

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

**Predição da disponibilidade de nitrogênio e potencial de resposta à
fertilização nitrogenada em plantações de Eucalipto**

Simone da Silva Gomes

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

**Piracicaba
2009**

Simone da Silva Gomes
Engenheiro Florestal

Predição da disponibilidade de nitrogênio e potencial de resposta à fertilização nitrogenada em plantações de Eucalipto

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

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

Piracicaba
2009

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

Gomes, Simone da Silva

Predição da disponibilidade de nitrogênio e potencial de resposta à fertilização nitrogenada em plantações de Eucalipto / Simone da Silva Gomes. - - Piracicaba, 2009. 80 p. : il.

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

1. Amônia 2. Eucalipto 3. Fertilizantes nitrogenados 4. Nitrificação 5. Produtividade 6. Sustentabilidade I. Título

CDD 634.9734
G633p

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

A Deus, pela vida.

Aos meus queridos pais, Maria Marques e Ivo Gomes, pela dedicação, incentivo e amor em todos os momentos da minha vida.

OFEREÇO

Aos amores da minha vida, meu esposo Antonio Fernando Cardoso e ao meu filho Pedro Fernando Gomes Cardoso, pelo amor, carinho, apoio contínuo e por alegrar cada dia da minha vida.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves, pela oportunidade, pela confiança, pela excelente orientação, pelos ensinamentos que contribuí desde o mestrado para a minha formação acadêmica e humana.

A uma pessoa muito especial, Engenheira Florestal Ana Paula Pulito, cuja amizade levarei sempre no coração. Obrigada pela grande contribuição na realização deste projeto.

Ao Engenheiro Florestal José Carlos Arthur Junior e ao Engenheiro Florestal Clayton Alcarde Alvares, pela ajuda nos cálculos estatísticos e nas na confecção dos gráficos.

Aos Engenheiros Florestais Raul Chaves e Vanessa Cavaglieri (Duratex), José Luiz Gava (Suzano), Cláudio Roberto Silva (VCP), e aos técnicos Dimas, Luciano, Vlamir, Aílton (VCP), João Aírton (Duratex), Fernando (Suzano), José Ângelo (IP).

Aos Engenheiros Florestais (ex-alunos da FAIT) Luiz Fabiano de Moraes, Renato Tadeu de Proença Machado, Fabrício Campos Arruda Soliani, Fabio Campos Arruda Soliani, Jefferson Vicente de Oliveira e a Aline Cristina Miranda (estudante de Ciências Biológicas pela UniAraras), por todo apoio e auxílio.

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.

A Lilian A. de C. Duarte e a toda a equipe do Laboratório de Biogeoquímica Ambiental, CENA/USP, pelo auxílio nas análises.

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	13
LISTA DE FIGURAS.....	15
LISTA DE TABELAS.....	17
1 INTRODUÇÃO.....	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 Fertilização nitrogenada no plantio de eucalipto.....	23
2.2 Dinâmica da matéria orgânica e disponibilidade de N.....	27
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1 Localização e caracterização das áreas experimentais.....	35
3.2 Delineamento experimental.....	39
3.3 Inventário da produtividade florestal.....	39
3.4 Análises laboratoriais de solo e de planta.....	41
3.5 Avaliação da mineralização de N.....	42
3.5.1 Incubação no campo.....	42
3.5.2 Mineralização anaeróbia de N.....	44
3.5.3 Análise estatística.....	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1 C e N potencialmente mineralizáveis.....	47
4.2 Mineralização de N <i>in situ</i>	51
4.3 Resposta à fertilização nitrogenada.....	64
5 CONCLUSÕES.....	71
REFERÊNCIAS.....	73

RESUMO

Predição da disponibilidade de nitrogênio e potencial de resposta à fertilização nitrogenada em plantações de Eucalipto

Respostas à fertilização nitrogenada têm sido observadas apenas em condições de solo muito especiais, como nos Espodossolos e nos solos muito degradados. Contudo, considerando as altas taxas de exportação de N e o possível esgotamento das reservas de N orgânico potencialmente mineralizável, espera-se que as florestas manejadas intensivamente respondam à fertilização nitrogenada após vários ciclos de cultivo. Os objetivos desse estudo foram: a) caracterizar as taxas anuais e os padrões sazonais de mineralização de N em povoamento de eucalipto em solos representativos do Estado de São Paulo; b) determinar as relações entre as taxas de mineralização de N e atributos físicos e químicos do solo; c) avaliar a relação entre a disponibilidade de N e a resposta à fertilização nitrogenada; d) avaliar a eficiência de atributos específicos do solo e de características ambientais para estimar a taxa de mineralização de N. Onze experimentos de fertilização, incluindo taxas de aplicadas de até 240 kg ha⁻¹ de N foram estabelecidos em plantações 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 estavam 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 avaliação do N potencialmente mineralizável (N₀) sob condições laboratoriais foi mensurada em laboratório pelo método de incubação anaeróbia a 40°C por sete dias. A quantificação do N mineralizado *in situ*, camada de 0-20 cm do solo, foi feita com base no uso de amostras de solo incubadas em tubos de ferro, mantidas no campo por um período médio de 30 dias. As incubações foram repetidas em até oito vezes durante dois anos, nas diferentes estações climáticas. Verificou-se que o microclima do povoamento de eucalipto pode exercer forte influência sobre as taxas de mineralização de N, por conseguinte, sobre a quantidade e a forma de N disponível no solo. Os efeitos da variação temporária da temperatura e de umidade do solo afetaram diretamente as taxas de amonificação e nitrificação. Foi possível estimar as taxas de mineralização de N com base nesses atributos. O teor de N orgânico total variou entre 3 a 5% do teor de matéria orgânica do solo. Na grande maioria dos casos, a quantidade de N potencialmente mineralizável variou entre 10 a 16% do N orgânico total. A fertilização nitrogenada 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 dos povoamentos jovens e de idade média não se correlacionaram com a razão entre o N potencialmente mineralizável e o N orgânico total, indicando que há no sítio suficiente quantidade de N disponível para atender à demanda das árvores.

Palavras-chave: Eucalipto; Produtividade; Fertilização; Nitrogênio potencialmente mineralizável; Sustentabilidade; Amonificação; Nitrificação

ABSTRACT

Prediction of nitrogen availability and response potential to nitrogen fertilization in eucalyptus plantations

Response to nitrogen fertilization have been observed only in very special soil conditions, as espodosols and in very depredated soils. However, considering the high rates of nitrogen exportation and the possible exhaust of organic nitrogen potentially mineralizable reserves, it is expected that the intensive managed forests response to nitrogen fertilization after several plantation cycles. The objectives of this study were a) characterize the annual rates and the seasonal patterns of nitrogen mineralization in eucalyptus populations in representative soil types of Sao Paulo State; b) establish the relations between N mineralization rates and the chemical and physic characteristics of soil; c) asses the response to nitrogen fertilization and its relations with N availability; d) asses the efficiency of specific soil and environmental characteristics as indicators to estimate the N mineralization rates. This way, eleven fertilization experiments, including up to 240 kg ha⁻¹, N application rates, were established in plantations of *E. grandis* and *E. grandis x urophylla* in several places and different growth stages in Sao Paulo State, Brazil. In these places, there is an annual mean rain precipitation between 1200 and 1500 mm, concentrated mainly in the summer and fall seasons, with an annual mean temperature of 68-70°F. Most of the experiments were carried on; red, red-yellow latosol and quartzarenic neosol, covering a wide range of organic matter contents (18 to 55 g kg⁻¹) and clay (80 to 670 g kg⁻¹), in the 0-20 cm depth. An asses of potentially mineralizable N (N₀) under laboratorial conditions was measured by anaerobic incubation for seven days at 104°F. The mineralized N quantification *in situ*, in the 0-20 cm depth, was made, based on the soil samples incubated in iron tubes, kept in field for a 30 days period. The incubations were repeated until eight times along a two years period, in the different seasons. It was verified that the microclimate of the eucalyptus population could exert high influence over the N mineralization rates and consequently, over the quantity and form of the available N present in soil. The effects of a temporary climate variation and soil humidity directly affected the ammonization and nitrification rates. It was possible to estimate the N mineralization rates based on those characteristics. The total organic N content varied between 3 to 5% of soil organic matter content. In the great majority of cases, the quantity of potentially mineralizable N varied between 10 to 16% of the total organic N. The nitrogen fertilization speeded up in 12% the trees growth until two years age. In an intermediate age, between 3 and 4 years the response fell to 6%. At the harvesting age, no fertilization response was observed. The relative productivity of young populations and intermediate age populations was not correlated between the potentially mineralizable N and the total organic N, showing that there are enough nitrogen quantities to supply the trees needs.

Keywords: Eucalyptus; Productivity; Fertilization; Potentially mineralizable nitrogen; Sustainability; Ammonization; Nitrification

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Localização dos municípios no estado de São Paulo, onde estão as áreas experimentais.....	35
Figura 2 -	Instalação, na camada de 0-20 cm do solo, de dois tubos, para a determinação da mineralização de N, segundo metodologia proposta por Raison et al (1987) (a). Transporte dos tubos ao laboratório em caixas térmicas com gelo, em posição vertical e envoltos individualmente por sacos plásticos (b).....	43
Figura 3 -	Instalações de termômetro no solo, com sensor de 10 cm de profundidade, para a determinação de temperaturas no início e no final do período de incubação.....	44
Figura 4 -	Relação entre os teores de C total (a), resistente (b), moderadamente lábil (c) e lábil (d) com os teores de argila dos diferentes sítios.....	49
Figura 5 -	Correlações entre o N potencialmente mineralizável (N ₀) e N total (N _t) (a), carbono total (b) e argila (c) nos diferentes sítios florestais.....	50
Figura 6 -	Correlação entre o teor de argila e a razão N ₀ /N _t (N potencialmente mineralizável / N total), nos diferentes sítios florestais.....	51
Figura 7 -	Correlações entre a temperatura do ambiente e a temperatura máxima (1), mínima (2) e média (3) dos solos de textura arenosa (a), média (b) e argilosa (c).....	57
Figura 8 -	Taxas de mineralização de amônio e nitrato em função da temperatura média do solo nos solos com textura (1) arenosa, (2) média, (3) argilosa, nos diferentes sítios: a) Altinópolis, b) Angatuba, c) Botucatu, d) Angatuba, e) Capão Bonito 3, f) Itatinga, g) Capão Bonito 1, h) Capão Bonito 2, i) Paraibuna, j) São Miguel Arcanjo e l) Votorantim.....	58

- Figura 9 - Quantidades de amônio (a), de nitrato (b) e de N-total (c) observadas e previstas pelas equações para estimativa das taxas de mineralização de N ($\text{kg ha}^{-1} \text{mês}^{-1}$) nos sítios em conjunto, apresentadas na Tabela 10..... 62
- Figura 10 - Produtividades Relativas (PR) dos tratamentos Testemunha e Fertilização Comercial em função da textura do solo em resposta à fertilização nitrogenada, em idade jovem (1 a 2,2 anos), nos diferentes sítios florestais..... 68
- Figura 11 - 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)..... 69

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Sítio, 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..... 36
- Tabela 2 - Tipo de clima segundo a classificação de Köppen, temperatura média anual (T), temperatura média do solos (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..... 37
- Tabela 3 - Atributos físicos e químicos dos solos (camada 0-20 cm) nos diferentes sítios..... 38
- Tabela 4 - Nutrientes disponibilizados via fertilização em cada sítio florestal, nos diferentes tratamentos, via fertilização..... 40
- Tabela 5 - Teor de argila e teores de carbono total (C_t), resistente (C_r) moderadamente lábil (C_{ml}) e lábil (C_l), na camada 0-10 cm do solo, de nitrogênio total (N_t), potencialmente mineralizável (N_0) relações C_t/N_t , N_0/N_t e carbono potencialmente mineralizável (C_0) na camada de 0-20 cm do solo dos diferentes sítios..... 48
- Tabela 6 - Temperatura ambiente (máxima, mínima e média), temperatura do solo (máxima, mínima e média a 10 cm de profundidade), umidade do solo (θ) e taxas mensais de amonificação e nitrificação de N, nos diferentes períodos de incubação do solo *in situ*..... 54
- Tabela 7 - Temperatura média do ambiente (máxima, mínima e média), temperatura média do solo (máxima, mínima e média a 10 cm de profundidade), umidade média do solo (θ), capacidade de campo (θ_{cc}), ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), taxas mensais de amonificação e nitrificação de N e relação NH_4^+/NO_3^- por sítio florestal, na camada de 0-20 cm do solo, nos diferentes períodos de incubação *in situ*..... 56

Tabela 8 - Equações para estimativa das taxas de mineralização de N ($\text{kg ha}^{-1} \text{mês}^{-1}$), nos diferentes sítios, para as diferentes variáveis independentes.....	60
Tabela 9 - Desdobramento do coeficiente de determinação (R^2), obtidos nas equações apresentadas na tabela 8, para as diferentes variáveis independentes.....	61
Tabela 10 - Equações para estimativa das taxas de mineralização de N nos sítios em conjunto, para as diferentes variáveis independentes.....	62
Tabela 11 - Análise de variância das equações que relacionam as quantidades de amônio, de nitrato e totais de N mineralizado ($\text{kg N ha}^{-1} \text{mês}^{-1}$) com diferentes atributos do solo ¹ , quando se consideram todos os sítios florestais em conjunto. As equações obtidas estão apresentadas na Tabela 10.....	63
Tabela 12 - Altura (H), diâmetro à altura do peito (DAP), volume sólido com casca (VS), incremento médio anual de madeira com casca (IMA) e produtividade relativa (PR) nos diferentes sítios, tratamentos e idades. Valores seguidos da mesma letra, por idade, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p=0,05$).....	66
Tabela 13 - Teores foliares de nutrientes minerais nos diferentes tratamentos e sítios florestais.....	67

1 INTRODUÇÃO

Várias espécies do gênero eucalipto vêm sendo implantadas pelas empresas de florestamento em virtude do rápido crescimento, da ampla gama de utilização e da adaptação às condições edafoclimáticas existentes no Brasil. O Brasil possui uma área de mais de 4, 0 milhões de hectares de efetivo plantio e, somente no estado de São Paulo, há aproximadamente 1,0 milhão de hectares de eucalipto (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF, 2009). Dessa forma, através da produção de papel e celulose, de madeira e de energia, o setor florestal possui grande importância econômica para o estado.

Para manter a sustentabilidade do sistema e a produtividade florestal é importante que os nutrientes essenciais estejam disponíveis às plantas. O nitrogênio é o nutriente requerido em maiores quantidades pelo eucalipto (BARROS et al., 1990). Porém, devido à complexidade estrutural, funcional e a dinâmica dos ecossistemas florestais, as metodologias de estudo de recomendações de fertilização nitrogenada em plantios de eucalipto constituem tema de constante debate e busca de critérios e procedimentos que auxiliem nessas recomendações, sobretudo nas plantações comerciais estabelecidas em solo de baixa fertilidade (BARROS et al. 2002). Segundo os mesmos autores a recomendação de fertilização nitrogenada tem sido generalizada, constatando-se queda de produtividade ao longo das sucessivas rotações e necessitando-se, portanto, de critérios para definição desta fertilização para o adequado desenvolvimento das plantas.

Segundo Noble e Herbert (1991) é possível recomendar a fertilização nitrogenada baseando-se na concentração de matéria orgânica do solo. Os mesmos relatam que encontraram resposta em relação à aplicação de nitrogênio, em termos de área basal, inversamente proporcional aos teores de nitrogênio e carbono orgânico no solo. Seguindo a mesma linha, Gonçalves et al. (1996) propuseram classes de resposta e recomendações para a fertilização com N baseadas em concentrações de matéria orgânica do solo e teor de argila. Estes autores consideraram que as concentrações de matéria orgânica 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 avanço relativamente grande, há informações que indicam a necessidade de considerar-se outras condicionantes no processo de recomendação de fertilização nitrogenada para eucalipto, como os fatores que influenciam a mineralização da matéria orgânica (BARROS et al., 2000; CANTARELLA; RAIJ, 1986). Considerando que a dificuldade para determinar as quantidades de nitrogênio que devem ser aplicadas como fertilizantes às culturas provém, em parte, da impossibilidade de se prever com precisão a contribuição do solo (CANTARELLA; RAIJ, 1986). Assim, os autores concluem que, apesar da matéria orgânica do solo ser a principal fonte de nitrogênio no solo, este tipo de recomendação tem como inconveniente o fato de não levar em consideração a biodisponibilidade de nitrogênio, que é regulado pela qualidade da matéria orgânica e por fatores edafoclimáticos.

Alguns estudos relatam que, independentemente das condições edafoclimáticas e da magnitude da resposta à fertilização, 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), somado ao possível esgotamento das reservas de nitrogênio potencialmente mineralizável (GONÇALVES et al., 2001).

Verifica-se também que, 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). Em idades mais avançadas, após o fechamento das copas, 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).

Neste contexto, foram testadas as seguintes hipóteses:

- I. A taxa de mineralização de N é afetada pelos atributos do solo e pelas características ambientais.

- II. Os atributos do solo, correlacionados com o N potencialmente mineralizável, são bons indicadores de respostas à fertilização nitrogenada.
- III. É possível estimar a taxa de mineralização do N através dos atributos do solo e características ambientais.

Assim, os objetivos do estudo foram: a) caracterizar as taxas anuais e os padrões sazonais de mineralização de N em povoamento de eucalipto em solos representativos do Estado de São Paulo; b) determinar as relações entre as taxas de mineralização de N e atributos físicos e químicos do solo; c) avaliar a relação entre a disponibilidade de N e a resposta á fertilização nitrogenada; d) avaliar a eficiência de atributos específicos do solo e de características ambientais para estimar a taxa de mineralização de N.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fertilização nitrogenada no plantio de eucalipto

As respostas à fertilização nitrogenada têm sido muito inconstantes nos plantios de eucalipto. Os primeiros estudos visando avaliar os efeitos da aplicação de sulfato de amônio sobre o crescimento de plantas de eucalipto no Brasil foram realizados por Mello (1968). Nesse estudo avaliaram-se os efeitos de doses de 30 e 60 kg N ha⁻¹ no desenvolvimento de *E. saligna* em solo de textura média. Foram observados efeitos no crescimento em altura, apenas até os 18 meses de idade. Após esta fase não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos avaliados.

Em trabalhos realizados no final da década de 70 e durante a década de 80, não foram detectadas respostas expressivas à aplicação de nitrogênio em plantios de eucalipto (VALERI et al., 1983). Porém, em trabalhos mais recentes, verifica-se um potencial de resposta do eucalipto à aplicação de nitrogênio, na fase inicial do crescimento da floresta, principalmente em solos com teor de matéria orgânica inferior a 20 g dm⁻³ (BOUILLET et al., 2001; GONÇALVES et al., 2002; ARAÚJO, 2003; SMETHURST et al., 2003). Os ganhos de produtividade nessa condição podem variar de 30 a 100%, conforme verificado por Silva et al. (2003) e Silveira et al. (2000). Entretanto, algumas pesquisas mostram que, em áreas florestadas com espécies de rápido crescimento, o estoque de N contido na matéria orgânica (MO) pode suprir a exigência das árvores por meio da mineralização do N orgânico (O'CONNELL et al., 1999; GONÇALVES; BARROS, 1999). E, que nessas áreas, é comum a pequena ou até mesmo a falta de resposta das plantas à aplicação de fertilizantes nitrogenados (BARROS et al., 1990; GONÇALVES et al., 1997).

Essa falta de resposta à fertilização nitrogenada ocorre, provavelmente, porque, entre as diversas fontes de N, a mineralização do N orgânico (em média 40 kg ha⁻¹ ano⁻¹) ao longo do ciclo da cultura seja a fonte principal e suficiente para atender à demanda das árvores (GONÇALVES et al., 2001, 2008a), uma vez que a demanda média anual de N em florestas de eucalipto no estado de São Paulo e estado de Minas Gerais, varia de 20 a 50 kg ha⁻¹ ano⁻¹ como observado por Gonçalves et al. (2008a) e também estimado por Bellote et al. (1980), Reis et al. (1987) e Gonçalves (1995a). Porém,

resultados obtidos por Gava et al. (2003) mostraram respostas de dois clones de eucalipto à fertilização nitrogenada, mesmo em solos com elevados teores de matéria orgânica (0-10 cm = 68 g dm⁻³ de MO; 10-30 cm = 53,8 g dm⁻³ de MO). A máxima produção de madeira dos clones estava associada às doses de 91 e 107 kg N ha⁻¹, respectivamente.

Resultados similares foram verificados por Silva et al. (2003). Os autores aplicaram nitrogênio e potássio 03 meses após o plantio com 10% da dose total; nitrogênio 9 meses após plantio com 20% da dose total e, nitrogênio 30 meses após o plantio com 70% da dose total. Na idade de 24 meses, verificou-se que havia resposta somente à aplicação de nitrogênio, sendo esta linear. Os ganhos proporcionados pela maior dose de N nessa idade em relação à testemunha foram de 39%. Na idade de 36 meses, houve também resposta linear à aplicação de nitrogênio, sendo que os ganhos proporcionados no incremento com a maior dose de N em relação à testemunha foram de 44%. Respostas equivalentes às obtidas nestes estudos também foram encontradas para clones de eucalipto em solo Espodossolo, com baixo teor de matéria orgânica, na região sul da Bahia por Silveira et al. (2000).

Algumas pesquisas demonstram também potencial de resposta à aplicação de N em solos com cultivo intensivo associado às rotações sucessivas de plantações florestais de rápido crescimento. Dentre essas, pode-se destacar as de eucalipto, que pode promover uma rápida depleção dos estoques de N do solo (O'CONNELL et al., 1999; GONÇALVES et al., 2002). Na África do Sul, Schönau (1975) relata que o N tem sido limitante na produção de eucalipto após sucessivas rotações de cultivo. No Brasil, em algumas regiões, Silveira et al. (2000a) relataram alta resposta à fertilização nitrogenada, em segunda rotação. Segundo estimativas de Gonçalves et al. (2001), alguns solos sob povoamentos homogêneos de *Eucalyptus grandis* no planalto ocidental paulista teriam reserva de N suficientes para atender adequadamente às demandas das árvores por 3 a 5 rotações (7 anos cada), tornando-se a partir de então áreas potenciais de resposta à fertilização nitrogenada, como já evidentes nas plantações do Congo, após 50 anos de cultivo em solos de textura arenosa (LACLAU et al., 2005).

Algumas hipóteses foram levantadas para explicar a inconstância na resposta do eucalipto à fertilização nitrogenada, como: utilização de doses de N inferiores à demanda nutricional da planta (BARROS et al., 1990; GONÇALVES, 1997, 2008b); falta de parcelamento e épocas inadequados de aplicação (VALERI et al., 1983); 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); acentuado decréscimo na disponibilidade de nitrogênio no solo por meio de sucessivas rotações de plantio em virtude de desequilíbrio entre entradas e saídas de N (GONÇALVES et al., 2002); influência do teor de matéria orgânica do solo e na manutenção do estoque de nutrientes minerais no solo, bem como da produtividade de biomassa dos plantios de rápido crescimento, relacionada com o processo da ciclagem de nutrientes e com a relação carbono/nitrogênio (ADAMS e ATTIWILL, 1986); mecanismo bem desenvolvido na absorção de amônio, podendo ser uma adaptação ecológica a solos ácidos, e também uma estratégia de economia de energia pela incorporação imediata do amônio ao esqueleto de carbono, e de economia de nitrogênio do sistema, amenizando a perda de nitrato por lixiviação devido ao decréscimo na nitrificação (NAMBIAR, 1990); presença de grande parte do C e N na superfície das raízes finas das espécies de eucalipto é considerada um mecanismo muito eficiente para a conservação de N e redução das perdas deste elemento para as camadas mais profundas do solo (SMITH et al., 1998).

Além destes fatores, de acordo com Vale et al. (1984) em estudos de absorção de N, não pode ser negligenciado os dois principais componentes do sistema radicular: as raízes estruturais, que são análogas à parte aérea da planta, podendo representar cerca de 90% da biomassa total de raízes, mas menos de 5 % do comprimento total do sistema radicular. E, as raízes finas (< 3 mm), que consistem em um sistema de ramificações exploratório do solo, com papel fundamental na busca de água e de nutrientes e com grande expressividade na absorção de N. Sendo estes atributos do solo limitados e variável em algumas áreas onde se encontram a maioria dos povoamentos de eucalipto pode-se considerar que a dinâmica das raízes finas tem importante implicação tanto para a absorção de N como para as interações de competitividade.

A importância da proliferação das raízes finas associada ao teor de umidade no solo no processo de absorção de N foi observada por Sierra (1997). O autor verificou que os períodos de maior disponibilidade de umidade no solo coincidiam com os períodos de maior atividade de crescimento da parte aérea e de raízes e com a redução das perdas de N para os horizontes mais profundos do solo. Observaram ainda que com o aumento da umidade do solo, houve produção de raízes finas e que conforme esta umidade diminuía, as raízes finas desapareciam, na mesma proporção. A observação de utilização deste mecanismo em outros ambientes, como as savanas congolenses por Laclau et al. (2005), permitiu concluir que o sucesso da adaptação do *Eucalyptus spp* híbridos dava-se principalmente pela diminuição das perdas de N para horizontes mais profundos, devido à atividade do sistema radicular desta planta.

Gonçalves et al., (1990) verificaram que as boas relações obtidas entre os índices de crescimento dos povoamentos e a densidade de raiz, nas camadas superficiais do solo, mais ricas em matéria orgânica, podem ser atribuídas à grande atividade de raízes finas nestas camadas, à maior disponibilidade de nutrientes do solo e aos processos de ciclagem biogeoquímicos, via deposição e mineralização da serapilheira.

Algumas pesquisas relatam que independentemente dos componentes do sistema radicular, dos fatores edáficos, das condições climáticas e da magnitude da resposta à fertilização do genótipo implantado, 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), 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 fertilizantes nitrogenados e devido à 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, principalmente

nos solos originalmente sob florestas (FLINN et al., 1980). Os autores concluem que as florestas manejadas intensivamente respondem à fertilização nitrogenada após vários ciclos de cultivo.

Uma outra questão relevante é que para muitas culturas, a análise de solo em geral, não apresenta resultados satisfatórios para a recomendação de N devido à complexidade das reações bioquímicas e aos fatores climáticos pouco previsíveis, que, conjuntamente regem o comportamento deste nutriente no solo (RAIJ, 1981). 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. Desta forma, além dos atributos do solo, os fatores externos como o manejo do solo, a temperatura e a umidade, conferem um caráter dinâmico à experimentação com fertilizantes com N (CANTARELLA; RAIJ, 1986; STANFORD; Smith, 1972).

Segundo Vale (1984) deve-se ter em mente ao avaliar o efeito de qualquer fator sobre a absorção de N, que as espécies florestais variam muito na capacidade de absorver e utilizar as formas nitrogenadas e que existe uma forte influência da temperatura e umidade do solo sobre a mineralização de N. Estudos sobre a decomposição da matéria orgânica e a mineralização de N em solos sob plantações de Eucalipto ainda são necessários em nosso país (GONÇALVES et al., 2008a), o que justifica a necessidade de aprofundamento nos estudos sobre mineralização de nitrogênio na fase inicial do crescimento da floresta. Posto que, como os resíduos florestais apresentam alta relação carbono/nitrogênio, pode haver necessidade de adições suplementares de nitrogênio nos primeiros meses após o plantio.

2.2 Dinâmica da matéria orgânica e disponibilidade de N

A dinâmica da matéria orgânica e de seus nutrientes, dentre eles o de nitrogênio, representada pela entrada via deposição e saída via decomposição/mineralização, é essencial à manutenção de florestas ou plantios florestais. Porém, diversos fatores estão relacionados com o sincronismo com que esses fenômenos ocorrem, sendo a

composição química desses resíduos, a umidade do solo e a temperatura os de maior representatividade (THEODOROU et al., 1983b).

De acordo com Malavolta et al. (2004), a temperatura e a umidade são características físicas importantes considerando o ciclo de N. A amonificação ocorre sobre todo o limite de temperatura adequado a atividade biológica (0 – 70°C), devido à diversidade fisiológica da microbiota heterotrófica. A nitrificação é mais dependente de temperatura, sendo seu ponto ótimo entre 20 e 35°C. Quanto à umidade, os 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.

Godoy et al. (2003) apontaram como fatores que afetam a mineralização da matéria orgânica, o tipo de solo, o estágio sucessional e a densidade de plantio, o genótipo, o conteúdo e natureza de resíduos orgânicos, N total, pH, temperatura, umidade, quantidades de nutrientes inorgânicos e suas interações. Pode-se concluir que as quantidades e formas de N mineral produzidas em solos sob florestas dependem das propriedades físicas, químicas e principalmente biológicas do solo.

De acordo com Barros et al. (1990) dentre os fatores que contribuem para a dinâmica da matéria orgânica, merece destaque o comportamento das populações microbianas do solo, que por meio da sua atividade biológica, representam uma importante fonte de N. Estas populações microbianas são consideradas um reservatório quando imobilizam nutrientes para o seu próprio consumo e como fonte quando mineralizam compostos orgânicos, que são absorvidos pelas plantas (THEODOROU et al., 1983b). Porém, a intensidade com que as transformações do resíduo vegetal aportado ao solo ocorrem, está intimamente relacionada às características edafoclimáticas e aos estoques de N e C (GONÇALVES; CARLYLE, 1994). Segundo os autores a importância do N e do C na dinâmica da matéria orgânica do solo é inquestionável, estando relacionados diretamente com a velocidade de mineralização e sua estabilização no solo.

A mineralização, processo pelo qual o N orgânico é convertido em N inorgânico, é vital para a absorção do N pela planta. O nitrogênio encontra-se no solo essencialmente na forma orgânica (não disponível) e uma pequena proporção na forma

inorgânica (disponível). O nitrogênio orgânico pode representar 97-98% do N total do solo. E, o nitrogênio inorgânico geralmente representa somente 2 a 3% do N total do solo. A imobilização, processo pelo qual o N inorgânico é convertido em N orgânico, ocorre quando os resíduos de culturas, com alto teor de carbono e baixo de nitrogênio, são incorporados ao solo (MALAVOLTA et al., 2004).

A mineralização e a imobilização ocorrem simultaneamente nos solos. A mudança no solo em direção ao depósito orgânico ou inorgânico depende da relação C/N dos resíduos em decomposição. Os resíduos com relação C/N alta (>30:1) favorecem a imobilização, enquanto que com relação C/N baixa (<20:1) favorecem a mineralização. E, na amplitude da relação C/N de 20 a 30:1, os dois processos praticamente se igualam (GONÇALVES; CARLYLE, 1994). Como conseqüências dos processos de mineralização e imobilização, uma parte não negligenciável (20 a 50%) do N dos fertilizantes aplicada ao solo é imobilizado e incorporada nas estruturas das substâncias húmicas, tornando-se pouco disponível para as plantas (NOBLE; HERBERT, 1991).

Os experimentos com ^{15}N têm mostrado que aproximadamente 1/3 do N dos fertilizantes aplicados permanece no solo na forma orgânica, após o primeiro cultivo, e somente uma pequena fração (<15%) é aproveitada pela planta em cultivo subsequente (VAN et al., 1987). De acordo com os mesmos autores, a taxa de imobilização do N do fertilizante do solo varia em função da forma como o adubo é aplicado e da estabilidade do solo.

Do ponto de vista de estabilidade do solo, a matéria orgânica pode ser simplificada em uma fração lábil (biodegradável, leve) e uma fração humificada (estável, pesada). A fração lábil representa aproximadamente 1/3 do carbono orgânico do solo e possui um curto período de permanência no solo e, a sua principal função é o fornecimento de nutrientes às plantas por meio de sua mineralização, e de energia e de carbono aos microorganismos do solo. E, a fração humificada representa cerca de 2/3 do carbono orgânico do solo, com maior período de permanência no solo e sua principal função é atuar sobre as condições físicas e químicas do solo (PAUL, 1984; REIS et al., 2002).

Estudos têm demonstrado que determinados compartimentos da MO são capazes de indicar mais rapidamente alterações na disponibilidade de C e N decorrentes das condições físicas e químicas do solo (PAUL, 2002). Numa escala crescente de sensibilidade tem-se: a biomassa microbiana do solo, com menor tempo de ciclagem, muito variável e sensível, considerada como compartimento ativo na dinâmica da MO em seguida, com sensibilidade intermediária, está a matéria orgânica lábil e, por último, as substâncias húmicas, como as mais recalcitrantes e quimicamente ativas (ROSA et al., 2003; GAMA-RODRIGUES et al., 2005).

Verifica-se também que as associações da MO com os constituintes minerais do solo, principalmente argilas minerais, têm sido historicamente reconhecidas como importantes, já que elas regulam a mineralização e o armazenamento de MO, evidenciando que a dinâmica das frações da MO está intimamente relacionada com a textura do solo (SALCEDO et al., 1985; REIS; RONDELLA, 2002). Segundo os autores isso demonstra que os solos arenosos apresentam uma maior proporção do C associado às partículas de areia, o que lhe confere maior fragilidade quanto às mudanças nos sistemas de manejo do solo, uma vez que esta fração, composta principalmente de resíduos vegetais, é facilmente mineralizada.

É amplamente reconhecida a relação entre a dinâmica de MO com a textura do solo, fato pelo qual a obtenção da quantificação da MO relacionadas com as frações granulométricas complementar os resultados de fracionamento da MO (STRONG, 2002). Considerando que, pequenas alterações no total de MO ou C do solo são dificilmente detectáveis em curto prazo, em parte, porque a variabilidade natural desses atributos do solo é geralmente elevada. Assim, frações da MO ou do C do solo, mais sensíveis ao manejo, podem ser utilizados como indicadores de mudanças na dinâmica do compartimento orgânico, como, por exemplo, frações de C do solo (SMETHURST; NAMBIAR, 1990; BAYER, 1996).

Para analisar as frações lábeis e recalcitrante da MO, Chan et al. (2001) utilizaram o método modificação de determinação do fracionamento do carbono orgânico do solo desenvolvido por Walkley e Black (1934). Compararam a eficácia de diferentes espécies de pastagem para restaurar a qualidade do solo, observaram que a maior parte das diferenças (78-92%) entre os tratamentos foi encontrada nas duas

frações mais facilmente oxidáveis. Concluíram os autores que a análise dessas frações pode ser usada como indicador de mudanças da MO no solo.

De acordo com Camargo et al. (1995), o estudo do fracionamento da MO dos solos em conjunto com os estudos edafoclimáticos, tem se revelado uma excelente alternativa para análise do potencial produtivo de plantio de espécies florestais. E, a utilização de modelos que considera estes estudos e a complexidade estrutural dos povoamentos de eucalipto poderá postular procedimentos para recomendações de fertilização.

Corbeels (2002) utilizou o fracionamento de C, no modelo de ciclagem de C e N, para avaliar as relações entre os estoques de N e C no solo nos diferentes manejo e produtividade de *E. globulus* na Austrália. O autor simulou quatro diferentes cenários de manejo para o nitrogênio: (a) apenas colheita, não considerando perdas de N do sistema por lixiviação ou volatilização e com os resíduos da colheita permanecendo sobre o solo; (b) colheita + perdas de N (por lixiviação e volatilização) e com os resíduos da colheita permanecendo sobre o solo; (c) colheita + perdas de N + remoção dos resíduos do sítio; (d) colheita + fertilização complementar compensando as retiradas de N pela colheita. Estas simulações foram conduzidas para múltiplas rotações, fixando o período de 10 anos para cada rotação e adotando as mesmas práticas de manejo a cada colheita. Concluiu-se que, a produtividade do *E. globulus* declina sensivelmente através de rotações sucessivas para todas as opções de manejo e fertilização de N e que este declínio é diretamente proporcional à taxa de remoção de N do sistema: maiores remoções de N resultam em maior redução da produtividade.

Os resultados desses trabalhos não devem ser extrapolados de maneira direta às condições brasileiras, principalmente em virtude das diferentes condições de clima, solos e materiais genéticos avaliados. Entretanto, fornecem forte evidência dos efeitos do esgotamento das reservas de N e C do solo sobre a sustentabilidade da produção florestal e da necessidade de sistematizar os procedimentos para estimar as taxas de mineralização, absorção e lixiviação de N em plantios de eucalipto.

Existem na literatura alguns métodos para estimar as taxas de mineralização de N em laboratório e em campo. Os primeiros métodos para prever o N mineralizado basearam-se em incubações aeróbias e anaeróbias, em laboratório, sob condições

controladas de temperatura e umidade (WARING; BREMNER, 1964; KEENEY; BREMNER, 1966). Os resultados obtidos com estes métodos foram satisfatórios, indicando que tanto a incubação aeróbia quanto à anaeróbia possuem potencial para avaliar a disponibilidade de N no solo e boa relação com o N absorvido pelas árvores. Uma desvantagem destes 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 (GONÇALVES et al., 2001, 2008a). Bremner (1965) enfatizou que o método de incubação anaeróbia 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.

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 do 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 à 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).

Stanford e Smith (1972) propuseram deduzir o N mineralizado por meio de amostras incubadas de solo para determinar seu potencial de mineralização, combinando seus parâmetros com a temperatura e a 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, para obtenção de índices do potencial da disponibilidade de N para as plantas (POTTKER; TEDESCO, 1979).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização das áreas experimentais

O estudo foi realizado em 11 povoamentos comerciais de *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. 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, Paraíbuna 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, 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

Sítio	Latitude	Longitude	Altitude	Relevo	Genótipo	Espaçamento
	S	W	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>Urophilla</i> ⁽²⁾	3,0x2,5
Angatuba	23°17'	48°28'	649	Plano	<i>E.grandis</i> vs. <i>Urophilla</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>Urophilla</i> ⁽²⁾	3,0x3,0
Capão Bonito 2	24°00'	48°20'	705	Ondulado	<i>E.grandis</i> vs. <i>Urophilla</i> ⁽²⁾	3,0x2,0
Capão Bonito 3	24°00'	48°20'	705	Ondulado	<i>E.grandis</i> vs. <i>Urophilla</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>Urophilla</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>Urophilla</i> ⁽²⁾	3,0x2,0

⁽¹⁾ Plantios seminais; ⁽²⁾ Plantios clonais

As áreas experimentais encontram-se em altitude entre 570 e 889. Segundo a classificação de Köppen, os climas foram classificados com Aw (Agudos e Altinópolis) e Cwa (Angatuba, Botucatu, Capão Bonito, Itatinga, São Miguel Arcanjo, Paraíbuna e Votorantim). A precipitação média anual das áreas varia 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) (Tabela 2). Estes são os principais solos utilizados em florestamentos no estado de São Paulo (GONÇALVES, 2002). Os teores de matéria orgânica variaram entre 18 e 50 g kg⁻¹ e os teores de argila entre 67 a 670 g kg⁻¹, na camada de 0-20 cm (Tabela 3).

Tabela 2 – Tipo de clima segundo a classificação de Köppen, temperatura média anual (T), temperatura média dos solos (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

Sítio	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

Tabela 3 – Atributos físicos e químicos dos solos (camada 0-20 cm) nos diferentes sítios

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
Paraibuna	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

3.2 Delineamento experimental

Em todos os sítios havia ou foram instalados experimentos com doses crescentes de N (Tabela 4), no delineamento blocos casualizados, com 3 repetições. Cada parcela experimental foi composta por 100 plantas (10 linhas com 10 plantas em cada linha). Somente as 36 plantas centrais foram consideradas nas avaliações e, as demais, deixadas como bordadura dupla. O genótipo, a forma de propagação das plantas e o espaçamento de plantio estão descritos na Tabela 1. 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.

3.3 Inventário da produtividade florestal

Em todas as parcelas experimentais foram avaliados a altura total, o diâmetro a altura de 1,30m (DAP) e a sobrevivência das árvores. Os volumes foram estimados por equações ajustadas pelas empresas participantes do projeto, baseadas nas características locais de cada clone.

A Produtividade Relativa (PR) à fertilização nitrogenada máxima foi calculada pela fórmula:

$$PR (\%) = \frac{P_t}{P_{máx}} \times 100$$

onde P_t é a produtividade de madeira com casca de um determinado tratamento e $P_{máx}$ é a produtividade de madeira com casca do tratamento que recebeu a maior dose de N.

Tabela 4 – Nutrientes disponibilizados via fertilização em cada sítio florestal, nos diferentes tratamentos, via fertilização ⁽¹⁾

Sítio	Tratamento	N	P	K	Ca ⁽²⁾	Mg ⁽²⁾	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.

3.4 Análises laboratoriais de solo e de folha

Os atributos físicos e químicos dos solos foram determinados para a camada de 0-20 cm de profundidade (Tabela 3). 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 foi determinada pelo método da pipeta e a densidade do solo em amostras indeformadas coletadas com anel volumétrico, com métodos descritos pelo manual de análises de solo apresentado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1999). As determinações de pH em CaCl_2 0,01 mol L⁻¹, P disponível, S-SO_4^{2-} , Ca, Mg, K e Al trocáveis, acidez potencial, hidrogênio titulável, capacidade de troca de cátions, saturação de bases e de alumínio foram realizadas segundo Raij et al. (2001) (Tabela 3).

A determinação do carbono total (C_t) no solo foi realizada 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 em meio ácido ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 + \text{H}_2\text{SO}_4$), sendo a sua quantificação feita por colorimetria e com o auxílio de uma reta padrão. O N total (N_t) foi determinado somente no tratamento testemunha, na camada de 0-20 cm, pelo método micro-Kjeldahl (BREMNER, 1965), no qual o N orgânico é convertido em NH_4^+ por digestão com H_2SO_4 e depois destilado por arraste com vapor, adicionando-se solução concentrada de NaOH ao extrato de digestão.

O fracionamento químico da MO foi realizado na camada de 0-10 cm de profundidade do solo, no tratamento testemunha. Utilizou-se o método descrito por Walkley e Black (1934), adaptado por Chan et al. (2001). O método consiste na oxidação do C orgânico (CO) das amostras por via úmida ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), permitindo a separação de três frações: a) **C lábil** (C_l), CO oxidado por $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ em meio ácido de 6 mol L⁻¹ de H_2SO_4 ; b) **C-moderadamente lábil** (C_{ml}), diferença entre o CO oxidado por $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ em meio ácido, com 12 e 6 mol L⁻¹ de H_2SO_4 ; c) **C resistente** (C_r), CO residual obtido pela diferença entre a oxidação com $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ em meio ácido, de 12 mol L⁻¹ de

H₂SO₄ e o C total obtido pelo método da Dakota do Sul, modificado por Quaggio e Raij (2001).

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. Após secagem em estufa com circulação forçada de ar a 65°C até massa constante, as amostras foram processadas em moinho tipo Wiley (modelo MA680/1) e analisadas quimicamente pelos métodos descritos por Malavolta et al. (1989). O N foi determinado por destilação, pelo método Kjeldhal (TE036/01-Tecnal). Depois da digestão com ácido nítrico e perclórico, os teores de Ca e Mg foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (Perkin Elmer AAnaLYST 100), o teor de K por espectrofotometria de chama (B462-Micronal) e o teor de P por espectrofotometria UV (U2001-Hitachi).

3.5 Avaliação da mineralização de N

3.5.1 Incubação no campo

Para quantificar o N mineralizado, na camada de 0-20 cm do solo, *in situ*, foi utilizado o método proposto por Raison et al. (1987), com algumas modificações. Cinco conjuntos de dois tubos de ferro de 30 cm de comprimento e 5 cm de diâmetro foram instalados na entrelinha do plantio, em um transecto diagonal à parcela experimental do tratamento testemunha. Cinco tubos foram removidos imediatamente para a determinação da extração inicial de N (t_0) em todos os tratamentos, e cinco tubos foram capeados para evitar as lixiviações de N, permanecendo no campo por um período médio de 30 dias (Figura 2a). As cinco amostras simples de solo tiradas de cada tubo deram origem a uma amostra composta. Os tubos foram transportados em posição vertical para o laboratório de Ecologia Aplicada do Departamento de Ciências Florestais da ESALQ, na mesma posição que estavam no solo, em caixas térmicas com gelo (temperatura entre 2-5°C), envoltos individualmente por sacos plásticos (Figura 2b). 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). Esses

procedimentos foram repetidos no meio do verão, do outono, do inverno e da primavera, em um período de dois anos. Juntamente com a instalação dos tubos no campo, foram instalados dois termômetros no solo, com sensor de 10 cm de profundidade. Foram lidas as temperaturas no início e no final do período de incubação (Figura 3). Para a obtenção da umidade do solo, 50g de cada amostra foi seca a 105°C por 24 h.

As determinações da concentração de NH_4^+ e NO_3^- nos extratos foram realizadas com o emprego do Sistema de Análise por Injeção em Fluxo automático – ASIA (Ismatec, Glattbrugg, Switzerland) (KAMOGAWA, 2009). O NH_4^+ foi determinado espectrofotometricamente em 605 nm, sendo o limite de detecção obtido de 0,01 $\mu\text{g mL}^{-1}$. Para a obtenção da concentração de NH_4^+ no solo, cada concentração obtida pelo sistema FIA foi multiplicada pelo volume de extrato e dividida pela massa de terra seca da amostra. O NO_3^- foi determinado pelo método colorimétrico, sendo o limite de detecção obtido de 0,05 $\mu\text{g mL}^{-1}$. Para calcular as concentrações de NH_4^+ e NO_3^- no solo, cada concentração obtida pelo sistema FIA foi multiplicado pelo volume de extrato e dividida pela massa de terra seca da amostra. Portanto, as concentrações de NH_4^+ e NO_3^- no solo foram expressas em mg kg^{-1} de terra seca. A densidade do solo foi utilizada para converter as concentrações de N mineral do solo em conteúdo por área (kg ha^{-1}).



Figura 2 – Instalação, na camada de 0-20 cm do solo, de dois tubos, para a determinação da mineralização de N, segundo metodologia proposta por Raison et al (1987) (a). Transporte dos tubos ao laboratório em caixas térmicas com gelo, em posição vertical e envoltos individualmente por sacos plásticos (b)



Figura 3 - Instalações de termômetro no solo, com sensor de 10 cm de profundidade, para a determinação de temperaturas no início e no final do período de incubação

3.5.2 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. 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. As amostragens ocorreram durante o verão de

2008, juntamente com uma das amostragens de solo para a avaliação da mineralização de N *in situ*.

Para a extração de N potencialmente mineralizável (N_0) foi realizada a incubação anaeróbia, por métodos químicos, a 40°C por 7 dias, segundo o método proposto 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 $Ca (H_2PO_4)_2$ (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 inicial de N (t_0) e o método de determinação de NH_4^+ foram similares à realizada para as amostras incubadas no campo. 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 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.

3.5.3 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva e à análise de variância (ANAVA). 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 C e N potencialmente mineralizáveis

Os teores de C resistente, moderadamente lábil e lábil se relacionaram positivamente com os teores de argila (Tabela 5 e Figura 4). Watts et al. (2006) também observaram que os estoques de C_r aumentaram com o aumento do teor de argila. Provavelmente, em decorrência da formação de mais complexos organominerais, por meio do efeito protetor da argila e dos microagregados, o que confere também maior proporção de C na fração resistente nos solos mais argilosos (BLAIR et al., 1995; CHAN et al., 2001). Assim, o tempo médio de residência ou estabilidade do C é maior nestes solos (SIX et al., 2001; ZINN et al., 2002; SILVA; MENDONÇA, 2007). Balesdent et al. (2000) atribuíram o maior conteúdo de C em frações ligadas aos componentes minerais do solo a mecanismos de proteção física, tais como sorção, sendo que 13 a 24% do C do solo foi considerado protegido, localizado em microagregados de argila ou silte. A quantificação das frações de C é considerada fundamental para que se possam entender os efeitos do manejo do solo sobre sua fertilidade e, assim, compreender os efeitos dessas mudanças nas taxas de mineralização de N (NAMBIAR, 1996; GRANDY et al., 2007).

Tabela 5 – Teor de argila e teores de carbono total (C_t), resistente (C_r), moderadamente lábil (C_{ml}) e lábil (C_l), na camada 0-10 cm do solo, de nitrogênio total (N_t), potencialmente mineralizável (N_0), relações C_t/N_t , N_0/N_t e carbono potencialmente mineralizável (C_0) na camada de 0-20 cm do solo dos diferentes sítios

Sítio	Argila g kg ⁻¹	C ¹				N		C _t /N _t	N ₀ /N _t %	C ₀ ⁴ mg kg ⁻¹
		C _t	C _r	C _{ml}	C _l	N _t ² mg kg ⁻¹	N ₀ ³ mg kg ⁻¹			
Solos arenosos										
ALT	67	7727 (0,4) ⁵	7245 (147)	379 (22)	101 (150)	387 (7)	59 (0,7)	19 (1,0)	15 (0,1)	1200 (70)
ANG	100	7026 (0,3)	6714 (41)	57 (25)	253 (19)	322 (16)	61 (4,0)	21 (0,8)	18 (0,5)	1342 (106)
BOT	100	7091 (0,0)	6481 (27)	373 (6)	236 (21)	301 (8)	65 (5,1)	23 (0,6)	21 (2,1)	1584 (136)
Solos textura média										
AGU	167	9233 (0,9)	8902 (20)	180 (22)	149 (15)	387 (25)	60 (2,0)	23 (0,8)	15 (1,5)	1440 (15)
CB3	272	9342 (0,7)	8978 (39)	177 (40)	186 (18)	810 (76)	115 (4,1)	11 (1,8)	14 (1,2)	1380 (202)
ITA	193	7850 (0,4)	7569 (41)	233 (19)	47 (36)	589 (133)	75 (2,7)	14 (2,3)	13 (2,6)	1050 (145)
Solos argilosos										
CB1	478	13403 (0,3)	12108 (157)	592 (90)	701 (72)	774 (79)	110 (1,4)	17 (2,2)	14 (1,5)	1998 (250)
CB2	653	18814 (1,7)	17586 (250)	978 (161)	248 (117)	980 (96)	107 (5,1)	19 (0,1)	11 (1,6)	2033 (114)
SMA	651	24498 (0,8)	22147 (315)	1183 (129)	1167 (227)	1267 (75)	125 (2,4)	19 (1,0)	9 (0,4)	2375 (84)
PAR	365	10838 (0,6)	9455 (253)	672 (117)	709 (189)	893 (64)	138 (8,4)	11 (1,2)	15 (1,8)	1656 (278)
VOT	670	29724 (0,0)	26523 (345)	1274(229)	1927(341)	1276 (5)	154 (9,4)	23 (0,1)	12 (0,7)	3542 (223)

Extratores: ¹dicromato de potássio e ácido sulfúrico (CHAN et al., 2001); ²Kjeldahl; ³amônio liberado durante 7 dias de incubação anaeróbia a 40 °C; ⁴C potencialmente mineralizável estimado com base na equação: $C_0 = N_0 \times C_t/N_t$; ⁵ Erro padrão

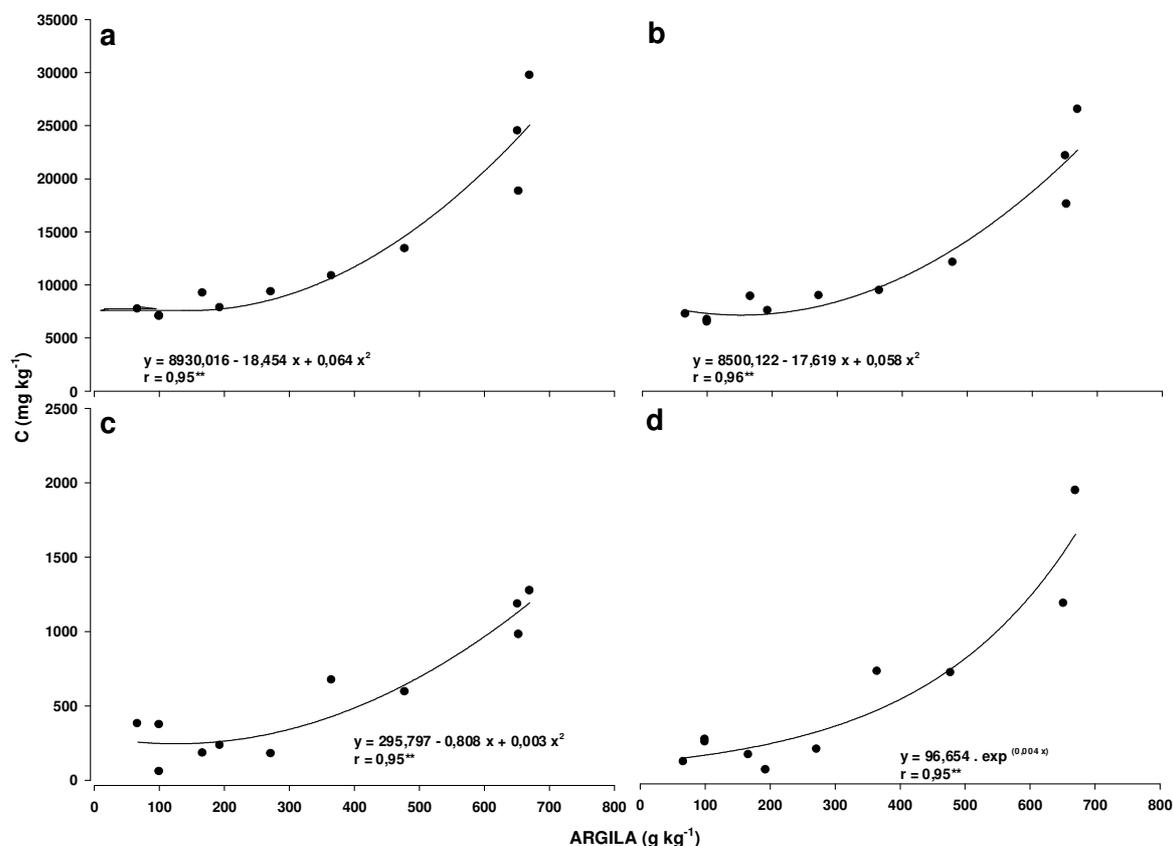


Figura 4 - Relação entre os teores de C total (a), resistente (b), moderadamente lábil (c) e lábil (d) com os teores de argila dos diferentes sítios. ** significância a 1% de probabilidade

Considerando que a quantidade de C mineralizado na incubação anaeróbia é proporcional a quantidade de N potencialmente mineralizável (N_0), estimada pela equação $N_0 \times C_t/N_t$, verificou-se que, nos sítios arenosos e de textura média, houve mineralização de parte da fração resistente de C (em média, $(C_0 - (C_{ml} + C_{ml})) \times 100 \leq 40\%$) e, nos solos argilosos, as quantidades mineralizadas de C foram pouco menores ou equivalentes as de C contidos nas frações C_{ml} e C_l (Tabela 5).

A razão C_t/N_t variou de 12 a 24, com média de 19 ± 4 (Tabela 5). De modo geral, os maiores teores de C na fração resistente foram relacionados com as menores relações C_t/N_t . Valores elevados para esta 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_t eram maiores 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; BLAIR; CROCKER, 2000). Os resíduos mais lábeis são pouco efetivos na estabilização do C no solo, principalmente porque este material poder exercer efeito “priming” positivo (decomposição acelerada da MO), conseqüentemente, diminuição do teor de MO (FONTAINE et al., 2004).

Os valores de N_0 variaram entre 60 a 154 mg kg^{-1} de solo (189 a 311 kg ha^{-1}) com média de $98 \pm 11 \text{ mg kg}^{-1}$ de solo ($235 \pm 18 \text{ kg ha}^{-1}$) (Tabela 5). Os teores de N_0 foram altamente correlacionadas com os teores de N_t ($r = 0,92$; $P = 0,01$), com os teores de C_t ($r = 0,76$; $P = 0,01$) e com os teores de argila ($r = 0,83$; $P = 0,01$) (Figura 5). 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).

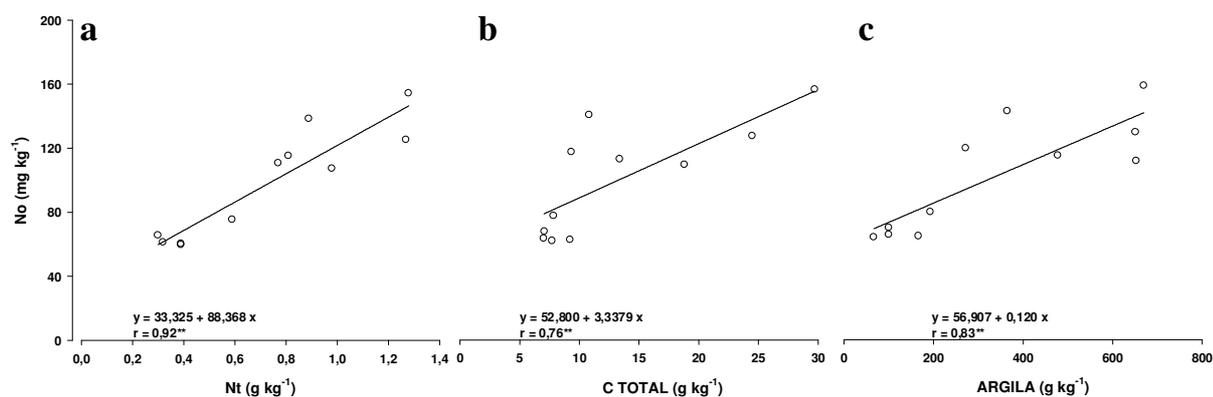


Figura 5 – Correlações entre o N potencialmente mineralizável (N_0) e N total (N_t) (a), carbono total (b) e argila (c) nos diferentes sítios florestais. ** significância a 1% de probabilidade

A razão N_0/N_t variou, na sua grande maioria, entre 10 e 16%; o N_t representou de 3 a 5% da MO (Tabela 5). Em outras palavras, apenas 10 a 16% do N orgânico seria decomponível. Gonçalves et al. (2001) encontraram razões N_0/N_t parecidas, entre 5 a 15%. Essa razão diminuiu com o aumento do teor de argila (Figura 6). Assim, relativamente, há maior disponibilidade de N em solos com menor teor de argila.

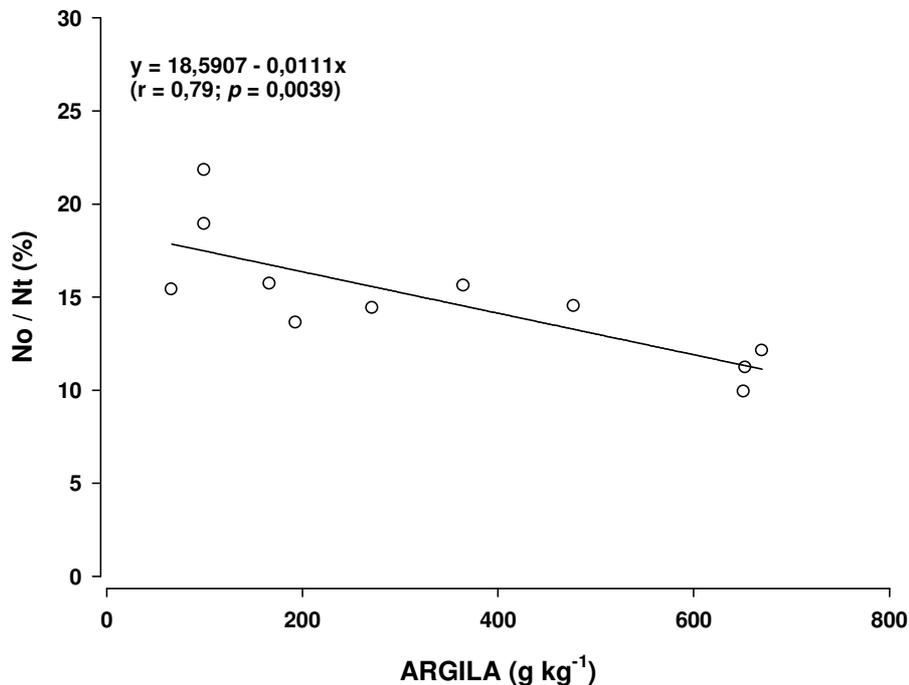


Figura 6 – Correlação entre o teor de argila e a razão N_0/N_t (N potencialmente mineralizável / N total), nos diferentes sítios florestais

4.2 Mineralização de N *in situ*

Nos sítios com solos arenosos, de textura média e argilosos, nos períodos mais frios, a temperatura ambiente média foi de 22,7 °C, 19,8 °C e 18,3, °C respectivamente, e de 26,0 °C, 24,7 °C e 23,3 °C, nos períodos mais quentes. As temperaturas médias dos solos arenosos, de textura média e argilosos, nos períodos mais frios, foram de 17,8 °C, 17,7 °C e 18,0 °C, respectivamente, e de 25,3 °C, 22,7 °C e 20,9 °C, nos períodos mais quentes (Tabelas 6 e 7). A temperatura do ambiente apresentou boas correlações com as temperaturas máxima, mínima e média dos solos (Figura 7).

Nos diferentes sítios, a temperatura ambiente média das máximas variou de 26,4 a 33,0 °C, a média das mínimas variou de 10,7 a 18,0 °C e a média das médias variou de 19,4 a 24,7 °C. Com relação à temperatura do solo, a média das máximas variou de 20,8 a 26,0 °C, a média das mínimas variou de 15,9 a 20,7 °C e a média das médias variou de 18,4 a 23,4 °C. A umidade máxima do solo variou de 40,90% a 65,30% da

capacidade de campo (Θ_{cc}), a umidade mínima variou de 31,82% a 61,22% da Θ_{cc} e a umidade média variou de 36,36 a 63,26 % da Θ_{cc} (Tabela 7). Em vários sítios, a temperatura média do solo apresentou boas correlações com as taxas de mineralização de N (Figura 8).

Nas incubações *in situ* dos solos arenosos, nos períodos mais frios, as taxas de mineralização do N variaram de 3,4 a 13,1 kg N ha⁻¹mês⁻¹, e, nos períodos mais quentes, de 5,1 a 21,1 kg N ha⁻¹mês⁻¹. Nos solos com textura média, as taxas de mineralização de N foram pouco diferentes, com variação de 4,5 a 19,5 kg N ha⁻¹ mês⁻¹ nos períodos mais frios e, 6,3 a 20,1 kg N ha⁻¹mês⁻¹, nos períodos mais quentes. Ao contrário, nos solos argilosos, as taxas de mineralização foram maiores, com variação de 11,1 a 24,2 kg N ha⁻¹mês⁻¹, nos períodos mais frios, e 3,6 a 26,5 kg N ha⁻¹mês⁻¹ nos períodos mais quentes (Tabela 7). As maiores taxas de mineralização de N nos períodos mais quentes e com maior teor de umidade no solo expressam a influência direta do microclima do plantio de eucalipto na temperatura e na umidade do solo, favorecendo os microrganismos responsáveis pela mineralização de N, principalmente nos solos de textura arenosa e média, com baixa capacidade de retenção de água, em que as diferenças entre períodos foram maiores. Verificou-se que a temperatura e a umidade do solo afetaram diretamente as flutuações sazonais na disponibilidade de N, o que está relacionado com a atividade dos microrganismos, conseqüentemente, com as taxas de mineralização de N, sobretudo nos períodos mais quentes do ano, quando há níveis mais elevados de umidade no solo (GONÇALVES; CARLYLE, 1994). Segundo Reis e Rondella (2002), enquanto a microfauna amonificante manifesta-se mesmo sob temperaturas baixas, a nitrificante é beneficiada quando a temperatura situa-se na faixa entre 25 a 30 °C; quando a temperatura ultrapassa esta faixa, haverá desequilíbrio entre a mineralização e a imobilização, intensificando o primeiro processo. E, que no processo de mineralização de N, a nitrificação é a única transformação no solo que tem uma resposta à temperatura relacionada às zonas climáticas, sendo o processo mais afetado, por ser mediado por um limitado grupo de microrganismos.

A razão média N-NH₄⁺: N-NO₃⁻ foi igual a 1,86 nos solos arenosos, 2,46, nos solos de textura média, e 2,52, nos solos argilosos (Tabela 7). Fica claro a predominância de condições favoráveis ao processo de amonificação. A menor taxa de nitrificação está relacionada às condições distróficas predominantes (alta acidez e baixa

fertilidade) nos solos sob floresta (CARLYLE, 1986; SMETHURST et al., 1990; GONÇALVES; CARLYLE, 1994; GONÇALVES et al., 2008) e à intensiva absorção de $N-NH_4^+$ pelo eucalipto (VALE et al., 1984), o que reduz a atividade e a quantidade de substrato para os microorganismos nitrificadores. Gonçalves e Carlyle (1994) observaram que, apesar do aumento da taxa de nitrificação ao longo do tempo de incubação, o incremento desta taxa não foi proporcional às reduções na concentração de $N-NH_4^+$, ficando evidente a possibilidade de imobilização e/ou desnitrificação decorrente da variação do teor de umidade no solo.

A maior taxa de mineralização de N nos solos argilosos deve-se, em grande parte, aos maiores estoques de N orgânico (Tabela 5). Esses estoques são maiores devido à maior produtividade do ecossistema e da formação de mais complexos organominerais em solos argilosos (GONÇALVES, 2002). Isto promove um efeito indireto na biomassa microbiana decorrente do aumento da quantidade de substrato para o metabolismo dos microorganismos (JENKINSON; RAYNER, 1981; VAN VEEN et al., 1987). Assim, nos solos mais argilosos, o potencial de fornecimento de N às árvores é maior, tanto pelos maiores estoques de C e N, como pela maior atividade microbiana. Eaton (2001) verificou que, em solos argilosos sob floresta subtropical, após dois dias de chuva intensa havia expressivo aumento de C na biomassa microbiana e das taxas de mineralização de $N-NH_4^+$, quando comparados com outros solos mais arenosos. Ele deduziu que parte da matéria orgânica ativa fica fracamente adsorvida à argila do solo, tornando-se rapidamente disponível à comunidade microbiana.

Tabela 6 – Temperatura ambiente (máxima, mínima e média), temperatura do solo (máxima, mínima e média a 10 cm de profundidade), umidade do solo (θ) e taxas mensais de amonificação e nitrificação de N, nos diferentes períodos de incubação do solo *in situ*..... Continuação

Sítio	Período	Temperatura Ambiente			Temperatura Solo			θ Média	Nm			
		Máx.	Min.	Média	Máx.	Min.	Média		N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻
		°C			°C			cm ³ cm ⁻³	mg kg ⁻¹ mês ⁻¹ / kg ha ⁻¹ mês ⁻¹			
AGU	03/05 a 04/06/07	25,3	13,5	19,4	18,9	16,2	17,5	0,12	5,8	1,2	16,2	3,3
	28/07 a 29/08/07	26,1	5,2	15,6	19,6	12,8	16,2	0,12	2,4	1,3	6,9	3,7
	09/11 a 12/12/07	34,1	12,6	23,3	25,0	20,2	22,6	0,12	4,6	0,8	6,6	2,3
	29/01 a 06/03/08	39,2	17,5	28,3	29,6	22,6	26,1	0,16	5,2	2,3	11,2	6,5
	08/05 a 12/06/08	26,2	14,5	20,4	19,9	16,4	18,1	0,14	2,6	1,8	1,9	5,0
	08/08 a 18/09/08	35,7	12,4	24,0	25,1	15,9	20,5	0,10	1,9	1,0	5,3	2,7
	28/10 a 28/11/08	33,9	14,9	24,4	28,9	18,1	23,5	0,10	5,7	1,5	16,0	4,2
ALT	26/04 a 26/05/07	30,5	29,0	29,7	25,6	23,1	24,3	0,08	1,9	1,7	5,9	5,4
	24/07 a 26/08/08	29,8	12,1	20,9	23,2	17,5	20,4	0,06	1,1	2,2	3,6	1,7
	09/11 a 13/12/07	35,8	17,2	26,5	26,8	21,2	24,0	0,08	2,1	1,3	6,6	4,1
	25/01 a 05/03/08	30,4	18,1	24,3	25,3	21,3	23,3	0,13	2,3	2,5	5,7	8,0
	25/04 a 30/05/08	27,6	10,4	19,0	22,3	15,1	18,7	0,11	1,8	0,9	3,3	2,8
	30/07 a 01/09/08	32,3	12,4	22,3	30,3	20,2	25,2	0,04	3,0	1,1	9,7	3,4
	27/10 a 28/11/08	28,6	26,6	30,3	28,6	26,6	27,6	0,05	4,3	1,8	13,6	5,6
ANG	25/04 a 24/05/07	19,2	15,3	17,2	13,1	7,6	10,3	0,07	1,4	0,5	3,2	1,3
	25/07 a 27/08/07	29,0	5,4	17,2	18,6	15,2	16,9	0,11	2,0	0,7	1,7	1,5
	08/11 a 11/12/07	36,5	9,6	23,0	27,9	22,2	25,0	0,09	4,6	1,2	2,5	2,5
	22/01 a 04/03/08	29,5	14,1	21,8	25,3	20,8	23,0	0,28	11,0	1,7	8,6	3,8
	02/05 a 03/06/08	23,7	7,7	15,7	19,3	15,0	17,2	0,16	1,9	0,8	3,3	1,9
	06/08 a 05/09/08	27,9	7,3	17,6	18,8	15,1	16,9	0,10	3,0	0,4	6,8	0,8
	30/10 a 03/12/08	26,1	20,9	23,5	25,8	20,8	23,3	0,16	6,1	3,4	13,5	7,6
BOT	03/05 a 04/06/07	36,4	15,1	25,7	27,3	20,1	23,7	0,09	2,8	2,0	7,5	5,5
	28/07 a 29/08/07	29,8	2,3	16,1	19,9	11,0	15,5	0,08	1,8	1,6	4,8	4,3
	09/11 a 12/12/07	34,4	10,8	22,6	29,0	17,6	23,3	0,09	1,4	0,6	3,8	1,7
	29/01 a 06/03/08	36,3	13,6	24,9	26,5	21,2	23,8	0,12	7,2	2,8	5,6	7,6
	08/05 a 12/06/08	25,4	9,7	17,5	23,0	15,5	19,3	0,14	3,0	1,3	6,4	3,6
	08/08 a 18/09/08	33,7	7,1	20,4	24,1	13,4	18,7	0,10	1,3	1,1	3,4	3,0
	28/10 a 28/11/08	35,4	16,4	25,9	29,0	17,6	23,3	0,12	3,4	0,5	1,3	15,7
CB1	04/05 a 04/06/07	26,0	6,4	16,2	18,4	11,7	15,0	0,23	2,1	3,2	5,2	7,9
	26/07 a 28/08/07	28,3	7,2	17,7	18,3	13,0	15,6	0,25	2,4	3,2	6,1	8,1
	06/11 a 10/12/07	36,1	11,7	23,9	23,0	18,5	20,8	0,24	5,0	2,5	12,4	6,2
	24/01 a 29/02/08	32,2	15,8	24,0	23,5	19,7	21,6	0,24	9,0	2,8	7,0	1,9
	28/04 a 02/06/08	28,0	9,5	18,7	20,4	14,6	17,5	0,23	6,6	2,2	12,5	5,5
	31/07 a 04/09/08	30,2	9,4	19,8	22,2	14,7	18,5	0,21	0,8	3,7	2,0	9,2
	29/10 a 01/12/08	25,0	19,0	22,0	20,1	19,4	19,8	0,23	5,5	3,0	13,6	7,4
CB2	06/11 a 10/12/07	39,2	10,9	25,0	26,6	20,5	23,5	0,30	5,5	2,0	13,3	5,1
	24/01 a 29/02/08	33,4	16,2	24,8	24,4	20,2	22,3	0,32	4,2	2,0	11,2	4,9
	28/04 a 02/06/08	26,9	5,0	16,0	20,8	13,0	16,9	0,29	1,9	1,3	3,6	2,3
	31/07 a 04/09/08	25,3	8,2	16,8	23,8	14,7	19,3	0,30	1,6	3,0	3,8	7,0
	29/10 a 01/12/08	25,5	20,7	23,1	20,0	19,0	19,5	0,31	4,2	2,4	10,3	5,6
CB3	06/11 a 10/12/07	35,8	16,9	26,3	26,7	18,7	22,7	0,22	3,6	1,2	9,8	3,5
	24/01 a 29/02/08	31,4	15,9	23,6	25,6	19,9	22,7	0,24	8,8	2,7	6,9	7,5
	28/04 a 02/06/08	27,3	6,6	16,9	21,9	13,3	17,6	0,21	1,9	2,4	3,9	5,9
	31/07 a 04/09/08	26,7	8,9	17,8	23,9	14,7	19,3	0,19	2,6	1,8	6,8	4,9
	29/10 a 01/12/08	23,3	18,9	21,1	19,4	19,2	19,3	0,24	2,4	0,9	6,2	2,5
ITA	07/05 a 12/06/07	26,1	6,5	16,3	19,2	10,6	14,9	0,08	1,6	3,4	3,2	7,1
	25/07 a 27/08/07	28,3	8,5	18,4	18,3	14,8	16,6	0,14	4,1	0,1	8,1	8,1
	08/11 a 13/12/07	33,7	18,5	26,1	28,1	20,3	24,2	0,14	2,8	0,2	5,8	0,5
	22/01 a 06/03/08	29,2	20,5	24,8	22,1	21,3	21,7	0,18	5,2	2,1	8,5	4,4
	02/05 a 04/06/08	27,4	10,8	19,1	22,6	15,7	19,1	0,18	2,0	0,5	3,3	1,1
	29/07 a 05/09/08	32,5	9,3	20,9	21,1	15,0	18,1	0,10	5,0	1,9	10,2	4,1
	30/10 a 03/12/08	28,1	20,4	24,3	26,2	22,7	24,5	0,11	6,5	2,7	13,3	5,6

Tabela 6 – Temperatura ambiente (máxima, mínima e média), temperatura do solo (máxima, mínima e média a 10 cm de profundidade), umidade do solo (θ) e taxas mensais de amonificação e nitrificação de N, nos diferentes períodos de incubação do solo *in situ*..... Conclusão

Sítio	Período	Temperatura Ambiente			Temperatura Solo			θ Média	Nm			
		Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média		N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻
		°C			°C			cm ³ cm ⁻³	mg kg ⁻¹ mês ⁻¹		kg ha ⁻¹ mês ⁻¹	
SMA	24/04 a 25/05/07	23,8	18,7	21,2	19,6	13,8	16,7	0,14	3,9	1,0	7,8	2,0
	27/07 a 28/08/07	22,5	5,6	14,0	18,8	10,6	14,7	0,31	1,9	2,0	1,9	2,0
	07/11 a 11/12/07	33,2	12,8	23,0	25,1	17,6	21,3	0,27	5,1	2,0	10,1	3,8
	22/01 a 29/02/08	30,0	15,0	22,5	22,8	19,1	20,9	0,17	4,0	1,7	6,0	3,4
	29/04 a 03/06/08	22,3	7,1	14,7	20,6	15,0	17,8	0,27	3,4	0,4	5,2	0,4
	06/08 a 04/09/08	27,7	9,6	18,6	18,7	14,2	16,4	0,21	2,7	1,7	4,8	1,7
29/10 a 02/12/08	25,5	19,7	22,6	23,1	21,5	22,3	0,25	4,8	2,9	9,4	5,6	
PAR	23/04 a 23/05/07	27,7	16,0	21,9	21,5	18,4	19,9	0,10	5,0	1,9	14,4	5,6
	23/07 a 22/08/08	26,2	3,3	14,7	17,8	13,1	15,5	0,18	5,9	1,6	17,0	4,7
	07/11 a 12/12/07	33,8	11,9	22,8	24,1	18,9	21,5	0,19	6,6	1,0	19,1	3,0
	23/01 a 05/03/08	32,9	16,2	24,6	24,1	20,1	22,1	0,22	5,3	0,4	1,1	2,6
	30/04 a 30/05/08	25,9	10,0	17,9	23,6	9,4	16,5	0,23	4,8	3,4	14,2	9,9
	28/07 a 02/09/08	32,1	9,7	20,9	19,6	15,3	17,5	0,11	2,9	2,9	8,3	8,0
28/10 a 28/11/08	23,4	21,1	22,3	22,7	21,3	22,0	0,16	5,6	3,5	16,3	10,2	
VOT	06/11 a 10/12/07	44,1	11,2	27,6	25,7	18,0	21,9	0,32	5,0	2,5	10,8	2,5
	24/01 a 29/02/08	39,5	17,4	28,5	29,2	18,8	24,0	0,34	7,9	3,2	13,4	6,9
	28/04 a 02/06/08	23,7	8,6	16,1	18,1	13,9	16,0	0,33	3,7	1,2	6,4	2,6
	31/07 a 04/09/08	28,3	10,7	19,5	27,0	15,4	21,2	0,27	3,4	0,9	7,5	1,9
	29/10 a 01/12/08	26,1	24,6	25,4	22,9	19,5	21,2	0,29	4,8	2,1	9,6	4,6

Tabela 7 – Temperatura média do ambiente (máxima, mínima e média), temperatura média do solo (máxima, mínima e média a 10 cm de profundidade), umidade média do solo (θ), capacidade de campo (θ_{cc}), ponto de murcha permanente (θ_{pmp}), taxas mensais de amonificação e nitrificação de N e relação $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ por sítio florestal, na camada de 0-20 cm do solo, nos diferentes períodos de incubação *in situ*

Sítio	Temperatura Ambiente			Temperatura Solo			θ			θ_{cc}	θ_{pmp}	θ_{cc}	N-NH ₄ ⁺			N-NO ₃ ⁻			N-total			N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻
	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média				Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.
°C			°C			cm ³ cm ⁻³			%			kg ha ⁻¹ mês ⁻¹											
Solos arenosos																							
ALT	30,7	18,0	24,7	26,0	20,7	23,4	0,09	0,07	0,08	0,26	0,22	31	8,6	5,6	6,9	7,1	3,3	4,4	14,5	9,0	11,3	1,7	
ANG	27,4	11,5	19,4	21,2	16,6	18,9	0,18	0,11	0,14	0,30	0,23	47	8,2	3,8	5,7	4,6	1,4	2,8	12,8	5,1	8,4	2,7	
BOT	33,0	10,7	21,9	25,5	16,6	21,1	0,11	0,10	0,11	0,30	0,23	37	3,6	5,5	4,7	8,3	4,1	5,9	11,9	9,6	10,6	1,2	
média	30,4	13,4	22,0	24,3	18,0	21,1	0,12	0,09	0,11	0,29	0,23	38	6,8	5,0	5,8	6,7	2,9	4,4	13,1	7,9	10,1	1,9	
Solos textura média																							
AGU	31,5	12,9	22,2	23,8	17,4	20,6	0,12	0,11	0,12	0,36	0,24	34	11,3	7,6	9,2	4,3	3,7	4,0	15,6	11,3	13,1	2,5	
CB3	28,9	13,4	21,1	23,5	17,1	20,3	0,23	0,20	0,22	0,42	0,27	52	7,6	5,4	6,7	4,5	5,4	4,9	12,1	10,8	11,6	1,6	
ITA	29,3	13,5	21,4	22,5	17,2	19,8	0,14	0,12	0,13	0,38	0,25	34	9,2	6,2	7,5	3,5	5,1	4,4	12,7	11,3	11,9	3,3	
média	29,9	13,3	21,6	23,3	17,2	20,3	0,17	0,14	0,16	0,39	0,25	41	9,4	6,4	7,8	4,1	4,7	4,4	13,5	11,1	12,2	2,5	
Solos argilosos																							
CB1	29,4	11,3	20,3	20,8	15,9	18,4	0,23	0,22	0,23	0,47	0,35	49	11,0	6,5	8,4	5,2	7,7	6,6	16,2	14,1	15,0	1,6	
CB2	30,0	12,2	21,1	23,1	17,5	20,3	0,31	0,29	0,30	0,49	0,42	61	11,6	3,7	8,4	5,2	4,7	5,0	16,8	8,4	13,4	1,8	
SMA	26,4	12,6	19,5	21,2	16,0	18,6	0,23	0,22	0,23	0,49	0,42	47	8,5	4,9	6,5	4,3	1,5	2,7	12,8	6,5	9,2	3,8	
PAR	28,8	12,6	20,7	21,9	16,6	19,3	0,19	0,15	0,17	0,45	0,30	38	12,2	13,5	12,9	5,3	7,1	6,3	17,4	20,5	19,2	2,4	
VOT	32,3	14,5	23,4	24,6	17,1	20,8	0,32	0,30	0,31	0,49	0,43	63	11,3	7,0	9,5	4,7	2,3	3,7	15,9	9,2	13,2	3,0	
média	49,0	21,1	35,0	22,3	16,6	19,5	0,26	0,24	0,25	0,48	0,38	52	10,9	7,1	9,2	4,9	4,6	4,9	15,8	11,7	14,0	2,5	

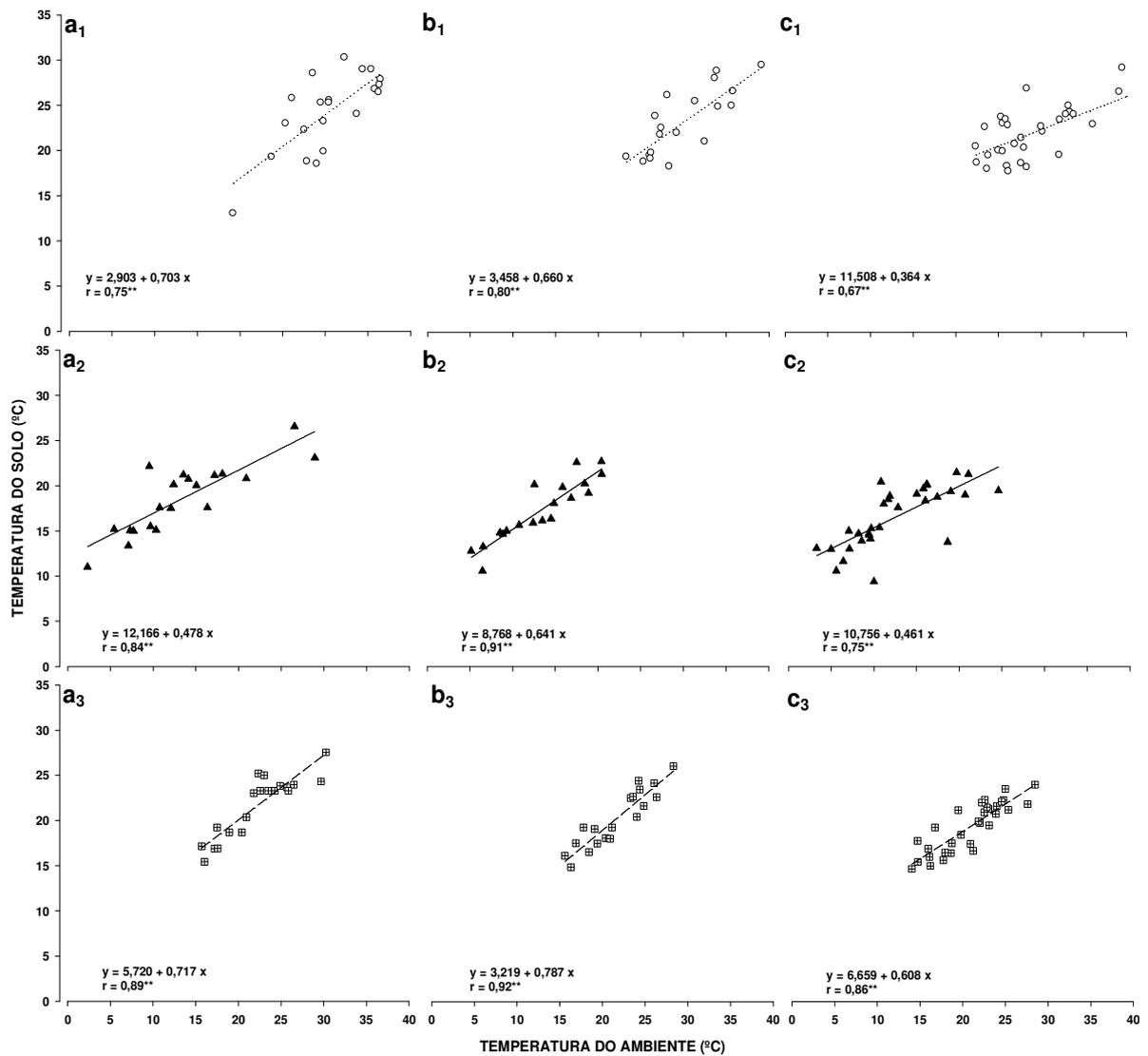


Figura 7 – Correlações entre a temperatura do ambiente e a temperatura máxima (1), mínima (2) e média (3) dos solos de textura arenosa (a), média (b) e argilosa (c). ** significância a 1% de probabilidade

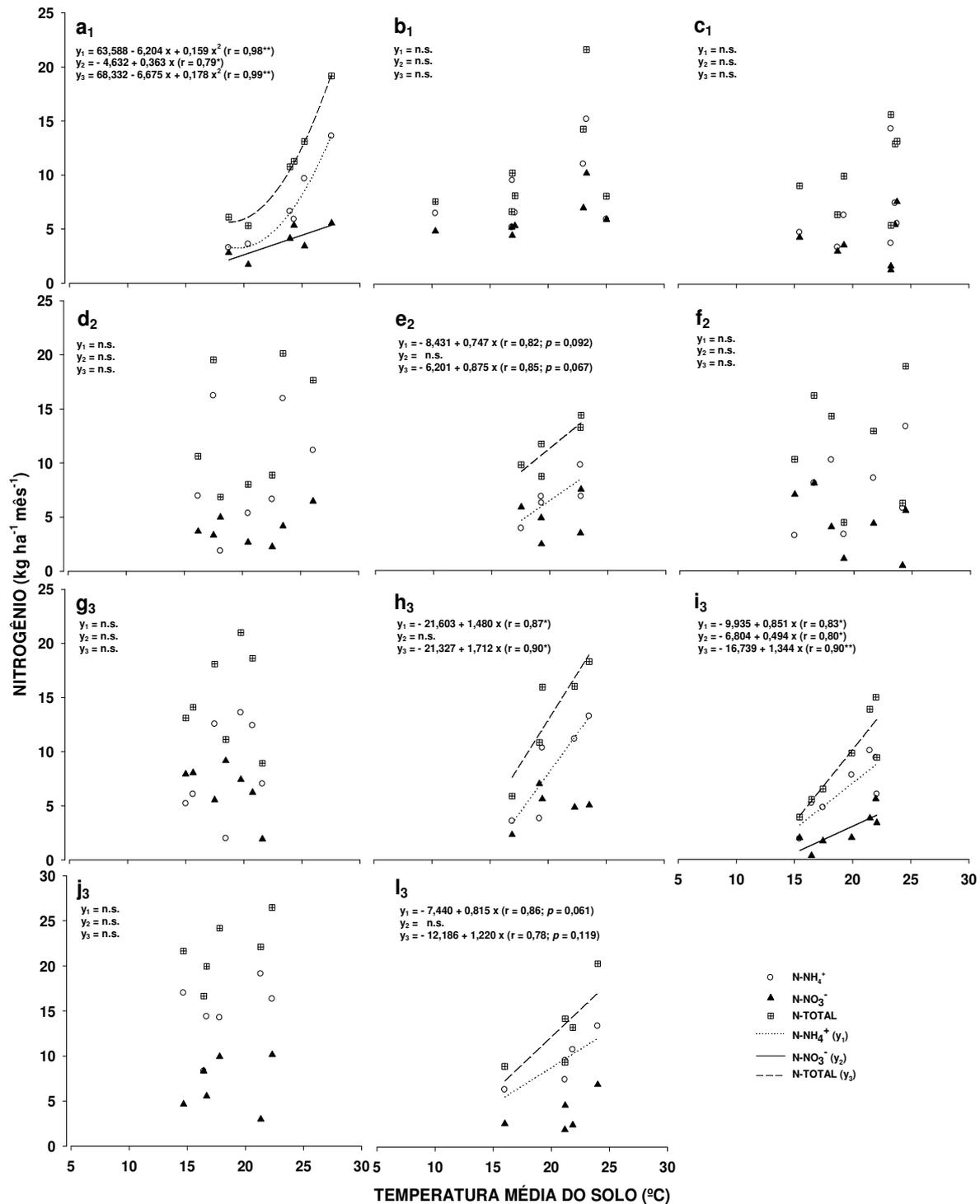


Figura 8 - Taxas de mineralização de amônio e nitrato em função da temperatura média do solo nos solos com textura (1) arenosa, (2) média, (3) argilosa, nos diferentes sítios: a) Altinópolis, b) Angatuba, c) Botucatu, d) Angatuba, e) Capão Bonito 3, f) Itatinga, g) Capão Bonito 1, h) Capão Bonito 2, i) Paraibuna, j) São Miguel Arcanjo e l) Votorantim. *, ** Significativo a 5 e 1% de probabilidade respectivamente. n.s.: Não significativo a 5% de probabilidade

De modo geral, nos diferentes sítios florestais, as equações que relacionam as quantidades de N mineralizadas com as características ambientais apresentaram altos coeficientes de determinação (Tabela 8). A variável dependente melhor explicada foi a taxa de mineralização de N-NH_4^+ , com valores de R^2 variando de 78 a 99% ($P = 0,05$). Para a variável N-NO_3^- , na maioria dos sítios, os valores de R^2 foram menores. Quando se considera os valores totais de N mineralizados, os R^2 das equações também foram altos, variando de 77 a 99% ($P = 0,05$). As temperaturas do solo e da atmosfera foram os fatores que mais contribuíram para explicar as variâncias dos valores de N mineralizado (Tabela 8 e Figura 8). Em poucos sítios, a umidade do solo foi a variável que mais explicou as variações de N mineralizado. Quando se faz o desdobramento dos valores de R^2 para verificar a contribuição das diferentes variáveis independentes, constata-se que a contribuição da umidade foi pequena naquelas equações em que a temperatura também estava presente (Tabela 9). Também foram ajustadas equações para estimar as quantidades mineralizadas de N em função de atributos do clima e do solo com altos valores de R^2 , considerando-se todos os sítios em conjunto (Tabela 10). As variáveis do solo, temperatura média, teores de argila, de matéria orgânica e de N orgânico total e CTC foram as que possibilitaram os ajustes dos melhores modelos. A temperatura média do solo foi a variável que mais contribuiu para os valores de R^2 . No caso da variável dependente N-NH_4^+ , sua contribuição foi de 80%; para o N-NO_3^- , de 75%, e de 88% quando foram consideradas as quantidades totais de N mineralizadas (Tabela 11 e Figura 9).

Tabela 8 – Equações para estimativa das taxas de mineralização de N ($\text{kg ha}^{-1} \text{mês}^{-1}$), nos diferentes sítios, para as diferentes variáveis independentes¹

Sítio	Equação	R ²	S _{yx}	N
AGU	$\text{N-NH}_4^+ = + 0,443.T_{\text{meds}}$	0,78**	5,25	7
	$\text{N-NO}_3^- = + 43,534.U_{\text{s}}$	0,94**	1,02	7
	$\text{N-total} = + 0,633.T_{\text{meds}}$	0,87**	5,40	7
ALT	$\text{N-NH}_4^+ = + 0,476.T_{\text{meds}} - 84,711.U_{\text{s}}$	0,94**	2,06	7
	$\text{N-NO}_3^- = - 17,349 + 0,732.T_{\text{meds}} + 96,476.U_{\text{s}}$	0,93**	0,61	6
	$\text{N-total} = - 22,962 + 1,469.T_{\text{meds}}$	0,85**	1,97	6
ANG	$\text{N-NH}_4^+ = + 34,952.T_{\text{meda}} + 0,636.T_{\text{meds}}$	0,98**	2,59	7
	$\text{N-NO}_3^- = - 0,533.T_{\text{meda}} + 0,438916.T_{\text{meds}} + 42,695.U_{\text{s}}$	0,95**	1,00	7
	$\text{N-total} = - 3,023.T_{\text{maxs}} + 3,568.T_{\text{mins}} + 115,493.U_{\text{s}}$	0,98**	1,70	7
BOT	$\text{N-NH}_4^+ = + 13,976 - 1,325.T_{\text{mins}} + 1,364.T_{\text{mina}}$	0,78**	2,11	6
	$\text{N-NO}_3^- = + 6,940 + 0,240.T_{\text{maxa}} - 0,974.T_{\text{maxs}} - 0,109.T_{\text{mina}} + 0,904.T_{\text{mins}}$	0,99**	0,15	6
	$\text{N-total} = + 28,310 - 1,222.T_{\text{maxs}} + 1,243.T_{\text{mina}}$	0,77**	2,20	6
CB1	$\text{N-NH}_4^+ = + 20,664 + 18,801.T_{\text{mins}} - 6,223.T_{\text{maxa}} - 11,450.T_{\text{mina}}$	0,84**	2,50	6
	$\text{N-NO}_3^- = + 67,953 + 4,393.T_{\text{meda}} - 5,846.T_{\text{meds}} - 223,870.U_{\text{s}}$	0,92**	0,91	6
	$\text{N-total} = + 161,214 - 3,972.T_{\text{maxa}} - 6,099.T_{\text{maxs}} - 11,275.T_{\text{mina}} + 20,173.T_{\text{mins}} - 502,189.U_{\text{s}}$	0,99**	0,27	6
CB2	$\text{N-NH}_4^+ = - 13,222 + 1,063.T_{\text{meda}}$	0,87**	2,06	4
	$\text{N-NO}_3^- = + 19,263.U_{\text{s}}$	0,90**	1,92	5
	$\text{N-total} = - 118,937 + 476,833.U_{\text{s}}$	0,86**	2,69	4
CB3	$\text{N-NH}_4^+ = + 10,835 + 0,266.T_{\text{maxa}} + 0,450.T_{\text{mina}} - 107,446.U_{\text{s}}$	0,99**	0,16	4
	$\text{N-NO}_3^- = + 0,760.T_{\text{mins}} - 0,605.T_{\text{mina}}$	0,95**	1,37	5
	$\text{N-total} = + 0,572.T_{\text{meds}}$	0,98**	1,41	5
ITA	$\text{N-NH}_4^+ = - 0,635.T_{\text{maxs}} - 1,058.T_{\text{mina}} + 2,594.T_{\text{mins}} - 88,844.U_{\text{s}}$	0,99**	0,76	7
	$\text{N-NO}_3^- = + 16,809 - 0,551.T_{\text{maxs}}$	0,47**	2,25	6
	$\text{N-total} = + 36,476 - 1,815.T_{\text{maxs}} + 1,823.T_{\text{mins}} - 157,146.U_{\text{s}}$	0,93**	1,88	6
SMA	$\text{N-NH}_4^+ = - 10,313 + 0,628.T_{\text{maxs}} + 0,273.T_{\text{mina}}$	0,82**	1,44	6
	$\text{N-NO}_3^- = - 6,094 + 0,347.T_{\text{mina}} + 19,781.U_{\text{s}}$	0,75**	1,03	6
	$\text{N-total} = - 21,411 + 1,220.T_{\text{meda}} + 30,239.U_{\text{s}}$	0,91**	1,10	6
PAR	$\text{N-NH}_4^+ = + 5,185.T_{\text{maxs}} + 2,023.T_{\text{mins}} - 2,444.T_{\text{maxa}} - 3,096.T_{\text{mina}} - 163,350.U_{\text{s}}$	0,98**	3,15	7
	$\text{N-NO}_3^- = + 21,344 - 0,521.T_{\text{maxa}}$	0,44**	2,58	6
	$\text{N-total} = + 0,966.T_{\text{meds}}$	0,84**	8,73	7
VOT	$\text{N-NH}_4^+ = - 21,981 + 0,763.T_{\text{meds}} + 49,093.U_{\text{s}}$	0,97**	0,59	4
	$\text{N-NO}_3^- = + 0,161.T_{\text{meda}}$	0,86**	1,68	5
	$\text{N-total} = + 0,572.T_{\text{meda}}$	0,97**	2,55	5

¹ T_{min}S = Temperatura mínima do solo; T_{max}S = Temperatura máxima do solo; T_{med}S = Temperatura média do solo; T_{min}A = Temperatura mínima do ambiente; T_{max}A = Temperatura máxima do ambiente; T_{med}A = Temperatura média do ambiente; U_mS = umidade do solo. ** Significativo a 1% de probabilidade

Tabela 9 - Desdobramento do coeficiente de determinação (R^2), obtidos nas equações apresentadas na tabela 8, para as diferentes variáveis independentes¹

Sítio	Variável dependente	R^2			R^2			UmS	R^2 Total
		TminS	TmaxS	TmédiaS	TminA	TmaxA	TmédiaA		
AGU	N-NH ₄ ⁺ =			0,78					0,78
	N-NO ₃ ⁻ =							0,94	0,94
	N-total =			0,87					0,87
ALT	N-NH ₄ ⁺ =			0,88				0,06	0,94
	N-NO ₃ ⁻ =			0,26				0,67	0,93
	N-total =			0,85					0,85
ANG	N-NH ₄ ⁺ =			0,15			0,83		0,98
	N-NO ₃ ⁻ =			0,01			0,73	0,21	0,95
	N-total =	0,01	0,76					0,21	0,98
BOT	N-NH ₄ ⁺ =	0,09			0,69				0,78
	N-NO ₃ ⁻ =	0,44	0,25		0,28	0,02			0,99
	N-total =		0,09		0,68				0,77
CB1	N-NH ₄ ⁺ =	0,28			0,51	0,05			0,84
	N-NO ₃ ⁻ =			0,03			0,36	0,53	0,92
	N-total =	0,15	0,01		0,30	0,04		0,49	0,99
CB2	N-NH ₄ ⁺ =						0,87		0,87
	N-NO ₃ ⁻ =							0,90	0,90
	N-total =							0,86	0,86
CB3	N-NH ₄ ⁺ =				0,22	0,50		0,27	0,99
	N-NO ₃ ⁻ =	0,84			0,11				0,95
	N-total =			0,98					0,98
ITA	N-NH ₄ ⁺ =	0,07	0,84		0,02			0,06	0,99
	N-NO ₃ ⁻ =		0,47						0,47
	N-total =	0,36	0,04					0,53	0,93
SMA	N-NH ₄ ⁺ =		0,61		0,21				0,82
	N-NO ₃ ⁻ =				0,49			0,26	0,75
	N-total =						0,79	0,12	0,91
PAR	N-NH ₄ ⁺ =		0,81		0,08			0,09	0,98
	N-NO ₃ ⁻ =					0,44			0,44
	N-total =			0,84					0,84
VOT	N-NH ₄ ⁺ =			0,74				0,23	0,97
	N-NO ₃ ⁻ =						0,86		0,86
	N-total =						0,97		0,97

¹ TminS = Temperatura mínima do solo; TmaxS = Temperatura máxima do solo; TmedS = Temperatura média do solo; TminA = Temperatura mínima do ambiente; TmaxA = Temperatura máxima do ambiente; TmedA = Temperatura média do ambiente; UmS = umidade do solo

Tabela 10 – Equações para estimativa das taxas de mineralização de N nos sítios em conjunto, para as diferentes variáveis independentes¹

Equação	R ²	S _{yx}	N
kg N ha⁻¹ mês⁻¹			
N-NH ₄ ⁺ = + 0,0130347.ARG - 0,222922.MOS - 0,288484.TmaxA + 0,943857.TmedA + 0,534251.TmedS - 0,711596.TminS	0,84**	3,72	50
N-NO ₃ ⁻ = - 108,885 + 1,12971.AREIAI + 0,159912.ARG - 0,138176.CTC + 107,177.TmaxS - 214,382.TmedS + 0,244239.TminA + 107,162.TminS	0,43**	2,15	35
N-total = + 0,0126178*ARG + 0,0633219*CTC - 0,375731*MOS - 0,359967*TmaxA + 1,0035*TmedA + 16,369US	0,92**	3,96	57
kg N ha⁻¹ ano⁻¹			
N-NH ₄ ⁺ = + 0,466.Tmeds + 0,011.ARG - 0,543.MOS + 0,014.Nt	0,85**	3,72	50
N-NO ₃ ⁻ = + 0,272.Tmeds + 0,018.ARG - 0,272.MOS	0,81**	2,15	35
N-total = + 0,539.Tmeds + 0,017.ARG - 0,419.MOS + 0,092CTC	0,90**	3,96	57

¹ TminS = Temperatura mínima do solo; TmaxS = Temperatura máxima do solo; TmedS = Temperatura média do solo; TminA = Temperatura mínima do ambiente; TmaxA = Temperatura máxima do ambiente; TmedA = Temperatura média do ambiente; UMS = umidade do solo; ARG = Argila; MOS = Matéria Orgânica; Nt = Nitrogênio orgânico total; CTC = Capacidade de troca de cátions efetiva. ** Significativo a 1% de probabilidade

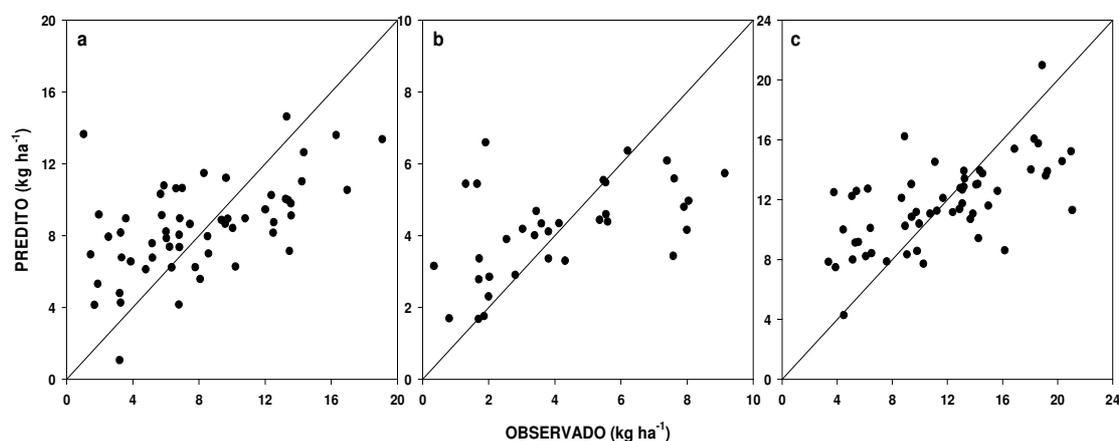


Figura 9 - Quantidades de amônio (a), de nitrato (b) e de N-total (c) observadas e preditas pelas equações para estimativa das taxas de mineralização de N (kg ha⁻¹ mês⁻¹) nos sítios em conjunto, apresentadas na Tabela 10

Sierra (1997) também verificou, em solos sob condições de clima temperado, que a temperatura e a umidade do solo foram os fatores que mais influenciaram a mineralização de N. Em solos de regiões com pouca variação da temperatura, tanto sob tundra (FISK et al., 1998) como sob condições tropicais (SIERRA; MARBAN, 2000), a umidade do solo foi o fator dominante na mineralização de N. Gama-Rodrigues et al. (2005) observaram em solos sob florestas que a umidade do solo explicou 87% da variação dos teores de N-NO₃⁻ e N total e em torno de 71% do C orgânico, expressando a influência direta da disponibilidade de água na acumulação e mineralização de C e N, principalmente em solos de textura arenosa e média, com baixa capacidade de retenção de água. Eles verificaram que a maior taxa de mineralização de N nos solos

de textura média, comparados aos solos arenosos, se devia em grande parte, ao maior teor de umidade provida nesse solo, o que favorecia a atividade dos microorganismos.

O efeito da temperatura e da umidade do solo na taxa de mineralização de N também foram verificados por Stanford et al. (1973). Estes autores observaram que, em solos com teor de umidade próximo a capacidade de campo, a taxa de mineralização é função da temperatura. Obtiveram um coeficiente de temperatura de aproximadamente 2,0, ou seja, a taxa de mineralização dobrava com um aumento de 10°C na temperatura. Strong e Fillery (2002) verificaram menores taxas de mineralização de N quando o teor de umidade era baixo ou acima da capacidade de campo. Nesta situação, ocorrem as formações de microssítios anaeróbios e, conseqüentemente, a desnitrificação (SKOPP et al., 1990; RENAULT; SIERRA, 1997). Esses efeitos da variação temporária da temperatura e do teor de umidade do solo afetam diretamente as taxas proporcionais de amonificação e nitrificação.

Tabela 11 – Análise de variância das equações que relacionam as quantidades de amônio, de nitrato e totais de N mineralizado ($\text{kg N ha}^{-1} \text{mês}^{-1}$) com diferentes atributos do solo¹, quando se consideram todos os sítios florestais em conjunto. As equações obtidas estão apresentadas na Tabela 10

Fator	gl	Soma de quadrado	Quadrado médio	F	P	R ²
N-NH₄⁺						
TmédiaS	1	3551,16	3551,16	256,61	0,00	0,80
ARG	1	17,85	17,85	1,29	0,26	0,01
MOS	1	103,40	103,40	7,47	0,00	0,02
Nt	1	109,47	109,47	7,91	0,00	0,02
N-NO₃⁻						
TmédiaS	1	591,81	591,81	128,53	0,00	0,75
ARG	1	6,33	6,33	1,37	0,24	0,01
MOS	1	47,48	47,48	10,31	0,00	0,06
N-total						
TmédiaS	1	7905,45	7905,45	503,73	0,00	0,88
ARG	1	105,09	105,09	6,70	0,01	0,01
MOS	1	93,44	93,44	5,95	0,01	0,01
CTC	1	92,99	92,99	5,93	0,01	0,01

¹ TmedS = Temperatura média do solo; ARG = Argila; MOS = Matéria Orgânica; Nt = Nitrogênio orgânico total; CTC = Capacidade de troca de cátions efetiva.

Segundo Strong e Fillery (2002) as plantas, na sua maioria, sofrem murchamento quando a tensão da água atinge valor próximo a 1,5 MPa, enquanto que grande

quantidade de microrganismos ainda continua ativa. E, que essa atividade é explicável, em parte, pela elevada pressão osmótica e pela maior absorção de água pela massa protoplasmática, de muitas espécies microbianas, principalmente amonificadoras, quanto comparado às plantas, indicando que a amonificação não é comprometida em solos ressecados, podendo ocorrer acúmulo de N-amoniacal e que, as bactérias nitrificantes são mais exigentes, paralisando suas atividades quando a tensão da água no solo aproxima-se do nível de 1,5 MPa.

4.3 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⁻¹ ano⁻¹, com média de 24 ± 4 m³ ha⁻¹ ano⁻¹; nos tratamentos que receberam fertilização comercial, o IMA variou de 11 a 55 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, com média de 26,7 ± 4 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. Nos povoamentos com idade intermediária, entre 3 a 4 anos, o IMA da testemunha variou de 36 a 57 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, com média de 45 ± 3 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e, no tratamento que recebeu fertilização comercial, entre 38 a 62 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, com média de 47 ± 3 m³ ha⁻¹ 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⁻¹ ano⁻¹, com média de 46 ± 4 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e, nos tratamentos que receberam fertilização comercial, entre 38 a 51 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, com média de 46 ± 4 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (Tabela 12). Em média, a fertilização nitrogenada foi responsável pelo aumento de 14%, 6% e 0% no IMA, nas idades jovem, média e final da rotação de cultivo, respectivamente. Quanto à 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.

Na maioria dos sítios estudados, as análises foliares foram realizadas no período que ainda havia resposta à 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 et al. 1995). Não houve diferenças entre os teores foliares de N nos tratamentos com e sem adição de N (Tabela 13). 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 10). 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 , N_o e as menores taxas de mineralização de N *in situ*. 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 à demanda de N das árvores.

Tabela 12 – Altura (H), diâmetro à altura do peito (DAP), volume sólido com casca (VS), incremento médio anual de madeira com casca (IMA) e produtividade relativa (PR) nos diferentes sítios, tratamentos e idades. 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			%			
Idade (ano)		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		
Idade (ano)		1,8	4	5,7	1,8	4	5,7	1,8	4	5,7	1,8	4	5,7	1,8	4	5,7	
Altinópolis	Test	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 - 140	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	
	N - 270	11,9 b	20,8 a	23,7 b	9,5 b	14,3 a	15,4 a	55 b	198 a	275 a	30 b	49 a	48 a	100	100	100	
Idade (ano)		2			2			2			2			2			
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			
Idade (ano)		2	3		2	3		2	3		2	3		2	3		
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		
Idade (ano)		2	4	9	2	4	9	2	4	9	2	4	9	2	4	9	
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	
Idade (ano)		1			1			1			1			1			
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			
Idade (ano)		1,1			1,1			1,1			1,1			1,1			
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			
Idade (ano)		2	4		2	4		2	4		2	4		2	4		
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		
Idade (ano)		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	
Paraibuna	Test	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 - 45	9,5 a	17,3 a	28,8 a	8,0 a	12,4 a	18,5 a	39 a	153 a	430 a	18 a	38 a	38 a	93	100	100	
	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	
Idade (ano)		1,5			1,5			1,5			1,5			1,5			
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			
Idade (ano)		1,2			1,2			1,2			1,2			1,2			
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			

⁽¹⁾ Volume total com casca

⁽²⁾ Produção Relativa (= Produtividade do tratamento / Produtividade da dose máxima x 100)

Tabela 13 – 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

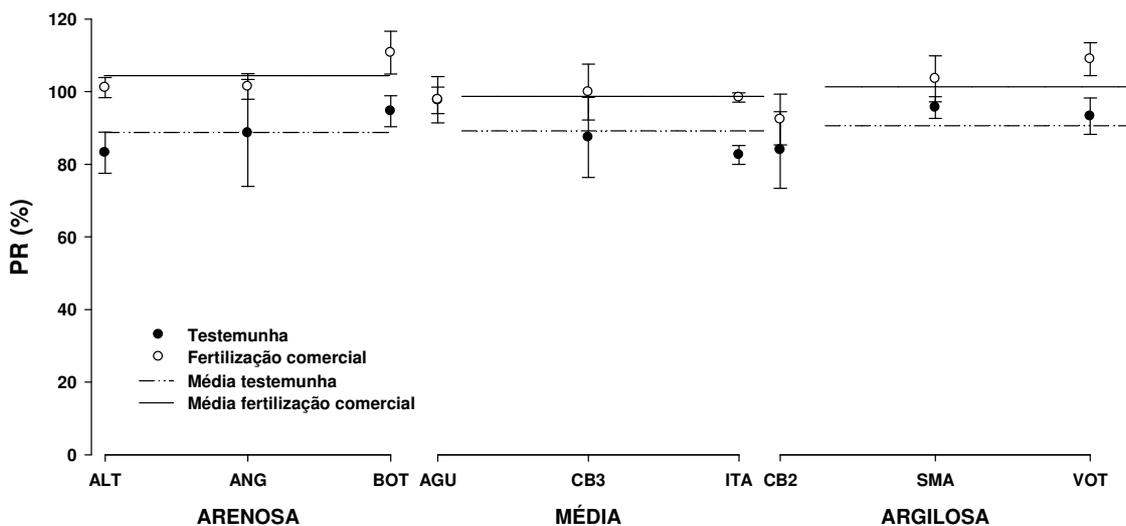


Figura 10 – Produtividades Relativas (PR) dos tratamentos Testemunha e Fertilização Comercial em função da textura do solo em resposta à fertilização nitrogenada, em idade jovem (1 a 2,2 anos), nos diferentes sítios florestais

As PRs nos povoamentos jovens e de idade média não se correlacionaram com a razão N_0/N_t , mesmo nos sítios mais arenosos (Figura 11), nem com as taxas de mineralização de N *in situ*. Esse é mais um indicativo que o N disponível existente no solo é suficiente para atender à 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., 1995, 2000). Gonçalves et al. (1997b) verificaram a ciclagem de 54 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ pela forma bioquímica e 42 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ pela forma biogeoquímica em povoamento de *E. grandis* aos 7 anos de idade; quantidades superiores às demandadas pelas árvores (50 kg N ha⁻¹ 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 à alta demanda das árvores. Ou seja, quando se considera toda a rotação de cultivo, os estoques de N biodecomponíveis são suficientes para atender às demandas das árvores, mas não numa taxa de mineralização suficiente para atender à 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 à demanda das árvores, levando a um decréscimo gradual das respostas à fertilização com a idade.

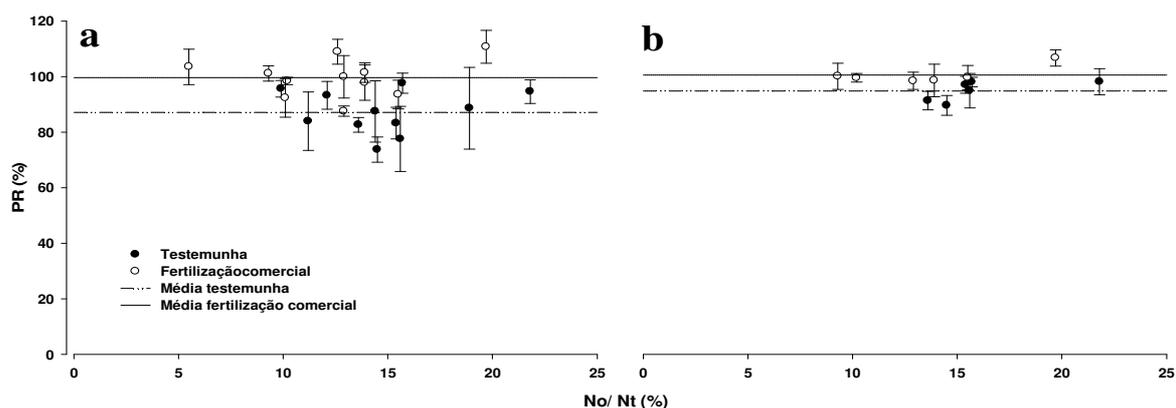


Figura 11 – Correlação entre a Produtividade Relativa (PR) e a razão N_0/N_t , em idade jovem (1 a 2,2 anos) (a) e idade intermediária (3 a 4 anos) (b)

5 CONCLUSÕES

– O microclima do povoamento de eucalipto pode exercer forte influência sobre as taxas de mineralização de N, por conseguinte, sobre a quantidade e a forma de N disponível no solo;

– Os efeitos da variação temporária da temperatura e de umidade do solo afetaram diretamente as taxas de amonificação e nitrificação. Assim, é possível estimar as taxas de mineralização de N com base nesses atributos;

– A recomendação de fertilização usada nos sítios florestais pesquisados é suficiente para atender à demanda das árvores e, em alguns casos, é maior do que a demanda;

– As produtividades relativas dos povoamentos jovens e de idade média não se correlacionaram com a razão entre o N potencialmente mineralizável e o N orgânico total, indicando que há nos sítios suficiente quantidade de N disponível para atender à demanda das árvores.

Assim, retomando as hipóteses iniciais do estudo, verifica-se que:

A Hipótese I (a taxa de mineralização de N é afetada pelos atributos do solo e pelas características ambientais) foi corroborada;

A Hipótese II (os atributos do solo, correlacionados com o N potencialmente mineralizável, são bons indicadores de respostas à fertilização nitrogenada) não foi corroborada, pois, apesar do N_0 ser um bom indicador da disponibilidade de N nos solos, dos 11 sítios estudados, nenhum apresentou resposta à fertilização nitrogenada;

A Hipótese III (é possível estimar a taxa de mineralização do N através dos atributos do solo e características ambientais) também foi corroborada.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, M.A.; ATTIWILL, P.M. Nutrient cycling and nitrogen mineralization in eucalypt forests of souther-eastern Australia- II. Indices of nitrogen mineralization. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.92, p.341-362, 1986.
- ARAÚJO, E.F.; GAVA, J.L.; SOUZA, A.J.; SILVEIRA, R.L.V.A. Crescimento de clones de *Eucalyptus* em resposta à aplicação de nitrogênio em espodossolo no sul da Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003. Viçosa. **Anais...** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, , 2003. 1 CD ROM.
- 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: Elsevier Science, v. 40, p. 2480-2483, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. (2009). **Anuário Estatístico da ABRAF 2009 – Ano Base 2008**. Disponível em: < <http://www.abraflor.org.br/estatisticas.asp>>. Acesso em: 20 jun.2009.
- BALESDENT, J.; BESNARD, E., ARROUAYS, D.; CHENU,C. The dynamics of carbon in particle-size fractions of in a forest-cultivation sequence. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 201, p. 49-57, 2000.
- BARROS, N. F.; COMERFORD, N.B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: _____ **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2, p.487-592.
- 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: Folha de Viçosa, 1990. p.127-86.
- 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. p. 269-286.
- BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas conservacionistas de manejo do solo**. 1996. 241p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.
- 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.
- BLAIR, N.; FAULKNER, R.D.; TILL, A.R., CROCKER, G.J. Long- term management impacts on soil C, N and physical fertility. Part III. Tamworth crop rotation experiment.**Soil Till**, Melbourne., v. 91, p.48-56,2000.

BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian and Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 46, p. 1459-1466, 1995.

BOUILLET, J.P.; SAFOU-MATONDO, R.; LACLAU, J.P.; NZILA, J.D.; RANGER, J. Changes over successive rotations in NPK fertiliser needs of congolese clonal Eucalyptus plantations. Relationships with changes in soil fertility. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL IUFRO, 2001. **Anais...2001**. 1 CD ROM.

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. Fertilização nitrogenada no Estado de São Paulo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 16., 1985, Ilhéus. Fertilização 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.

CHAN, K.Y; BOWMN, A.; OATES, A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in a oxic paleustalf under different pasture leys. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 25, p. 1231-1239, 2001.

CORBEELS, M.; McMURTRIE, R.E. Soil N constraints on productivity of eucalypt plantations with different harvest management. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 2002. Soil Science, Tailândia, 2002. 1 CD ROM.

EATON, W.D. Microbial and nutrient activity in soils from three different subtropical forest habitats in Belize, Central America, before and during the transition from dry to wet season. **Applied Soil Ecology**, Madison, n. 16, p. 219-227, 2001.

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

FISK, M.C., SCHMIDT, S.K. ; SEASTEDT, T.R. Topographic patterns of above- and belowground production and nitrogen cycling in alpine tundra. **Ecology**, Madison, n.79, p.2253-2266, 1998.

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.

FONTAINE, S. ; BARDOUX, G.; BENEST, D.; VERDIER, B.; MARIOTTI, A. & ABBADIE, L. Mechanisms of the priming effect in a savannah soil amended with cellulose. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 125-131, 2004.

GAMA-RODRIGUES, E.F.; BARROS, N.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C. ; SANTOS, G.A. Nitrogênio, carbon e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 29, p. 893-901, 2005.

GAVA, J.L.; ARAÚJO, E.F. SILVEIRA, R.L.V.A. Crescimento de clones de Eucalyptus em resposta à aplicação de nitrogênio em solos com alto teor de matéria orgânica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 1 CD ROM.

GODOY, L.J.G. ;VILLAS BOAS, R.L.; BULL, L.T. Utilização da medida do clorofilômetro no manejo da fertilização nitrogenada em plantas de pimentão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 27, p. 1049-1056, 2003.

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, 1995a. p.43-60

GONÇALVES, J.L.M. Recomendações de fertilização 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.; 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.; 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.; 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.; 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.; RAIJ, B.; GONÇALVES, J.C. Florestais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C (Ed.). **Recomendações de fertilização e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas e Fundação IAC, 1996. p. 245-259.
- 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. p. 01-58.
- 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, 2008.
- 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, 2008. p. 51-62.
- GRANDY, A.S.; ROBERTSON, G.P. Land use intensity effects on soil C accumulation rates and mechanisms. **Ecosystems**, New York, n.10, p.58-73, 2007.
- JENKINSON, D.S.; LADD, J.N. Microbial biomass in soil. Measurement and turnover. In: PAUL, E.A.; LADD, J.N. (Ed.). **Soil biochemistry**. New York : Dekker, 1981. p.415-471.
- KAMOGAWA, M.Y.; TEIXEIRA, M.A.. Auto-amostrador de baixo custo para análise por injeção em fluxo. **Química Nova**, São Paulo, 2009. In Press.
- 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.
- 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.

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.

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.

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.

MALAVOLTA, E.; NOGUEIRA, N. L.; HEINRICHS, R.; HIGASHI, E. N.; RODRIGUEZ-PERES, V. de J.; GUERRA, E ; OLIVEIRA, S. C. de; CABRAL, C. P.; Evolution of nutritional status of the cotton plant with respect to nitrogen. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Athens, v. 35, n. 7/8, p. 1007-1019, 2004.

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**, Valdivia, v. 20, p. 9-21, 1999.

NAMBIAR, E.K.S. Sustained productivity of forest is a continuing challenge to Soil **Science Society of America Journal**, Oppawa, n.60, p. 1629-1642, 1996.

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, v. 156, p. 23-27, 1991.

O'CONNELL A.M.; RANCE S.J. Predicting nitrogen supply in plantation eucalypt forest. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 31, p. 1943 - 1951, 1999.

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

PAUL, K. I.; POLGLASE, P. J.; O'CONNELL, A. M.; CARLYLE, J. C.; SMETHURST, P. J.; KHANNA, P. K. Soil nitrogen availability predictor (snap): a simple model for predicting mineralisation of nitrogen in forest soils. **CSIRO Forestry and Forest Products**, Dordrecht, v.3, n.3, p. 1011-1025, 2002.

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

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. p. 173-180.

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.

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, T.C.; RONDELLA, A.A. Cinética de degradação da matéria orgânica e variação do pH do solo sob diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.619-626, 2002.

RENAULT, P.; SIERRA, J. Modelling oxygen diffusion in aggregated soils: II Anaerobiosis in topsoil layers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1023 – 1030, 1997.

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.

SCHÖNAU, 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.

SIERRA, J. Temperature and soil moisture dependence of n mineralization in intact soil cores. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v.29, p.1557-1563, 1997.

SIERRA, J.; MARBAN, L. Nitrogen mineralization pattern of an oxisol of Guadeloupe, French West Indies. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 64, p. 2002 - 2010, 2000.

SILVA, C.R.; SILVEIRA, R.L.V.A. CAMARGO, F.R.A.; PATROCÍNIO, D.D.; HIGASHI, E.N. Crescimento de clone híbrido de *Eucalyptus* em função da aplicação de nitrogênio na presença e ausência de potássio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Viçosa. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Ribeirão Preto, 2003. 1 CD ROM.

SILVEIRA, R.L.V.A.; ARAÚJO, E.F. SOUZA, A.J. Avaliação do estado nutricional de clones de *Eucalyptus* na região sul da Bahia. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 25., REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 8., SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 6., REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO – FERTIBIO, 3., 2000c. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Sociedade Brasileira de Microbiologia, 2000b. 1 CD ROM.

SILVEIRA, R.L.V.A.; HIGASHI, E.N.; GONÇALVES, A.N.; MOREIRA, A. Avaliação do estado nutricional do *Eucalyptus*: diagnose visual, foliar e suas interpretações. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**, Piracicaba: IPEF, 2000a. p.79-104

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

SKOPP, J.; JAWSON, M.D.; DORAN, JW. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, p. 1619 – 1625, 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.

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.

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.

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

STRONG, D.T.; FILLERY, I.R.P. Denitrification response to nitrate concentrations in sandy soils. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v.24, p.945-954, 2002.

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.

VALE, F.R.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; SANT'ÁNNA, R. Efeito do alumínio sobre a cinética de absorção de amônio e nitrato em raízes intactas de *Eucalyptus alba*. **Revista Árvore**, Viçosa, v.8, p. 123-132, 1984.

VAN VEEN, J.A.; LADD, J.N.; MARTIN, J.K.; AMATO, M. Turnover of carbon, nitrogen and phosphorus through the microbial biomass in soils incubated with ¹⁴C, ¹⁵N and ³²P labeled bacterial cells. **Soil Biology & Biochemistry**, Madison, v.19, p.559-565, 1987.

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 fertilização NPK e do calcário dolomítico no desenvolvimento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Silvicultura**, São Paulo, v.8, n.28, p.531-536, 1983.

ZINN, Y.L.; RESCK, D.V.S; SILVA, J.E. Soil organic carbon as effected by afforestation with Eucalyptus and Pinus in the Cerrado region of Brazil. **Forest Ecology and Management**, Oxford, n.166, p. 285-294, 2002.

WATTS, C.W.; CLARK, L.J.; POULTON, P.R.; POWLSON, D.S. ;WHITMORE, A.P. The role of clay, organic carbon and long-term management on mouldboard plough draught measured on the Broadbalk wheat experiment Rothamsted. **Soil Use Management**, Oxford, n. 22, p.334-341, 2006.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, New Brunswick, v. 37, p 29-38, 1934.

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