1,0	7,6	6,5	2,1	0,8
	N - 140	19,0	1,0	7,8	6,6	2,0	0,9
	N - 250	19,1	1,0	8,0	6,1	2,1	0,9
	DMS	3,1	0,2	1,2	0,5	0,5	0,1
Botucatu	Test	23,0	1,4	5,4	5,1	2,5	0,8
	N - 120	23,0	1,4	5,6	5,0	2,4	0,8
	N - 240	24,9	1,5	5,5	4,8	2,2	0,9
	DMS	3,1	0,3	0,8	0,6	0,4	0,1
Capão Bonito 1	Test	13,0	0,8	3,4	2,7	1,4	0,5
	N - 60	19,0	1,1	4,4	3,8	1,8	0,7
	N - 100	15,0	1,0	3,5	3,2	1,6	0,5
	DMS	3,2	0,3	0,9	1,1	0,3	0,1
Capão Bonito 2	Test	20,8	1,5	9,3	4,9	2,4	0,9
	N - 120	23,9	1,7	8,8	4,5	2,2	0,9
	N - 220	22,7	1,2	8,4	5,0	2,3	0,9
	DMS	2,7	0,3	1,3	0,7	0,7	0,2
Capão Bonito 3	Test	19,2	1,0	8,9	4,5	2,2	0,9
	N - 70	20,7	1,0	8,8	5,4	2,2	0,9
	N - 100	23,3	1,0	8,6	5,2	2,4	0,9
	DMS	4,4	0,3	1,1	0,9	0,8	0,1
São M. Arcanjo	Test	20,7	1,4	9,0	8,9	1,6	0,8
	N - 140	20,4	1,4	9,0	9,0	1,6	0,8
	N - 250	21,1	1,4	9,0	7,2	1,6	0,8
	DMS	3,4	0,3	0,8	2,2	0,3	0,2
Votorantim	Test	17,8	0,7	7,5	6,4	1,6	0,8
	N - 75	19,2	0,7	7,6	6,4	1,6	0,8
	N - 100	17,9	0,7	7,3	6,2	1,6	0,8
	DMS	4,4	0,2	0,3	0,9	0,1	0,3

⁽¹⁾ Diferença mínima significativa pelo teste de Tuckey, ao nível de 5% de probabilidade

3.3 Mineralização anaeróbia de N

Em todos os sítios florestais estudados foram realizadas amostragens de solo na camada de 0-20 cm para as avaliações das taxas de mineralização de N sob condições anaeróbias de laboratório. Foram realizadas coletas de solo em abril, julho, e novembro de 2007 e em janeiro de 2008. O solo foi extraído por meio de tubos de ferro de 30 cm de comprimento e 5 cm de diâmetro, que foram instalados nas parcelas úteis, na entrelinha, em um transecto diagonal. Cinco amostras simples originaram uma amostra composta. Para a obtenção da umidade do solo, 50g de cada amostra foi seca a 105°C.

As coletas nos 11 sítios foram realizadas em um período máximo de 8 dias, para diminuir as variações climáticas entre sítios. Os tubos foram transportados em posição vertical para o laboratório, na mesma posição que estavam no solo, em caixas térmicas com gelo (temperatura entre 2-5°C), envoltos individualmente por sacos plásticos. A refrigeração foi usada para desacelerar a atividade microbiana, reduzindo assim a mineralização que poderia ocorrer até a extração de N (ARNOLD et al., 2008). As amostras de solos permaneceram resfriadas até o momento da extração de N. As extrações foram realizadas, em no máximo, dois dias após as coletas.

Para a extração inicial de N (t_0), foram colocados 10 g de solo TFSA (< 2 mm) em frascos de 110 ml, no qual, a seguir, foi adicionado 100 ml de KCl 2 mol L⁻¹. Os frascos foram agitados manualmente, até a dispersão dos solos, por aproximadamente 60 segundos e deixados em repouso por 24 horas. Posteriormente, o sobrenadante foi filtrado em filtro Whatman n. 42 150mm, que, após receberem 0,1 ml do inibidor da atividade microbiológica, fenil acetato de mercúrio (0,5 mg L⁻¹), foram submetidas aos procedimentos analíticos para a determinação de NH₄⁺.

As determinações da concentração de NH₄⁺ nos extratos foram realizadas com o emprego do Sistema de Análise por Injeção em Fluxo automático – ASIA (Ismatec, Glattbrugg, Switzerland) (KAMOGAWA, 2009). O NH₄⁺ foi determinado espectrofotometricamente em 605 nm, sendo o limite de detecção obtido de 0,01ug ml⁻¹. Para a obtenção da concentração de NH₄⁺ no solo, cada concentração

obtida pelo sistema FIA foi multiplicada pelo volume de extrato e dividida pela massa de terra seca da amostra.

Para a extração de N potencialmente mineralizável foi realizada a incubação anaeróbia, por métodos químicos, a 40°C por 7 dias, segundo a metodologia proposta por Keeney e Bremner (1966). Para as incubações, foram acrescentados nos frascos, 30 ml de solução nutritiva constituída de: MgSO_4 (0,002 mol L⁻¹) e $\text{Ca (H}_2\text{PO}_4)_2$ (0,005 mol L⁻¹). Os tubos foram agitados manualmente até a dispersão dos solos e, em seguida, tampados com filme de polietileno, para prevenir perdas de água por evaporação e crescimento de algas (GONÇALVES et al., 2001).

A extração de N foi realizada novamente ao 7º dia após o início da incubação, adicionando-se 4,47 g de KCl a cada tubo de centrífuga, para obter uma concentração de 2 mol L⁻¹ de KCl. Os tubos foram agitados manualmente por aproximadamente 60 segundos e foram deixados em repouso por 24 horas e depois filtrados, de forma semelhante à usada para a extração do N presente antes da incubação (t_0). Nos cálculos do N potencialmente mineralizável foi eliminada a quantidade de N obtida no t_0 , por ter sido mineralizado antes da incubação das amostras de solo.

3.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva e à análise de variância (ANOVA). A análise da relação entre as variáveis dependentes e independentes foi realizada por meio de análises de correlação e de regressão. Os programas estatísticos usados para as análises foram o SISVAR (2003) e o SIGMAPLOT (2002).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Nitrogênio potencialmente mineralizável (N_0)

Os valores de N_0 mais elevados foram encontrados nas amostras de solo coletadas no verão (Tabela 6). Variações nas taxas de mineralização do N sob condições de laboratório, influenciado pela época de amostragem, também foram observadas por Adams e Attiwill (1986), Khanna (1990), Smethurst e Nambiar (1990) e Theodorou e Bowen (1983a). Estes autores também encontraram maiores taxas de mineralização de N no verão. Para Theodorou e Bowen (1983a,1983b), as flutuações sazonais na disponibilidade de N mineral estão relacionadas com a atividade de microorganismos no solo, que é afetada principalmente pela temperatura e umidade do solo (GONÇALVES; CARLYLE, 1994). As temperaturas médias mais elevadas e os maiores índices pluviométricos encontrados no verão são os fatores que mais influenciam o crescimento da população microbiana, conseqüentemente, o aumento da taxa de mineralização. Ao se incubar uma amostra de solo coletada durante o verão, incuba-se também uma maior população microbiana, o que vai acarretar em uma maior taxa de mineralização. As amostras de solo coletas em outros períodos do ano também resultaram em boas correlações com os teores de MO, argila e N_t (Tabela 7). Os valores mais elevados em janeiro mostram que a determinação de N_0 nessa época fica mais próxima do real. Esses resultados demonstram que as disponibilidades de N são fortemente afetadas pelas condições climáticas.

Tabela 6 – N potencialmente mineralizável (N₀) em diferentes épocas do ano nos sítios estudados

Sítio	N ₀			
	Abril 2007	Julho 2007	Novembro 2007	Janeiro 2008
	mg kg ⁻¹			
Agudos	30	42	73	60
Altinópolis	26	20	47	60
Angatuba	28	46	39	61
Botucatu	53	31	56	66
Capão Bonito 1	56	69	91	111
Capão Bonito 2	114	– ⁽¹⁾	112	107
Capão Bonito 3	104	–	95	115
Itatinga	71	43	73	75
Paraíbuna	125	83	108	138
São M. Arcanjo	34	91	98	125
Votorantim	158	–	134	154
Média	74	53	82	98
± s	47	25	31	34

⁽¹⁾ Dados não coletados

Tabela 7 – Correlação entre N₀ e os teores de MO, de argila e de N total (N_t) em diferentes épocas de amostragem

Época de amostragem	MO	Argila	N _t
	r		
Abr 2007	0.77** ⁽¹⁾	0.80**	0.93**
Jul 2007	0.79**	0.92**	0.91**
Nov 2007	0.78**	0.88**	0.92**
Jan 2008	0.76**	0.83**	0.92**

⁽¹⁾ ** = significância ao nível de 1%.

Os valores de N_0 variaram entre 60 e 154 mg kg^{-1} de solo (189 e 311 kg ha^{-1}), com média de $98 \pm 11 \text{ mg kg}^{-1}$ de solo ($235 \pm 18 \text{ kg ha}^{-1}$) (Tabela 8). Gonçalves et al. (2001) encontraram valores semelhantes para plantações de eucalipto: entre 50 e 249 mg kg^{-1} de solo com média de $111 \pm 23 \text{ mg kg}^{-1}$ de solo. Os teores de N_0 foram altamente correlacionadas com os de N_t ($r = 0.92$; $p < 0,0001$) (Figura 2). Isso confirma que esses dois atributos são bons indicadores da capacidade de mineralização de N no solo, como também observado por Pottker e Tedesco (1979). N_0 também apresentou boas correlações com os teores de MO e de argila, mas inferiores às obtidas com N_t (Figuras 3b e 4b). Assim, essas variáveis correlatas também servem como indicadoras da disponibilidade de N. O N_0 não se correlacionou com os demais atributos químicos do solo.

Tabela 8 – Teores de argila, de matéria orgânica (MO), de C total (C_t), de N total (N_t), de N potencialmente mineralizável (N_0), relação C/N, razão N_0/N_t , nos sítios estudados

Sítio	Argila	MO	C_t	N_t	N_0	C / N	N_0 / N_t
	g kg^{-1}		mg kg^{-1}				%
Agudos	167	16	9.233	387	60	24	16
Altinópolis	67	13	7.727	387	60	20	15
Angatuba	100	12	7.026	323	61	22	19
Botucatu	100	12	7.091	301	66	24	22
Capão Bonito 1	478	23	13.403	774	111	18	14
Capão Bonito 2	653	32	18.814	981	107	19	11
Capão Bonito 3	272	16	9.342	810	115	12	14
Itatinga	193	14	7.850	589	75	14	14
Paraíbuna	365	19	10.838	893	138	12	16
São M. Arcanjo	651	42	24.498	1267	125	19	10
Votorantim	670	51	29.724	1276	154	23	12
Média	338	23	13.231	726	98	19	15
$\pm s$	239	13	7.762	359	34	4	3

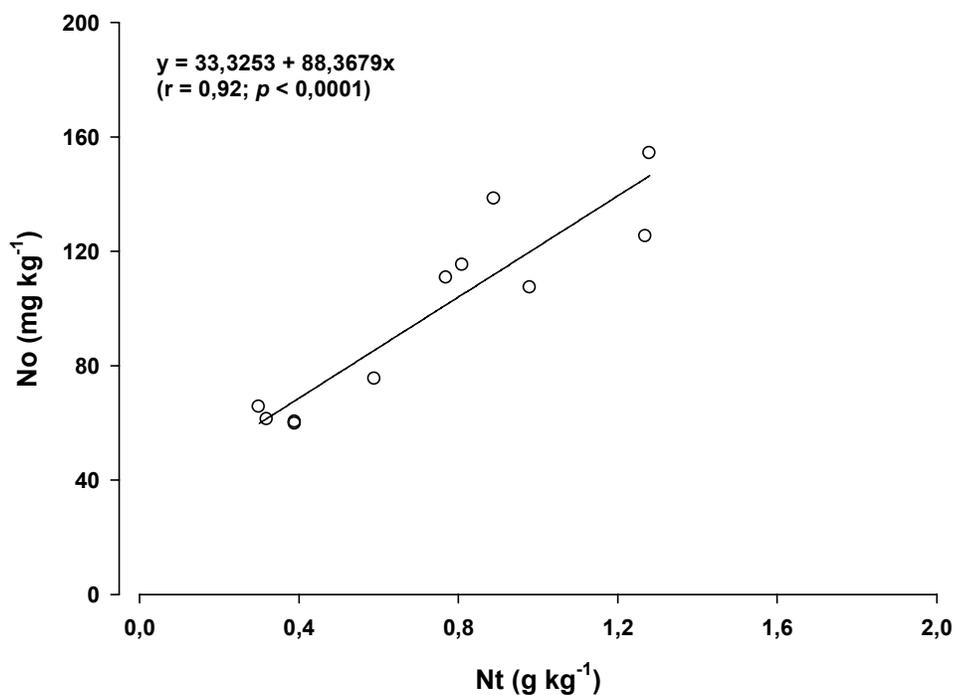


Figura 2 – Correlação entre o N total (N_t) e o N potencialmente mineralizável (N_0) nos diferentes sítios florestais

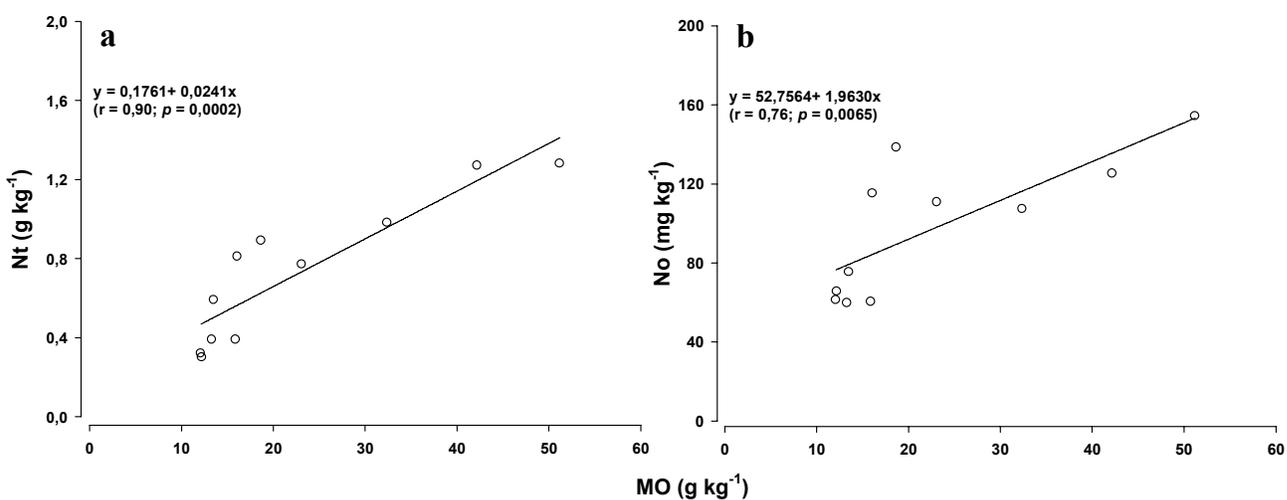


Figura 3 – Correlações entre a matéria orgânica do solo (MO) e o N total (N_t) (a) e o N potencialmente mineralizável (N_0) (b), nos diferentes sítios florestais

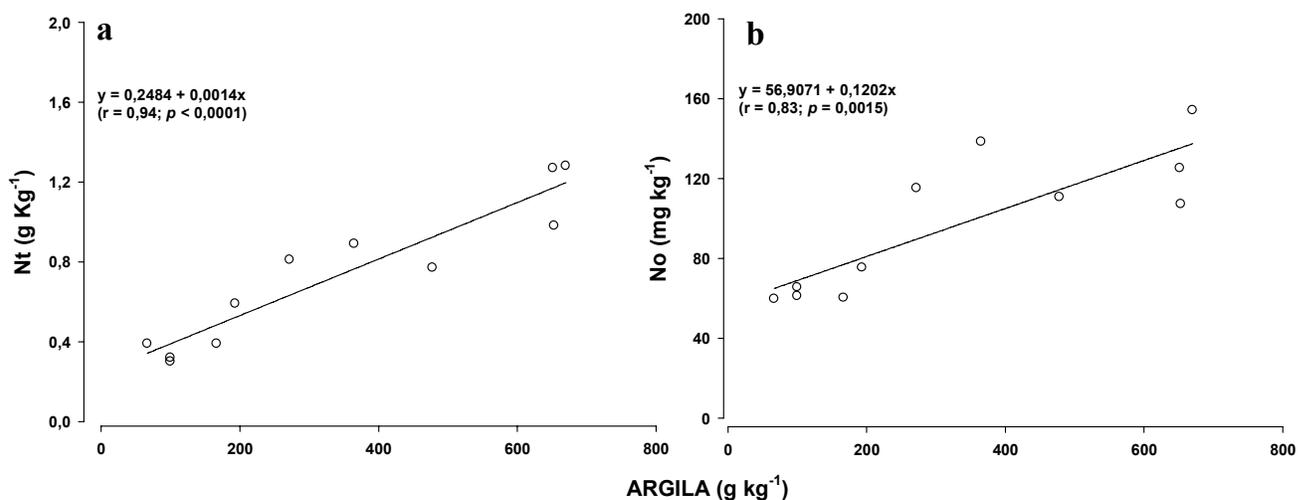


Figura 4 – Correlações entre os teores de argila e o N total (N_t) (a) e o N potencialmente mineralizável (N_o) (b), nos diferentes sítios florestais

A razão N_o/N_t variou, na sua grande maioria, entre 10 e 16%; o N_t representou de 3 a 5% da MO (Tabela 8). Em outras palavras, apenas 10 a 16% do N orgânico seria decomponível. Gonçalves et al. (2001) encontraram razões N_o/N_t parecidas, entre 5 a 15%. Essa razão diminuiu com o aumento do teor de argila (Figura 5). Assim, relativamente, há maior disponibilidade de N em solos com menor teor de argila. Contudo, em termos absolutos, os solos mais argilosos possuem mais N potencialmente disponível às plantas, pois os estoques de N_t são maiores. A maior facilidade de mineralização do N orgânico em solos arenosos se deve em grande parte a melhor aeração provida por esse tipo de solo. Correlação positiva foi observada entre o N_t e o teor de argila (Figura 4a).

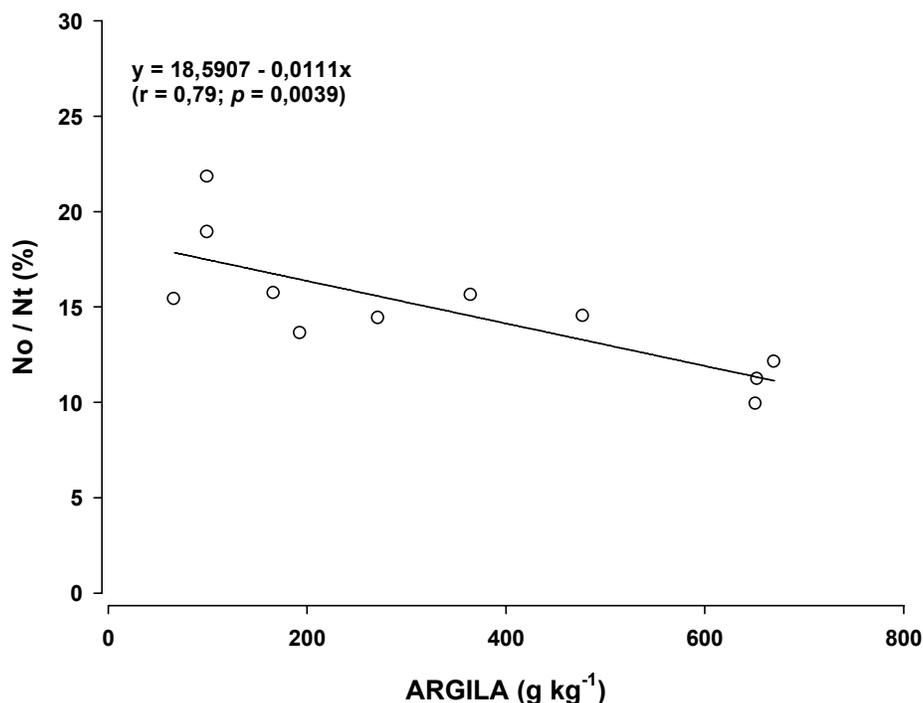


Figura 5 – Correlação entre o teor de argila e a razão N_0/N_t (N potencialmente mineralizável / N total), nos diferentes sítios florestais

A razão C/N variou de 12 a 24, com média de 19 ± 4 (Tabela 8). Tudo indica que, para a maioria das áreas estudadas o N orgânico está em fase de bioestabilização, ou seja, nem imobilizado e nem mobilizado (KIEHL, 1979). Assim, nos estádios iniciais dos povoamentos, o solo provavelmente não fornecerá o N demandado pelas árvores. Posteriormente, o N orgânico vai sendo mineralizado e o solo passa a atender a demanda da planta. Valores elevados para a razão também foram encontradas em plantações de eucalipto por Maquere et al. (2008), Montero (2008) e Lima et al. (2006). Estes autores verificaram que os teores de C total eram aumentados em plantações de eucalipto. Ou seja, em plantações de eucalipto a qualidade da matéria orgânica acumulada no solo é mais recalcitrante, fazendo com que o processo de liberação de N seja mais lento, pois a mineralização do N orgânico do solo está diretamente relacionada com o caráter lábil ou recalcitrante das frações da MO e com a atividade dos grupos microbianos que as utilizam (CAMARGO et al., 1997). Ainda que esse efeito seja desfavorável à nutrição das plantas em curto prazo, os efeitos são benéficos em

longo prazo, pois causam diminuição das perdas de N por lixiviação e volatilização, sem prejudicar a nutrição de culturas permanentes, que têm mais tempo para atender suas demandas nutricionais (VITOUSEK, 1984; CARLYLE, 1986; ATTIWILL; LEEPER, 1987; GONÇALVES et al. 2004). Esses autores também verificaram que o armazenamento de C na manta orgânica acumulada sobre o piso florestal é maior em plantações de eucalipto do que em áreas naturais de cerrado e de pastagens.

A razão C/N foi inversamente correlacionada com o N_0 (Figura 6). Isso confirma que quanto mais recalcitrante for a MO menor o teor N potencialmente disponível às árvores. Assim, esse atributo, além de influenciar diretamente a mineralização de N, também afeta o estoque de N não prontamente disponível. Apesar da razão C/N ser maior em florestas de eucalipto do que em áreas de cerrado (MAQUERE et al. 2008), Gonçalves et al. (2001) encontraram nestas áreas valores de N_0 que variaram de 39 a 269 mg N kg⁻¹, com média de 159 ± 45 mg N kg⁻¹, similares aos encontrados nas plantações de eucalipto do presente estudo.

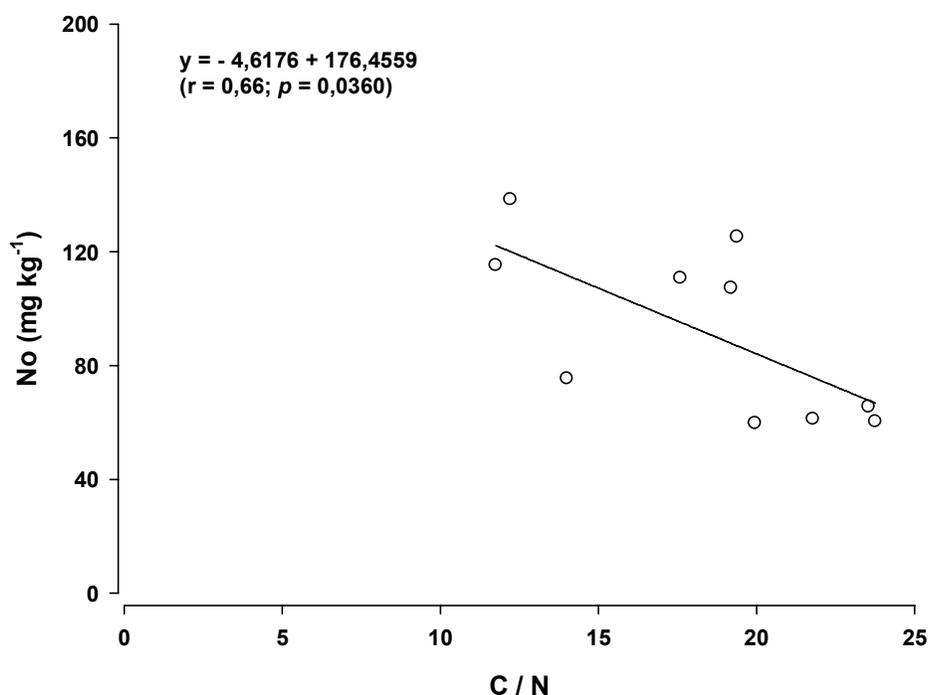


Figura 6 – Correlação entre a razão C/N e o N potencialmente mineralizável (N_0), nos diferentes sítios florestais

4.2 Resposta à fertilização nitrogenada

Nos povoamentos jovens, com idade entre 1 a 2,2 anos, o Incremento Médio Anual (IMA) do tratamento testemunha variou de 10 a 48 m³ ha ano⁻¹, com média de 24 ± 4 m³ ha ano⁻¹; nos tratamentos que receberam fertilização comercial, o IMA variou de 11 a 55 m³ ha ano⁻¹, com média de 26,7 ± 4 m³ ha ano⁻¹. Nos povoamentos com idade intermediária, entre 3 a 4 anos, o IMA da testemunha variou de 36 a 57 m³ ha ano⁻¹, com média de 45 ± 3% e, no tratamento que recebeu fertilização comercial, entre 38 a 62 m³ ha ano⁻¹, com média de 47 ± 3 m³ ha ano⁻¹. Próximo ou depois da idade de colheita, entre 5,7 e 11,4 anos, o IMA variou de 38 a 50 m³ ha ano⁻¹, com média de 46 ± 4 m³ ha ano⁻¹ e, nos tratamentos que receberam fertilização comercial, entre 38 a 51 m³ ha ano⁻¹, com média de 46 ± 4 m³ ha ano⁻¹ (Tabela 9). Em média, a fertilização nitrogenada foi responsável pelo aumento de 14%, 6% e 0% no IMA, nas idades jovem, intermediária e final da rotação de cultivo, respectivamente. O IMA não se correlacionou com o teor de argila do solo, forte indicador da qualidade do sítio, diferentemente do que foi observado por Gava e Gonçalves (2008). Provavelmente porque esses pesquisadores trabalharam somente com plantações clonais de um mesmo genótipo, sem as variações de genótipos e de formas de propagação usadas neste estudo. Quanto a produtividade relativa (PR), nos povoamentos jovens do tratamento testemunha, houve variação de 74 a 98%, com média de 87 ± 2%; para o tratamento que receberam fertilização comercial, a PR variou de 88 a 111%, com média de 100 ± 2%. Com idade intermediária, a PR da testemunha variou de 90 a 98%, com média de 95 ± 1% e, nos tratamentos que receberam fertilização comercial, entre 98 a 107%, com média de 100 ± 1%. Próximo ou depois da idade de colheita, a PR variou de 99 a 103%, com média de 102 ± 1%. O mesmo foi encontrado para os tratamentos que receberam fertilização comercial. Em média, nos povoamentos mais jovens, a fertilização resultou num aumento de 12% de produtividade. Essa resposta caiu para 6% entre 3 e 4 anos de idade. Na idade de corte, não foi observada resposta à fertilização. Assim, a recomendação de fertilização usada nas empresas florestadoras é suficiente para atender a demanda das árvores e, em alguns casos, é maior do que a demanda.

Tabela 9 – Altura (H), diâmetro à altura do peito (DAP), volume sólido com casca (VS), incremento médio anual (IMA), produtividade relativa (PR) nos diferentes tratamentos e idades, nos sítios estudados. Valores seguidos da mesma letra, por idade, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p=0,05$)

Sítio	Tratamento	H		DAP			VS			IMA			PR			
		m		cm			m ³ ha ⁻¹			m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹			%			
		2	3	2	3		2	3		2	3	2	3			
Agudos	Test	11,7 a	17,2 a	8,3 a	11,3 a		52 a	132 a		26 a	44 a			98	98	
	N - 120	11,7 a	17,3 a	8,5 a	11,3 a		52 a	133 a		26 a	44 a			98	99	
	N - 240	11,7 a	17,4 a	8,6 a	11,4 a		53 a	135 a		27 a	45 a			100	100	
Altinópolis	Test	11,8	4	5,7	1,8	4	5,7	1,8	4	5,7	1,8	4	5,7	1,8	4	5,7
	N - 140	11,1 a	20,6 a	25,4 a	8,9 a	14,0 a	15,0 a	45 a	192 a	285 a	25 a	48 a	50 a	83	97	104
	N - 270	11,9 b	20,5 a	24,9 a	9,4 ab	14,3 a	15,4 a	55 b	198 a	285 a	31 b	50 a	50 a	101	100	103
Angatuba	Test	9,8 a			15,8 a			96 a			48 a			89		
	N - 140	10,2 a			16,3 a			109 a			55 a			101		
	N - 250	10,4 a			16,2 a			108 a			54 a			100		
Botucatu	Test	10,2 a	15,3 a		8,3 a	11,1 a		40 a	172 a		20 a	57 a		95	98	
	N - 120	10,2 a	15,4 a		8,5 a	11,1 a		47 a	187 a		23 a	62 a		111	107	
	N - 240	10,0 a	15,2 a		8,4 a	11,1 a		42 a	176 a		21 a	59 a		100	100	
Capão Bonito 1	Test	9,6 a	19,6 a	29,6 a	8,1 a	14,4 a	19,0 a	28 a	168 a	452 a	14 a	42 a	50 a	74	90	99
	N - 60	10,1 ab	21,0 b	29,9 a	8,7 b	15,0 b	19,2 a	33 ab	184 ab	460 a	17 ab	46 b	51 a	88	98	101
	N - 100	10,9 b	21,4 b	30,0 a	9,1 b	15,2 b	19,2 a	38 b	187 b	455 a	19 b	47 b	51 a	100	100	100
Capão Bonito 2	Test	5,7 a			4,6 a			10 a			10 a			84		
	N - 120	5,7 a			4,6 a			11 a			11 a			92		
	N - 220	6,1 a			5,0 a			12 a			12 a			100		
Capão Bonito 3	Test	6,5 a			5,1 a			14 a			13 a			87		
	N - 70	6,9 b			5,5 a			16 a			14 a			100		
	N - 100	6,8 ab			5,6 a			16 a			14 a			100		
Itatinga	Test	10,9 a	20,5 a		8,4 a	12,2 a		50 a	159 a		25 a	40 a		83	91	
	N - 40	11,6 a	20,3 a		8,8 b	12,2 a		60 b	174 a		30 b	43 b		98	100	
	N - 360	11,6 a	20,8 a		9,1 c	12,4 a		61 b	174 a		30 b	44 b		100	100	
Paraibuna	Test	2,2	4,0	11,4	2,2	4,0	11,4	2,2	4,0	11,4	2,2	4,0	11,4	2,2	4,0	11,4
	N - 45	9,2 a	17,4 a	28,3 a	7,5 a	12,5 a	18,2 a	33 a	146 a	439 a	15 a	36 a	39 a	78	95	102
	N - 90	10,1 a	18,1 a	28,6 a	8,5 a	12,9 a	18,1 a	42 a	153 a	430 a	19 a	38 a	38 a	100	100	100
São M. Arcanjo	Test	9,4 a			12,2 a			68 a			45 a			96		
	N - 140	9,8 a			12,2 a			73 a			49 a			104		
	N - 250	9,9 a			12,2 a			71 a			47 a			100		
Votorantim	Test	6,9 a			6,8 a			21 a			18 a			93		
	N - 75	7,4 a			7,2 a			25 b			21 a			109		
	N - 100	7,1 a			7,0 a			23 a			19 a			100		

Na maioria dos sítios estudados, as análises foliares foram realizadas no período que ainda havia resposta a fertilização nitrogenada, ou seja, entre um a dois anos de idade. Os teores de N nas folhas apresentaram-se dentro da faixa considerada adequada (GONÇALVES, 1995b). Não houve diferenças entre os teores foliares de N nos tratamentos com e sem adição de N (Tabela 5). Resultado semelhante foi encontrado para Shönau e Herbert (1983).

A resposta relativa à aplicação de N foi maior nos sítios com solos mais arenosos, embora o incremento e o volume absoluto fossem maiores nos sítios de solos com texturas média ou argilosa (Figura 7). Nos dois primeiros anos, a PR da testemunha foi em média 16% menor do que a observada nos tratamentos que receberam fertilização comercial nos solos de textura arenosa, 9% menor nos solos de textura média e 10% menor nos solos de textura argilosa e muito argilosa. Assim, o maior potencial de resposta à fertilização nitrogenada, em idade jovem, ocorreu nos solos onde foram encontrados os menores teores de N_t e N_0 . No entanto, semelhante ao encontrado nos solos com textura mais argilosa, essa resposta desaparece ao final do ciclo, evidenciando que mesmo nos solos arenosos os estoques de N disponível no solo e a ciclagem de nutrientes são capazes de atender a demanda de N das árvores.

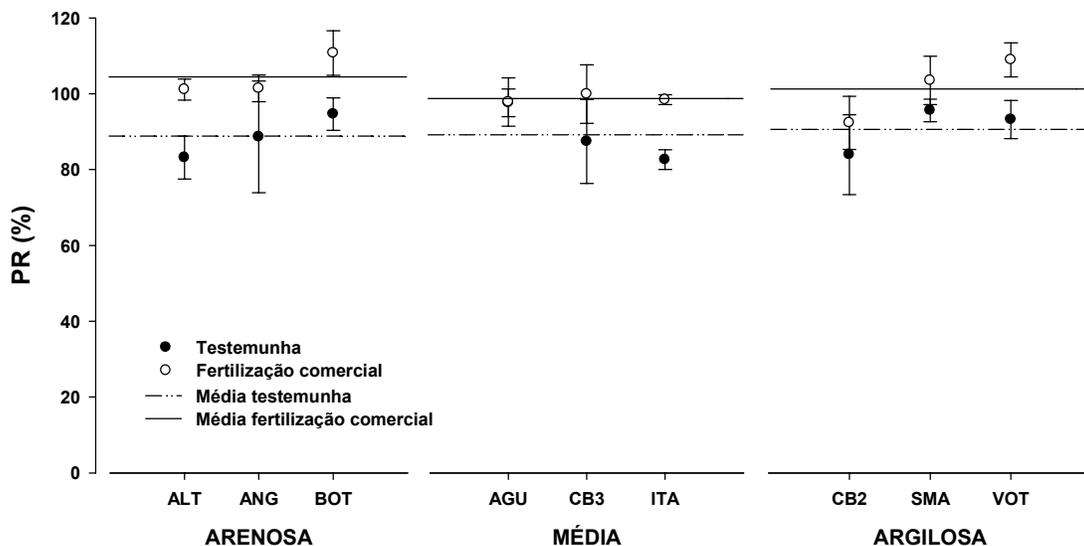


Figura 7 – Produtividades Relativas (PR) dos tratamentos Testemunha e Fertilização Comercial em função da textura do solo em resposta à adubação nitrogenada, em idade jovem (1 a 2,2 anos), nos diferentes sítios florestais

As PRs nos povoamentos jovens e de idade intermediária não se correlacionaram com a razão N_o/N_t , mesmo nos sítios mais arenosos (Figura 8). Esse é mais um indicativo que o N disponível existente no solo é suficiente para atender a demanda das árvores. Daí a pequena resposta à fertilização nitrogenada apenas na fase inicial de crescimento das árvores, quando são formados em maior quantidade os componentes da árvore com alta concentração de N, portanto, numa fase de maior demanda de N. Em plantações de eucalipto no Brasil, cerca de 70 a 80% do N acumulado na biomassa ocorre nos primeiros 4 a 5 anos de crescimento do povoamento (BARROS et al., 1990, 2000). Na fase inicial de crescimento, o acúmulo relativo de N é maior do que o acúmulo relativo de biomassa, fase em que há maior proporção de biomassa na forma de folhas, ramos novos e raízes finas, componentes com concentrações mais elevadas de N (REIS et al., 1987). Em idades mais avançadas, após o terceiro ano, o ritmo de crescimento das árvores diminui, o que se reflete na demanda de N, em grande parte atendida pelo N disponibilizado pela mineralização da serapilheira (ciclagem biogeoquímica) e pela retranslocação interna (ciclagem bioquímica) (BARROS et al., 1990, 2000; GONÇALVES et al., 1995a, 2000). Gonçalves et al. 2008a verificaram a ciclagem de $54 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ pela forma bioquímica e $42 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ pela forma biogeoquímica em povoamento de *E. grandis* aos 7 anos de idade; quantidades superiores às demandadas pelas árvores ($50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$). Assim, nos estádios iniciais dos povoamentos, a fertilização nitrogenada pode acelerar o ritmo de crescimento das árvores, pois aumenta a disponibilidade de N numa fase em que as taxas de mineralização de N no solo e nos resíduos vegetais não conseguem atender a alta demanda das árvores. Ou seja, quando se considera toda a rotação de cultivo, os estoques de N biodecomponíveis são suficientes para atender as demandas das árvores, mas não numa taxa de mineralização suficiente para atender a fase de rápido crescimento inicial das árvores. Em idades mais avançadas, quando o ritmo de crescimento diminui devido à competição entre árvores, as quantidades de N mineralizadas são suficientes para atender a demanda das árvores, levando a um decréscimo gradual das respostas à fertilização com a idade.

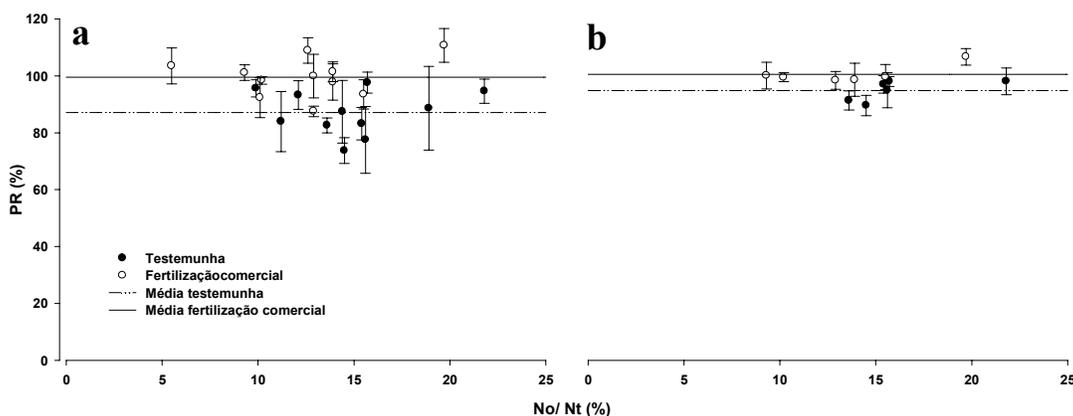


Figura 8 – Correlação entre a Produtividade Relativa (PR) e a razão N_0/N_t , em idade jovem (1 a 2,2 anos) (a) e idade intermediária (3 a 4 anos) (b)

4.3 Potencial futuro de resposta à fertilização nitrogenada

Essencialmente, para se definir a fertilização mineral para qualquer cultura faz-se necessário dimensionar a demanda de nutrientes da planta para atingir a produção esperada e a quantidade de nutrientes que pode ser suprida pelo solo. Quando a demanda da planta for maior do que o solo pode ofertar, fertilizantes devem ser adicionados para obter-se a produção esperada. Sendo assim, os critérios para a fertilização nitrogenada devem discriminar apenas as situações em que haja resposta à aplicação deste fertilizante, pois esta fertilização tem como objetivo apenas suplementar o N que não foi disponibilizado pelos solos ou pela fixação biológica de N_2 . Ela não tem como objetivo elevar os teores de N no sítio para plantios futuros (GONÇALVES et al., 2008b). A prática da fertilização deve ser combinada com formas conservacionistas de manejo, que reduzam as perdas de N do sistema, o que aumenta sua sustentabilidade (GONÇALVES, et al., 2004). Como visto no presente estudo, os teores de N_t e N_0 e a razão N_0/N_t constituem bons indicadores da disponibilidade de N.

Em plantações de *Eucalyptus grandis* no estado de São Paulo, manejadas com práticas de cultivo mínimo, a exportação média de N (via madeira descascada) é de 224 kg ha⁻¹ por rotação de sete anos (GONÇALVES et al., 2008a). Assim, por meio de um balanço de entrada e saída de N no sistema, verifica-se que os estoques de N_0 da camada superficial de solo (0-20 cm) são suficientes para 3 a 4 rotações de cultivo.

Adicionalmente, admitindo-se que em camadas de solo inferiores a 20 cm também seja absorvido certa quantidade de N (bem inferior à camada superior), que sejam realizadas adubações nitrogenada equivalentes a 50-60 kg ha⁻¹ por (considerando cerca de 80% de aproveitamento do fertilizante pelas árvores), e que, por meio de chuvas, sejam depositados cerca de 8-10 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (LARCHER, 2004), teoricamente, os estoques de N serão suficientes para mais 1 a 2 rotações de cultivo. Portanto, estima-se que as reservas médias de N dos sítios pesquisados sejam suficientes para 4 a 5 rotações de *E. grandis*. Porém, se a opção do manejo for pela extração da casca, ou seja, não realizar o descascamento no campo, o sítio perderá mais 36 kg ha⁻¹ rotação⁻¹ de N (GONÇALVES et al., 2008a). Assim, as reservas médias de N diminuiriam em uma rotação, ou seja, seriam suficientes para somente 3 a 4 rotações. No fim desse período, é provável que as respostas à fertilização nitrogenada sejam significativas.

Gonçalves et al. (1996) definiram uma tabela de recomendação de fertilização nitrogenada para *Eucalyptus* baseada em três classes de teor de matéria orgânica do solo, por considerarem que esta variável possui relação direta com a disponibilidade de N e com a produtividade florestal. Atualmente, há informações que indicam a necessidade de considerar-se outras condicionantes no processo de recomendação de fertilização nitrogenada para o eucalipto (BARROS et al., 2000; CANTARELLA; RAIJ, 1986), a fim de se conseguir maior precisão e menor desperdício de fertilizantes. Faz-se necessário também estimar qual a disponibilidade de N na MO. Para isso, as variáveis N_t e N₀ e a razão N₀/N_t, de fácil determinação em laboratório, devem ser usadas como indicadores essenciais.

É preciso levar em conta que diferenças na eficiência nutricional entre espécies florestais (GONÇALVES et al., 2008a), entre procedências e híbridos de eucalipto (PAULA et al., 1997) têm sido verificadas como um importante fator no uso racional de fertilizantes. Os genótipos podem diferir na eficiência de aquisição de N do solo e/ou na utilização destes nutrientes para produção de biomassa. Assim, o genótipo e sua interação com o ambiente são fatores importantes que devem ser considerado na otimização das prescrições de fertilizantes em plantações florestais (GONÇALVES et

al., 2008b). Práticas que elevem o estoque de N orgânico no solo devem ser encorajadas, como por exemplo, o uso de fixadores simbióticos. De acordo com Debell et al. (1997), espécies arbóreas fixadoras de N possuem alta capacidade de aumentar os conteúdos de C no solo. Dessa maneira é possível aumentar a estabilidade da MO no solo (GONÇALVES et al, 2008b).

5 CONCLUSÕES

- Os teores de argila e de N total (N_t) correlacionaram-se com os valores da MO. O N_t representou apenas de 3 a 5% da MO. As razões entre as concentrações de N_0 e de N_t variaram, na sua grande maioria, entre 10 a 16%. Assim, 10 a 16% do teor de N_t , principal fonte de N para as árvores, foi decomponível. Os teores de MO, de argila e de N_t correlacionaram-se positivamente com o N_0 , sendo que o último obteve a maior correlação;
- O N_t e o N_0 , frações não prontamente disponíveis, positivamente correlacionados com a MO do solo, podem ser considerados como bons indicadores da disponibilidade de N nos solos. Assim, eles podem ser utilizados em modelos matemáticos que visam recomendar a fertilização nitrogenada para plantações de eucalipto;
- Em média, nos povoamentos mais jovens, 1 a 2,2 anos de idade, a fertilização resultou num aumento de 12% de produtividade de madeira. Numa idade intermediária, entre 3 e 4 anos, essa resposta caiu para 6%. Na idade de corte, não foi observada resposta à fertilização. Assim, a recomendação de fertilização usada nas empresas florestadoras é suficiente para atender a demanda das árvores e, em alguns casos, é maior do que a demanda;
- As Produtividades Relativas nos povoamentos jovens e de idade média não se correlacionaram com a razão N_0/N_t . Isso indica que o N disponível existente no solo é suficiente para atender a demanda das árvores. Daí a pequena resposta à fertilização nitrogenada apenas na fase inicial de crescimento das árvores, quando são formados em maior quantidade os componentes da árvore com maior concentração de N;
- Os estoques de N da camada superficial (0-20 cm) são suficientes para 4 a 5 rotações de cultivo (7 anos cada), se levado em consideração a saída média de N do sistema via exportação pela colheita, e as entradas via fertilização e deposição atmosférica;
- Assim, retomando as hipóteses iniciais do estudo, verificou-se que:

- I. Apesar de N_0 ser um bom indicador da disponibilidade de N nos solos, não foi possível corroborar a primeira hipótese, pois dos 11 sítios estudados, nenhum apresentou resposta à fertilização nitrogenada;

Pela mesma razão, a segunda hipótese não foi corroborada.

REFERÊNCIAS

ADAMS, M.A.; ATTIWILL, P.M. Nutrient cycling and nitrogen mineralization in eucalypt forests of southern-eastern Australia- II. Indices of nitrogen mineralization. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.92, p.341-362, 1986.

ARNOLD, J.; CORRE, M.D.; VELDKAMP, E. Cold storage and laboratory incubation of intact soil cores do not reflect in-situ nitrogen cycling rates of tropical Forest soils. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 40, p. 2480-2483.

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

BARROS, N.F.; BRAGA, J.M.; BRANDI, R.M.; DEFELIPO, B.V. Produção de eucalipto em solos de cerrados em resposta à aplicação de NPK e de B e Zn. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 5, n. 90, 103p, 1981.

BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. (Ed). **Relação Solo- Eucalipto**. Viçosa: Ed. Folha de Viçosa, 1990. cap 4 p.127-186.

BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. In: ATTIWILL, P.M., ADAMS, M.A. (Ed.). **Nutrition of the Eucalypts**. Collingwood: CSIRO Publishing, 1995. p. 335-356.

BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F. Recomendação de fertilizantes minerais em plantios de eucalipto. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. cap 9 p. 269-286.

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**, Piracicaba, v. 20, p.1-23, 1980.

BELLOTE, A.F.J.; SILVA, H.D. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus*. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. cap. 4, p. 106-133.

BINKLEY, D.; HART, S.C. The components of nitrogen availability assessments in Forest soils. **Advances in Soil Science**, Bushland, v.10, p. 57-112, 1989.

BREMNER, J.M. Organic nitrogen in soils. In: BARTHOLOMEW, W.V. CLARK, F.E. (Ed). **Soil nitrogen**. Madson: American Society of Agronomy, 1965. v. 10, p. 93-149.

CAMARGO, F.A.O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Distribuição do nitrogênio fácil e difícil mineralização, da fração lábil e recalcitrante, do fluxo inicial e meia vida da mineralização e fração ativa do nitrogênio em solos do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 25., 1995. Viçosa. **Anais...** Viçosa, 1995. p. 710-712.

CAMARGO, F.A.O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Potencial de mineralização do nitrogênio em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 575-579, 1997.

CANTARELLA, H.; VAN RAIJ, B. Adubação nitrogenada no Estado de São Paulo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 16., 1985, Ilhéus. Adubação Nitrogenada no Brasil. **Anais...** Ilhéus: CEPLAC, 1986. p.47-79.

CARLYLE, J.C. Nitrogen cycling in forested ecosystems. **Forestry Abstract**, Oxford, v. 47, p. 307-336, 1986.

DEBELL, D.S.; COLE, T.G., WHITESELL, C.D. Growth, development, and yield of pure and mixed stands of *Eucalyptus* and *Albizia*. **Forest Science**, Washington, v. 43, p. 286-298, 1997.

DONALD, D.G.; SCHULTZ, C.J. The response of eucalyptus to fertilizer applications of planting: The Louw's Creek trial. **South African Forestry Journal**, Pretoria, v. 102, p. 23-28, 1977.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro, 1999. 212p.

FLINN, D.W.; SQUIRE, R.O.; FARREL, P.W. The role of organic matter in the maintenance of site productivity on sandy soils. **New Zealand Journal Forest**, Christchurch, v. 52, p.226-229, 1980.

GAVA, J.L. ; GONÇALVES, J. L. M. Soil attributes and wood quality for pulp production in plantations of *Eucalyptus grandis* clone. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 306-313, 2008.

GIANELLO, C.; CAMARGO, F.A.O.; VIDOR, C. Subestimação do nitrogênio potencialmente mineralizável do solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995, Viçosa. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995. p. 708-709.

GIANELLO, C.; BREMNER, J.M. A simple chemical method of assessing potentially available organic nitrogen in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 17,n.2, p. 195-214, 1986.

GODINHO, V.P.C.; BARROS, N.F.; PEREIRA, P.R.G.; SEDIYAMA, C.S. Fluxo parcial de nitrogênio e potássio em solo arenoso de cerrado, sob povoamentos de *Eucalyptus camaldulensis*, influenciado pelo modo de aplicação de adubo nitrogenado e potássico. In: IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTUS, 1997, Salvador. **Proceedings...**Colombo: EMBRAPA, CNPF, 1997. v. 4, p.125-133.

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

GONÇALVES, J.L.M.; CARLYLE, J.C. Modelling the influence of moisture and temperature on net nitrogen mineralization in a forested sandy soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 26, n. 11, p. 1557-1564, 1994.

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. (Ed.).In: SEMINÁRIO SOBRE CULTIVO MÍNIMO DO SOLO EM FLORESTAS, 1., 1995, Curitiba.**Seminários...** Curitiba: editora, 1995a. p. 43-60.

GONÇALVES, J.L.M. Recomendações de adubação para Eucalyptus, Pinus e espécies típicas da Mata Atlântica. **Documentos Florestais**, Piracicaba, v. 15, p. 1-23, 1995b.

GONÇALVES, J.L.M. Principais solos usados para plantações florestais. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. (Ed.). **Conservação e cultivo de solos para plantações florestais**. Piracicaba: IPEF, 2002. p.1-45.

GONÇALVES, J.L.M.; RAIJ, B.; GONÇALVES, J.C. Florestais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas e Fundação IAC, 1996. p. 245-259.

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. (Ed.). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACIAR Austrália/CSIRO Austrália/CIFOR Indonésia, 1997. p. 379-418.

GONÇALVES, J.L.M.; MENDES, K.C.F.S.; SASAKI, C.M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p.601-616, 2001.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L. Reflexo do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e na nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e Fertilização Florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. cap. 1, p. 01-58.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L.; Evaluation of minimum and intensive soil preparation regarding fertility and tree nutrition. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Forest nutrition and fertilization**. Piracicaba: IPEF, 2004. p.13-64.

GONÇALVES, J.L.M.; WICHERT, M.C.P.; GAVA, J.L.; SERRANO; M.I.P. Soil fertility and growth of *Eucalyptus grandis* in Brazil under different residue management practices. In: NAMBIAR, E.K. (Ed.). **Site Management and Productivity in Tropical Plantation Forests**. Bogor: CIFOR, 2008a. p. 51-62.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P; BOUILLET, J.P; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast growing Eucalypt plantations: The Brazilian experience. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, Pretoria, v. 70, p. 105-118, 2008b.

HERBERT, M.A.; SCHÖNAU, A.P.G. Fertilizing commercial forest species in southern Africa: research progress and problems (part 1). **South African Forestry Journal**, Pretoria, v. 151, p.58-70, 1989.

HOPMANS, P.; FLINN, D.W.; FARREL, P.W. Nitrogen mineralization in a sandy soil under native Eucalypt forest and exotic Pine plantations in relation to moisture content. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.11, n.1, p. 71-79, 1980.

KAMOGAWA, M.Y.; TEIXEIRA, M.A.. Auto-amostrador de baixo custo para análise por injeção em fluxo. **Química Nova**, São Paulo, 2009. In Press.

KHANNA, P.K. Measurement of changes in the nitrogen status of forest soils due to management practices. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST SOILS, 1., 1990, Harbin, China, **Proceedings...**Harbin, 1990. 1v.

KIEHL, E.J. Manual de Edafologia; relações solo-planta. São Paulo: Ceres, 1979.

KEENEY, D. R.; BREMNER, J. M. Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability. **Agronomy Journal**, Madison, v. 58, p. 498-503, 1966.

KERBAUY, G.B. **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 2004. 452p.

KNUDSON, D.; CORREA, H.; YAHNER, J.E. Adubação de *Eucalyptus saligna* em solos de cerrado de Minas Gerais. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE CERRADOS, 2., 1972, Sete Lagoas, **Anais...** Sete Lagoas, 1972. p. 101-125.

LACLAU, J.P.; RANGER, J.; DELEPORTE, P.; NOUVELLON, Y. SAINT-ANDRÉ, L.; MARLET, S.; BOUILLET, J.P.; Nutrient cycling in a clonal stand of Eucalyptus and an adjacent savanna ecosystem in Congo.3. Input-output budgets and consequences for the sustainability of the plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 210, p. 375-391, 2005

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa, 2004. 531 p.

LIMA, A.M.N.; SILVA, I.R.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; MENDONÇA, E.D.; SMYTH, T.J.; MOREIRA, M.S.; LEITE, F.P. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with eucalyptus in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 235, p. 219-231, 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201p.

MAQUERE, V.; LACLAU, J.P.; BERNOUX, M.; SAINT-ANDRE, L.; GONÇALVES, J.L.M.; CERRI, C.C.; PICCOLO, M.C.; RANGER, J. Influence of land use (savanna, pasture, *Eucalyptus* plantations) on soil carbon and nitrogen stocks in Brazil. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 59, p. 863-877, 2008.

MELLO, H.A. **Aspectos do emprego de fertilizantes minerais no reflorestamento de solos de cerrado do Estado de São Paulo, com *Eucalyptus saligna***. 1968. 174p. Tese (Professor Catedrático) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1968.

MONTERO, L. L. **Carbono em solos de cerrado: efeitos do uso florestal**. 2008. 117p. Tese (Doutorado em Ciências, na área de Ecologia) – Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

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

NOBLE, A.D; HERBERT, M.A. Influence of soil organic matter content on the responsiveness of *Eucalyptus grandis* to nitrogen fertilizer. **South African Forestry Journal**. Pretoria, n. 156, p. 23-27, 1991

PAUL, E.A.; Dynamics of organic matter in soils. **Plant and soil**, Dordrecht, v. 76, p. 275-285, 1984.

PAULA, R.C., PIRES, I.E., BARROS, N.F., BORGES, R.C.G. Exportação de nutrientes por famílias de meio irmãos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. In: IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTUS, 1997, Salvador. **Proceedings...**Colombo: EMBRAPA, CNPF, 1997. v. 1, p. 200-205.

POGGIANI, F. **Ciclagem de nutrientes em ecossistemas de plantações florestais de Eucalyptus e Pinus**: implicações silviculturais. 1985. 211p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, p. 20-24, 1979.

RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato e Instituto Internacional da Potassa, 1981. 142p.

RAIJ, B. VAN; QUAGGIO, J.A. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A (Ed.) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001, cap. 9, p. 173-180. 2001.

RAIJ, B. VAN; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p.

RAISON, R.J.; CONNELL, M.J.; KHANNA, P.K. Methodology for studying fluxes of soil mineral-N in situ. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v.19, p. 521-530, 1987.

RAISON, R.J.; CONNELL, M.J.; KHANN, P.K.; FALKINER, R.A. Effects of irrigation and nitrogen fertilization on fluxes of soil mineral nitrogen in a stand of *Pinus radiata*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.52, p.43-64, 1992.

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. **Revista Árvore**, Viçosa, v.11, p.1-15, 1987.

REIS, M.G.F.; BARROS, N.F. Ciclagem de nutrientes em plantios de eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. p.265-301.

RYAN, J.A.; SIMS, J.L.; PEASLEE, D.E. Laboratory methods for estimating plant available nitrogen in soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 63, p. 48-51, 1971.

SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B.; ALVES, G.D. Mineralização do carbono e nitrogênio em solo cultivado com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 9, p. 33-38, 1985.

SCHÖNAU, A.P.G.; PENNERFATHER, M. A first account of profits at harvesting as a result of fertilizing *Eucalyptus grandis* of planting in Southern Africa. **South African Forestry Journal**, Pretoria, v. 94, p. 29-35, 1975.

SHÖNAU, A.P.G.; HERBERT, M.A. Relationship between growth rate, fertilizing and foliar nutrient concentrations for *E. grandis*: preliminary investigations. **Fertilizer Research**, Hague, v. 4, p. 369-380, 1983.

SIGMAPLOT software. Version 8 ed. SPSS , Chicago, 2002.

SISVAR software. Version 5.0 ed. Copyright Daniel Furtado Ferreira, DEX/UFLA, Lavras, 1999-2007.

SMETHURST, P.J.; NAMBIAR, E.K. Distribution of carbon and nutrients and fluxes of mineral nitrogen after-clearfelling a *Pinus radiata* plantation. **Canadian Journal Forestry Research**, Ottawa, v.20, p. 1490-1497, 1990.

SMETHURST, P.; BAILLIE, C.; CHERRY, M; HOLZ, G. Fertilizer effects on LAI and growth of four *Eucalyptus nitens* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 176, p. 531-542, 2003.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. **Área plantada com pinus e eucaliptos no Brasil (ha) – 2000**. Disponível em: http://www.sbs.org.br/area_plantada.htm Acesso em: 20 dez. 2008.

STANFORD, G.; SMITH, S.J. Nitrogen mineralization potentials of soil. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.36, p.465-472, 1972.

STANFORD, G.; LEGG, J.D.; SMITH, S.J. Soil nitrogen availability evaluation based on nitrogen mineralization potentials and uptake of labeled and unlabeled nitrogen by plant. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 39, p.113-124, 1973.

STAPE, J.L.; BENEDETTI, V. Decréscimo da produtividade e resposta da brotação de *Eucalyptus grandis* à fertilização com macronutrientes em areia quartzosa no Estado de São Paulo – Brasil. In: IUFRO CONFERENCE ON SILVICULTURE AND IMPROVEMENT OF EUCALYPTUS, 1997, Salvador. **Proceedings...** Colombo: EMBRAPA, CNPF, 1997. v. 3, p.112-117.

THEODOROU, C.; BOWEN, G.D. Nitrogen transformations in first- and second-rotation *Pinus radiata* forest soil. **Australian Forestry Research**, Melbourne, v.13, p. 103-112, 1983a.

THEODOROU, C.; BOWEN, G.D. Effects of temperature, moisture and litter on nitrogen mineralization in *Pinus radiata* forest soils. **Australian Forestry Research**, Melbourne, v.13, p. 113-119, 1983b.

VALERI, S.V.; CORRADINI, L.; FAZZIO, E.C.M.; CARRARA, M.A.; SOUZA, E.A.; AGUIAR, I.B.; BANZATTO, D.A.; BALERONI, J.; ABRAHÃO, I.S. Efeitos da adubação NPK e do calcário dolomítico no desenvolvimento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Silvicultura**, São Paulo, v.8, n.28, p.531-536, 1983.

VITOUSEK, P.M. Litterfall, nutrient cycling and nutrient limitation in tropical forest. **Ecology**, Brooklyn, v.65, p. 285-298, 1984.

WARING, S.A.; BREMNER, J.M. Amonium production in soil under waterlogged conditios as an index of nitrogen availability. **Nature**, London, v.2001, p.951-952, 1964.

WOLLUM, A.G.; DAVEY, C.B. Nitrogen accumalation, transformation and transport in forest soils. In: BERNIER, B.; WINGET, C. H. (Ed.). **Forest soils and forest land management**. Quebec: Lês Presses de L' Université Laval, 1975. p.67-106.