

NITROGÊNIO, CARBONO E ATIVIDADE DA BIOMASSA MICROBIANA DO SOLO EM PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO⁽¹⁾

Emmanuela Forestieri da Gama-Rodrigues⁽²⁾, Nairam Félix de Barros⁽³⁾, Antonio Carlos da Gama-Rodrigues⁽⁴⁾ & Gabriel de Araújo Santos⁽⁵⁾

RESUMO

Grande parte das plantações de eucalipto no Brasil situa-se em solos de baixa fertilidade, para os quais a técnica de fertilização e o processo de ciclagem de nutrientes são fundamentais para elevar e manter a produção florestal. Os ganhos de produtividade dessas plantações em resposta à aplicação de N têm sido relativamente baixos, o que indica que o solo tem sido capaz de suprir boa parte da demanda deste nutriente para as plantas. O N da biomassa microbiana é tido como uma fração facilmente disponível, mas pouco se sabe sobre como fatores bióticos e abióticos afetam a sua dinâmica em plantações de eucalipto no Brasil. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variação do N (NBM) e C (CBM) da biomassa microbiana do solo e de outras características com elas relacionadas em plantações de eucalipto com sete anos de idade, cultivadas em várias condições edafoclimáticas do sudeste brasileiro. Amostras do solo foram realizadas durante quatro épocas, de março a novembro de 1995. O teor de NBM variou de 9,17 a 103,71 $\mu\text{g g}^{-1}$ solo, sendo significativamente influenciado pela época de amostragem. Essa variação foi explicada pela combinação da precipitação pluviométrica com o teor de C orgânico ou N total. O teor de argila dos solos estudados foi outra característica de grande importância nessa variação. Dentre outras características avaliadas, verificou-se que a forma de N mineral predominante foi N-NH_4^+ e que os teores de C orgânico e do CBM (carbono da biomassa microbiana) variaram de 2,78 a

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado da primeira autora, apresentada à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ. Recebido para publicação em maio de 2004 e aprovado em setembro de 2005.

⁽²⁾ Professora Associada do Laboratório de Solos, CCTA, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF. CEP 28013-602 Campos dos Goytacazes (RJ). E-mail: emmanuela@uenf.br

⁽³⁾ Professor Titular do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa – UFV. CEP 36571-000 Viçosa (MG). Bolsista do CNPq. E-mail: nfbarros@ufv.br

⁽⁴⁾ Professor Associado do Laboratório de Solos, CCTA, UENF. Bolsista FAPERJ. E-mail: tonygama@uenf.br

⁽⁵⁾ Professor Titular do Departamento de Solos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ. CEP 23851-970 Seropédica (RJ). Bolsista do CNPq. E-mail: gasantos@ufrj.br

12,32 g kg⁻¹ e de 43,39 a 401,06 µg g⁻¹ solo, respectivamente. A RA (respiração acumulada do solo) foi de 14,57 a 79,42 µg g⁻¹ solo e o qCO₂ (quociente metabólico) de 862 a 8026 µg g⁻¹ h⁻¹. O CBM foi também afetado significativamente pela época de amostragem, ao contrário dos teores de C orgânico e N total. As regressões lineares simples do teor de N-NO₃⁻, C orgânico, N total, CBM e NBM com o teor de argila permitiram um modelo preditivo que explicasse a variação destes atributos nos diferentes municípios. A umidade atual do solo explicou 87% da variação dos teores de N-NO₃⁻ e de N total; em torno de 71% do C orgânico e de 48 e 55% da variação do CBM e NBM, respectivamente. As regressões simples do N-NO₃⁻ com o CBM ou NBM apresentaram baixa capacidade preditiva, porém, quando conjugadas com os teores de C orgânico ou N total, por meio de regressão linear múltipla, aumentaram a capacidade preditiva da mineralização do N.

Termos de indexação: matéria orgânica, ciclagem, atividade microbiana.

SUMMARY: CARBON, NITROGEN AND ACTIVITY OF MICROBIAL BIOMASS IN SOIL UNDER EUCALYPT PLANTATIONS

A considerable part of eucalypt plantations in Brazil grows on low-fertility soils for which fertilization techniques and nutrient cycling processes are important to elevate and maintain the forest production. The response of these plantations to nitrogen fertilization has been relatively low, indicating that the soil has been capable of supplying part of the plant demand. Microbial biomass N is considered a readily available fraction, but little is known about the biotic and abiotic factors that affect its dynamics in eucalypt plantations in Brazil. Therefore, the objective of this work was to evaluate the variation of nitrogen in microbial biomass (NBM) of the soil and other related characteristics in seven-year-old eucalypt plantations in several soil and climatic conditions of the Brazilian Southeast. Soil samples (0–10 cm deep) were collected from March to November 1995. The NBM content ranged from 9.17 to 103.71 µg g⁻¹, being significantly influenced by sampling time. This variation was explained by the combination of rainfall with soil C or N content. Clay content also had a strong influence on the variation. N-NH₄⁺ was the predominant form of mineral N. Carbon content and CBM (carbon of the microbial biomass) ranged from 2.78 to 12.32 g kg⁻¹ and from 43.39 to 401.06 µg g⁻¹, respectively. The RA (accumulated soil respiration) ranged from 14.57 to 79.42 µg g⁻¹ and the qCO₂ (metabolic quotient) ranged from 862 to 8026 µg g⁻¹ h⁻¹. Unlike the C and N content, CBM was significantly influenced by sampling time. Simple linear regressions of N-NO₃⁻, C, and N content, CBM and NBM with clay content allowed a predictive model to explain the variation of these attributes. Soil humidity explained 87% of the N-NO₃⁻ and N content variation; around 71% of the C content and 48 and 55% of the CBM and NBM variation, respectively. CBM or NBM, when considered together with C and N content, were good predictors of N mineralization.

Index terms: organic matter, nutrient cycling, microbial activity.

INTRODUÇÃO

O eucalipto é a essência florestal mais plantada nos programas de reflorestamento no Brasil, normalmente em solos de baixa fertilidade e onde a quantidade e a distribuição das chuvas limitam a sobrevivência e o crescimento das árvores. A técnica de fertilização e o processo de ciclagem de nutrientes são fundamentais para elevar e manter a produção florestal desses plantios. Os ganhos de produtividade dessas plantações em resposta à aplicação de N têm sido relativamente baixos, o que indica que o solo tem sido capaz de suprir boa parte da demanda deste nutriente para as plantas. O N da biomassa

microbiana é tido como uma fração facilmente disponível, mas pouco se sabe sobre como fatores bióticos e abióticos afetam a sua dinâmica em plantações de eucalipto no Brasil. Dessa forma, estudos sobre a biomassa microbiana poderiam permitir associar a quantidade de N imobilizado e a atividade microbiana com o potencial dos solos em fornecer este nutriente para as árvores de eucalipto.

A biomassa microbiana é um compartimento da matéria orgânica do solo diretamente influenciado por fatores bióticos e abióticos, sendo, portanto, sensível às mudanças ocorridas no sistema. Parton et al. (1989), em estudos sobre a dinâmica da matéria orgânica do solo, consideraram três frações

principais, com diferentes tempos de ciclagem: a ativa (0 a 14 anos), a lenta (cinco anos) e a passiva (150 anos). Em razão dessas diferenças temporais, a variação no teor de matéria orgânica do solo, baseada apenas no teor de C orgânico do solo, decorrente de mudanças do uso da terra e de técnicas de manejo, pode não ser detectável, enquanto a resposta da fração ativa, que contém a biomassa microbiana e seus metabólitos, ocorre muito mais rapidamente.

Gama-Rodrigues (1997), trabalhando no Sul da Bahia, não encontrou diferença significativa nos teores de C orgânico e N total de solos sob diferentes coberturas florestais. Entretanto, o C e o N da biomassa microbiana variaram significativamente entre as coberturas estudadas. Além destes resultados, por meio de análise estatística multivariada, o autor observou, dentre os atributos do solo analisados, que o C da biomassa microbiana foi o que mais contribuiu (27,73%) para a distinção entre as coberturas florestais, enquanto o C orgânico contribuiu com apenas 6,06%.

A biomassa microbiana é proporcionalmente a menor fração do C orgânico do solo e constitui uma parte significativa e potencialmente mineralizável do N disponível para as plantas. Apresenta rápida ciclagem, responde intensamente a flutuações sazonais de umidade e temperatura, ao cultivo e ao manejo de resíduos. A variação das condições macroclimáticas tem efeito na atividade e biomassa microbiana do solo e, subseqüentemente, no ciclo global do C e N (White & Gosz, 1987). Desta forma, é possível utilizar a estimativa da biomassa microbiana como um indicador biológico dos níveis da matéria orgânica do solo, ou como índice de qualidade do solo (Mele & Carter, 1993; Gama-Rodrigues, 1999).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a variação do N (NBM) e do C (CBM) da biomassa microbiana do solo e de outras características com elas relacionadas em plantações de eucalipto com sete anos de idade, cultivadas em várias condições edafoclimáticas do sudeste brasileiro.

MATERIAL E MÉTODOS

Amostras de solo foram coletadas em plantios comerciais de eucalipto com idade de sete anos, em cinco municípios brasileiros: Aracruz-ES (A), Guanhães-MG (G), Luís Antônio-SP (L.A), Lençóis Paulistas-SP (L.P) e Três Marias-MG (T.M). As coletas foram feitas em março, maio, agosto e novembro de 1995, correspondendo, respectivamente, ao fim do período chuvoso, início do período seco, final da seca e início das chuvas. Em cada local, estabeleceram-se quatro parcelas (20 x 20 m) permanentes para amostragem do solo. Em cada parcela, coletaram-se 23 amostras simples para formar uma amostra composta, da camada de 0-10 cm.

As amostras de solo foram armazenadas a 4 °C (Wardle, 1992) por um período de 15 dias até à época das análises. As amostras de solo foram destorroadas e passadas em peneira de 1,68 mm de malha, homogeneizadas, retirando-se as raízes e resíduos visíveis de plantas e animais do solo. As amostras foram incubadas, por cinco dias, em recipientes que continham um frasco com água e outro com NaOH 1 mol L⁻¹, para capturar o CO₂ liberado do solo. Após a incubação, foi feita a padronização da umidade, até atingir os equivalentes de umidade respectivos de cada um dos solos. Procurou-se, assim, aumentar a precisão das análises (Grisi, 1995).

As espécies de eucalipto plantadas, as classes de solo e alguns dados climáticos de cada região encontram-se no quadro 1. Os solos foram analisados para a determinação do pH (em água); teores de P, K (extraíveis, por Mehlich-1), Ca, Mg e Al (trocaíveis, por KCl 1 mol L⁻¹) (Defelipo & Ribeiro, 1981). O C orgânico foi determinado por oxidação com K₂Cr₂O₇ 0,4 mol L⁻¹ e N total pelo método Kjeldahl, conforme descrito em Embrapa (1979) (Quadro 2). A análise granulométrica foi feita pelo método da pipeta (Embrapa, 1979) (Quadro 3).

A extração do N mineral foi feita com KCl 1 mol L⁻¹. As dosagens do N-NH₄⁺ e do N-NO₃⁻ foram feitas pelo sistema de fluxo contínuo (FIA) (Alves, 1992).

Quadro 1. Classificação dos solos, espécies de eucalipto e características climáticas de cada região estudada

Município	Classificação do Solo	Espécie de eucalipto	Temperatura média anual	Precipitação anual	Déficit hídrico
			°C	mm	
Aracruz (ES)	Argissolo Amarelo	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i> ⁽¹⁾	25	1.522	267
Guanhães (MG)	Latossolo Vermelho-Amarelo	<i>E. grandis</i>	23	1.258	296
Luís Antonio (SP)	Neossolo Quartzênico	<i>E. grandis</i>	23	1.630	39
Lençóis Paulistas (SP)	Latossolo Vermelho	<i>E. grandis</i>	21	1.627	17
Três Marias (MG)	Latossolo Vermelho-Amarelo	<i>E. urophylla</i>	25	966	360

⁽¹⁾ Clone híbrido.

O método da fumigação-extração foi utilizado para estimar o C (Tate et al., 1988) e o N (Joergensen & Brookes, 1990) da biomassa microbiana do solo (CBMS e NBMS, respectivamente). A respiração do solo (RA) foi estimada pela quantidade de C-CO₂ liberado no período de sete dias (Jenkinson & Powlson, 1976). A incubação foi feita, colocando-se cada um dos frascos de solo (50 g) em potes que continham frascos com 10 mL de NaOH 1,0 mol L⁻¹. Os potes foram hermeticamente fechados e, após o período de incubação, procedeu-se à titulação do NaOH com HCl 0,5 mol L⁻¹, utilizando-se fenolftaleína como indicador.

O qCO₂ (quociente metabólico), um índice metabólico para avaliar o efeito das condições de estresse sobre a atividade da biomassa microbiana, foi calculado pela relação entre a respiração basal e o C da biomassa microbiana (Anderson & Domsch, 1993). As relações C da biomassa microbiana/C orgânico (CBM:C) e N da biomassa microbiana/N total (NBM:N), que expressam a eficiência da biomassa microbiana em imobilizar C e N, conforme a qualidade nutricional da matéria orgânica, foram estimadas de acordo com Sparling (1992).

O delineamento experimental para avaliação dos atributos microbiológicos, C orgânico, N total, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻ e umidade do solo foi inteiramente casualizado, com quatro repetições. A comparação de médias foi feita pelo teste de Duncan a 5%. Foram estabelecidas análises de regressão entre os atributos avaliados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Época de coleta

O C e o N da biomassa microbiana (CBM e NBM, respectivamente) foram significativamente influenciados pela época de amostragem, ao contrário dos teores de C orgânico e N total (Quadros 4 e 5). Esses resultados indicam que a influência das condições ambientais na atividade microbiana e no NBM e CBM foi maior do que para os valores totais de N e de C, aparentemente mais estáticos ao longo do ano nos ambientes estudados.

O aumento da precipitação pluviométrica nas regiões estudadas levou a um aumento nos teores de NBM e de CBM (Quadro 6), o que poderia ser interpretado como resultante da maior taxa de decomposição da matéria orgânica, reduzindo, temporariamente, o N e o C nessas frações, com aumento do N mineral e da liberação de CO₂. Alteração mais sensível dos teores de CMB em relação à matéria orgânica foi também detectada por Matsuoka et al. (2003), ao compararem diferentes sistemas de cultivo e vegetação nativa no Cerrado, observando que as reduções nos teores de CBM foram mais acentuadas.

A RA (respiração acumulada), o qCO₂ (quociente metabólico), as relações C microbiano:C orgânico (relação CBM:C) e N microbiano: N total (relação NBM:N), o N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ também variaram entre as épocas (Quadros 4 e 5). Dessa maneira, a

Quadro 2. Caracterização química dos solos sob povoamentos de eucalipto em diferentes locais da região sudeste

Município	pH	P	K	Al	Ca	Mg
		mg dm ⁻³		cmolc dm ⁻³		
Aracruz (ES)	5,1	2,1	27	0,3	1,2	0,4
Guanhães (MG)	4,2	0,7	14	1,4	0,2	0,1
Luís Antonio (SP)	4,7	1,6	7	0,7	0,2	0,1
Lençóis Paulistas (SP)	4,9	5,7	7	0,8	0,1	0,1
Três Marias (MG)	4,7	2,2	10	0,6	0,4	0,1

Quadro 3. Composição granulométrica dos solos sob povoamentos de eucalipto em diferentes locais da região sudeste

Município	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Classe Textural
	g kg ⁻¹				
Aracruz (ES)	420	200	50	330	Franco-argilo-arenosa
Guanhães (MG)	230	090	90	590	Argila
Luís Antonio (SP)	470	460	10	60	Areia
Lençóis Paulistas (SP)	480	370	20	130	Areia-franca
Três Marias (MG)	200	610	30	160	Franco-arenosa

Quadro 4. Carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, respiração acumulada e quociente metabólico de solos sob plantações de eucalipto, com sete anos de idade, de acordo com a época de amostragem

Local	Época de amostragem ⁽²⁾									
	1	2	3	4	Média	1	2	3	4	Média
	CBM ⁽¹⁾					NBM				
	— $\mu\text{g g}^{-1}$ —									
Aracruz	247,21 a	165,21 a	155,65 bc	80,60 bc	162,17 b	37,44 a	17,99 b	27,53 b	23,62 b	26,64 bc
Guanhães	227,10 a	110,74 b	401,06 a	310,20 a	262,27 a	51,20 a	73,70 a	103,71 a	96,23 a	81,21 a
Luís Antônio	93,44 a	43,39 c	96,10 c	95,34 bc	82,07 c	23,53 a	22,65 b	15,37 b	9,17 c	17,68 c
Lençóis Paulistas	140,95 a	66,82 c	135,38 c	62,40 c	101,39 c	59,74 a	33,61 b	36,39 b	16,85 bc	36,65 bc
Três Marias	205,46 a	142,39 ab	209,43 b	126,08 b	170,84 b	95,18 a	25,49 b	33,84 b	19,83 b	43,58 b
Média	182,83 A	105,71 B	199,52 A	134,92 B		53,42 A	34,69 B	43,37 AB	33,14 B	
	RA					QCO ₂				
	— $\mu\text{g g}^{-1}$ —									
Aracruz	24,56 c	29,06 b	42,08 b	35,33 b	32,76 b	938 a	1.129 b	1.690 a	2.943 b	1.675 b
Guanhães	48,58 ab	58,65 a	68,38 a	43,83 b	54,86 a	1.496 a	3.317 b	1.056 a	862 c	1.683 b
Luís Antônio	35,53 bc	30,01 b	21,23 c	14,57 c	25,33 b	3.634 a	4.616 b	1.401 a	934 c	2.646 b
Lençóis Paulistas	26,66 c	75,62 a	43,50 c	63,26 a	52,26 a	1.105 a	8.026 a	2.383 a	6.371 a	4.471 a
Três Marias	62,96 a	79,42 a	57,16 ab	42,76 b	60,57 a	3.661 a	3.456 b	1.636 a	2.091 bc	2.710 b
Média	39,66 B	54,55 A	46,47 AB	39,95 B		2.167 B	4.109 A	1.633 B	2.640 B	
	CBM:C					NBM:N				
	— % —									
Aracruz	2,09 a	2,51 ab	1,35 b	1,02 b	1,74 b	4,31 a	2,86 a	3,61 a	3,08 bc	3,47 b
Guanhães	2,31 a	0,99 b	4,12 a	2,53 a	2,49 ab	3,33 a	4,48 a	7,99 a	6,89 a	5,67 ab
Luís Antônio	1,92 a	1,71 b	2,32 b	1,97 a	1,98 b	6,51 a	6,63 a	4,76 a	2,12 c	5,00 b
Lençóis Paulistas	3,16 a	1,33 b	2,28 b	0,96 b	1,93 b	19,93 a	8,42 a	9,91 a	3,89 b	10,54 a
Três Marias	2,91 a	3,22 a	3,70 a	2,19 a	3,00 a	15,69 a	5,28 a	7,74 a	3,98 b	8,17 ab
Média	2,48 B	1,95 BC	2,75 A	1,74 C		9,95 A	5,53 AB	6,80 AB	3,99 B	

⁽¹⁾ CBM – carbono da biomassa microbiana; NBM – nitrogênio da biomassa microbiana; RA – respiração acumulada; qCO₂ – quociente metabólico; CBM:C – relação C microbiano:C orgânico; NBM:N relação nitrogênio microbiano: N total. ⁽²⁾ 1 – final das chuvas; 2 – início da seca; 3 – final da seca; 4 – início das chuvas. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5 %. Letras minúsculas comparam médias dispostas na vertical. Letras maiúscula comparam médias dispostas na horizontal.

variação temporal influenciaria também a eficiência dos microrganismos em utilizar o substrato para sua atividade (qCO₂) e em incorporar o C à sua biomassa, tendo em vista que o quociente metabólico (qCO₂) indicaria que, à medida que determinada população microbiana se tornasse mais eficiente, menos C seria perdido como CO₂ pela respiração e maior proporção de C seria incorporada ao tecido microbiano. Já as relações CBM:C e NBM:N expressariam a eficiência da biomassa microbiana em imobilizar C e N de acordo com a qualidade nutricional da matéria orgânica.

Em solos com adição de resíduo vegetal de baixa qualidade nutricional, os microrganismos encontram-se sob estresse, tornando-se incapazes de utilizar totalmente o N e o C orgânico (Wardle, 1993). Como a biomassa microbiana apresenta uma rápida taxa de ciclagem, este compartimento reflete mudanças conforme os fatores abióticos e práticas de manejo antes mesmo que ocorram mudanças nos níveis de

matéria orgânica. Portanto, tantos os valores absolutos de CBM, NBM e RA, como os índices qCO₂, CBM:C e NBM:N, seriam potenciais indicadores da qualidade do solo.

A precipitação pluvial, ao longo do período de amostragem, e os teores de C orgânico ou o N total permitiram prever a variação do CBM, NBM e N-NO₃⁻ (Quadro 6). Solos com maiores teores de C orgânico e de N total apresentaram maiores reservas de CBM e NBM, as quais foram mais rapidamente mineralizadas nos períodos mais chuvosos.

Para Wardle (1992), atributos químicos e variáveis macroclimáticas considerados em conjunto são quase sempre capazes de explicar a variação global da atividade e dos teores de C e N da biomassa microbiana, especialmente em solos florestais. A precipitação pluvial é um componente que controla, em escala regional, o processo de decomposição da matéria orgânica do solo (Lavelle et al., 1993; Berg,

Quadro 5. Carbono orgânico, N total, N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻, teor de umidade dos solos e precipitação pluvial em plantações de eucalipto, com sete anos de idade, de acordo com a época de amostragem

Local	Época de amostragem ⁽¹⁾									
	1	2	3	4	Média	1	2	3	4	Média
	C orgânico					N total				
	g g ⁻¹									
Aracruz	11,30 a	8,59 a	11,62 a	7,73 b	9,81 a	0,92 b	0,69 b	0,82 b	0,78 b	0,80 b
Guanhães	10,28 a	11,29 a	9,79 b	12,32 a	10,92 a	1,55 a	1,71 a	1,29 a	1,40 a	1,49 a
Luís Antônio	4,79 b	2,78 b	4,38 c	4,91 d	4,22 b	0,38 d	0,37 c	0,36 c	0,44 c	0,39 c
Lençóis Paulistas	4,95 b	4,92 b	6,17 c	6,82 bc	5,72 b	0,35 d	0,43 bc	0,38 c	0,43 c	0,40 c
Três Marias	7,07 b	4,51 b	5,68 c	5,75 cd	5,76 b	0,64 c	0,52 bc	0,59 bc	0,50 c	0,56 bc
Média	7,68 ^{ns}	7,53 ^{ns}	7,50 ^{ns}	6,42 ^{ns}		0,77 ^{ns}	0,74 ^{ns}	0,69 ^{ns}	0,71 ^{ns}	
	N-NH₄⁺					N-NO₃⁻				
	mg kg ⁻¹									
Aracruz	34,81 a	3,81 bc	8,15 a	9,99 a	14,19 a	4,17 b	3,07 b	3,13 b	3,25 b	3,41 b
Guanhães	7,50 b	6,18 a	4,39 bc	5,05 b	5,78 c	7,07 a	6,77 a	8,14 a	7,33 a	7,33 a
Luís Antônio	33,21 a	3,07 c	2,96 c	6,72 b	11,49 ab	0,55 c	0,14 c	0,62 c	0,97 c	0,57 c
Lençóis Paulistas	19,29 ab	6,08 a	6,46 ab	10,97 a	10,70 ab	0,26 c	0,02 c	0,44 c	0,63 c	0,38 c
Três Marias	21,35 ab	5,22 ab	3,85 c	5,44 b	8,97 bc	0,26 c	0,25 c	0,61 c	1,43 c	0,64 c
Média	22,89 A	4,87 B	5,16 B	7,64 B		2,98 A	2,05 B	2,56 AB	2,72 AB	
	Umidade					Precipitação pluvial				
	g kg ⁻¹					mm				
Aracruz	137,7 b	126,2 b	130,7 b	114,7 b	127,3 b	206	61	87	59	103 ^{ns}
Guanhães	256,4 a	264,2 a	280,5 a	323,7 a	281,2 a	17	0	289	0	76 ^{ns}
Luís Antônio	34,6 c	42,2 c	6,1 c	31,5 c	28,6 c	17	49	0	115	45 ^{ns}
Lençóis Paulistas	90,7 b	48,7 c	39,8 c	7,9 c	46,7 c	61	18	8	49	34 ^{ns}
Três Marias	107,0 b	47,9 c	32,2 c	25,1 c	53,0 c	134	33	0	111	69 ^{ns}
Média	125,3 ^{ns}	105,9 ^{ns}	97,8 ^{ns}	100,6 ^{ns}		87 ^{ns}	32 ^{ns}	77 ^{ns}	67 ^{ns}	

⁽¹⁾ 1 – final das chuvas; 2 – início da seca; 3 – final da seca; 4 – início das chuvas. Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, são iguais entre si pelo teste de Duncan a 5 %. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Duncan a 5 %. Letras minúsculas comparam médias dispostas na vertical. Letras maiúscula comparam médias dispostas na horizontal.

2000) e, conseqüentemente, a atividade dos microrganismos. Uma maior precipitação pluvial leva à maior produção de biomassa em plantações de eucalipto, à maior acumulação de matéria orgânica no solo (Santana, 2000) e, conseqüentemente, ao aumento da ação dos microrganismos, pela maior quantidade de substrato disponível, nos processos de imobilização (C e N) e mineralização (N). Wardle (1998) evidenciou mais tarde que a distribuição das chuvas e a umidade do solo seriam os principais fatores na regulação da biomassa microbiana.

Araújo (2003), trabalhando em solos do terço superior de uma toposeqüência sob pastagem, no noroeste fluminense, não encontrou diferença significativa entre as épocas de coleta (verão e inverno) para C orgânico e N total do solo. Contudo, o CBM, a RA e a relação CBM:C foram significativamente maiores no verão. A autora mostrou que o aumento da quantidade de água e nutrientes no solo na época do verão favoreceu a atividade dos microrganismos e, conseqüentemente, a eficiência da biomassa microbiana em imobilizar C.

mos e, conseqüentemente, a eficiência da biomassa microbiana em imobilizar C.

Solos amostrados sob diferentes plantações de eucalipto

Os solos amostrados neste estudo são fortemente ácidos e de baixa fertilidade (Quadro 2), com teor de argila variando de 60 a 590 g kg⁻¹ (Quadro 3). A forma de N mineral predominante foi N-NH₄⁺, a qual é coerente com as condições de solo ácido e de baixa fertilidade. Isso não traria empecilhos à nutrição nitrogenada do eucalipto tendo em vista sua absorção preferencial dessa forma de N (Vale et al., 1984). O C e N da biomassa microbiana estão na faixa dos valores encontrados por Monteiro (2001), Gama-Rodrigues (1992) e Gama-Rodrigues et al. (1997) em plantios de eucalipto, sob diferentes condições edafoclimáticas.

Guanhães e Aracruz, em média, apresentaram os maiores valores para a maioria das características

analisadas (Quadro 4), aparentemente em razão do maior teor de argila de seus solos. As regressões lineares simples do teor de $N-NO_3^-$, C orgânico, N total, CBM e NBM com o teor de argila (Quadro 6) representam modelos preditivos que explicam a variação destes atributos. Os teores de C orgânico e N total foram mais fortemente influenciados pelo teor de argila do que a própria biomassa microbiana (Quadro 6). A argila dá maior proteção e estabilidade à matéria orgânica do solo preservando-a da biodegradação (Volkoff et al., 1984). Isto promoveria um efeito indireto na biomassa microbiana pelo aumento da quantidade de substrato para o metabolismo dos microrganismos (Jenkinson & Rayner, 1977; van Veen et al., 1987).

Assim, os solos sob eucalipto, quanto mais argilosos, além de apresentarem maior estoque de C e N, apresentariam maior potencial de fornecimento de N para as plantas e uma biomassa microbiana mais ativa. Eaton (2001), em trabalho com solos com alto teor de argila, sob floresta subtropical, de baixa produção de fitomassa, observou que, após dois dias de chuva intensa, estes solos apresentaram maiores percentuais de aumento no CBM, C orgânico e taxa de nitrificação, quando comparados com os demais solos, que apresentavam menores teores de

argila. O autor sugeriu que a matéria orgânica em decomposição ficou adsorvida à argila do solo, tornando-a disponível para a comunidade microbiana por um longo período de tempo.

Araújo (2003), em solos de pastagem, observou que os solos com maior percentual de argila foram aqueles que apresentaram maiores valores de CBM, RA e da relação CBM:C, evidenciando a interação da argila com os microrganismos do solo.

Além do teor de argila, outra característica edáfica que regula a atividade dos microrganismos no solo é a umidade. No presente trabalho, a umidade atual do solo explicou 87% da variação dos teores de $N-NO_3^-$ e N total; em torno de 71% do C orgânico, e de 48 e 55% da variação do CBM e NBM, respectivamente (Quadro 6). Estes resultados, semelhantemente àqueles obtidos para argila, expressam a influência direta da disponibilidade de água, nos locais amostrados, na acumulação de C e na mineralização de N orgânico do solo e, em menor grau, nos processos de imobilização de C e N, principalmente por serem solos, na sua maioria, de textura arenosa e média (Quadro 2), com baixa capacidade de retenção de água. Os trabalhos de Luizão et al. (1992), em solos sob floresta tropical úmida na Amazônia, e de Arunachalam et al. (1997), em solos

Quadro 6. Regressões entre atributos microbiológicos e químicos dos solos e precipitação pluvial em plantações de eucalipto, com sete anos de idade

Regressões	R ²
CBM = 62.747 - 0.828 PPT + 0,0054 PPT ² + 130.258 C	0,706**
CBM = 37.753 + 0.555 PPT + 1121.39 N	0,572**
NBM = 18.202 - 0.313 PPT + 0.001 PPT ² + 38.429 C	0,440*
NBM = 17.248 - 0.161 PPT + 0.001 PPT ² + 336.125 N	0,504**
CBM = 3.096 + 77.098 ARG	0,453**
NBM = 16.894 + 0.955 ARG	0,407**
$N-NO_3^-$ = -1.255 + 0.150 ARG	0,926**
C = 0.398 + 0.012 ARG	0,767**
N = 0.934 + 0.930 ARG	0,934**
CBM = 80.217 + 6.608 U	0,484**
NBM = 14.905 + 2.296 U	0,551**
$N-NO_3^-$ = -0.872 + 0.301 U	0,868**
C = 0.434 + 0.025 U	0,706**
N = 0.024 + 0.004 U	0,874**
CBM = 4.001 + 0.238 NBM	0,537**
CBM = 16.364 + 191.370 C	0,381**
CBM = 64.878 + 1249.66 N	0,357**
NBM = 3.261 + 52.024 C	0,266*
NBM = 9.779 + 431.466 N	0,401**
$N-NO_3^-$ = -3.697 + 8.616 C	0,665**
$N-NO_3^-$ = -2.333 + 67.543 N	0,897**
N = -0.018 + 0.125 C	0,710**
$N-NO_3^-$ = -0.954 + 0.022 CBM	0,442**
$N-NO_3^-$ = 0.161 + 0.058 NBM	0,314*
$N-NO_3^-$ = -3.843 + 0.008 CBM + 6.916 C	0,707**
$N-NO_3^-$ = -2.674 + 0.005 CBM + 60.978 N	0,912**
$N-NO_3^-$ = -3.763 + 0.019 NBM + 7.578 C	0,692**
$N-NO_3^-$ = -2.265 - 0.006 NBM + 70.531 N	0,899**

* e **: Significativos a 5 e 1 %. PPT: precipitação pluvial; ARG: teor de argila; U: teor de umidade; CBM: carbono da biomassa microbiana; Ppt: Precipitação pluvial; C: C orgânico; N: N total; NBM: nitrogênio da biomassa microbiana; RA: respiração acumulada.

sob florestas úmidas na Índia, mostraram que a umidade do solo influenciou positivamente a atividade dos microrganismos e, conseqüentemente, os níveis de nutrientes no solo.

Inter-relações dos atributos químicos e microbiológicos do solo

O CBM relacionou-se linearmente com o NBM, indicando que o C e N estão sendo quantificados no mesmo compartimento do solo (Quadro 6). Regressões lineares positivas foram obtidas entre o C orgânico e N total e de ambos atributos com o $N-NO_3^-$, CBM e NBM (Quadro 6). O aumento na quantidade de C e N, indispensáveis ao metabolismo microbiano, favoreceu os processos de imobilização (C e N) e mineralização (N). As regressões lineares do $N-NO_3^-$ com o CBM ou NBM apresentaram baixa capacidade preditiva, porém, quando conjugadas com os teores de C orgânico ou N total, por meio da regressão linear múltipla, aumentaram a capacidade preditiva da mineralização do N (Quadro 6). O teor de $N-NO_3^-$ no solo aumentou com os teores de C e N totais e reduziu com o aumento do NBM. Segundo estes resultados, a biomassa microbiana funcionaria como um compartimento de reserva para a mineralização de N e a inter-relação do estoque de C e N com a biomassa microbiana seria refletida na disponibilidade de N para a cultura do eucalipto durante o ano.

CONCLUSÕES

1. O regime de precipitação pluvial, conjugado com o C orgânico ou N total mostrou-se adequado para uso em modelos preditivos da variação da biomassa microbiana.

2. Os teores de C e N, NBM, $N-NO_3^-$ e CBM foram mais influenciados pelo teor de argila e umidade atual do solo do que por outras características edáficas.

3. Os teores de C orgânico, N total e de NBM e CBM foram bons estimadores da mineralização de N.

LITERATURA CITADA

ALVES, B.J.R. Avaliação da mineralização do N do solo *in situ*. Itaguaí, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1992. 177p. (Tese de Mestrado)

ANDERSON, J.P.E. & DOMSCH, K.H. The metabolic quotient for CO_2 (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biol. Biochem.*, 25:393-395, 1993.

ARAÚJO, S.P. Atributos biológicos do solo sob diferentes coberturas vegetais amostrados em duas estações de ano numa topossequência no Noroeste Fluminense – RJ. Campos dos Goytacazes, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2003. 51p. (Tese de Mestrado)

ARUNACHALAM, K.; ARUNACHALAM, A.; TRIPATHI, R.S. & PANDEY, H.N. Dynamics of microbial population during the aggradation phase of a selectively logged subtropical humid forest in north-east India. *Trop. Ecol.*, 38:333-341, 1997.

BERG, B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *For. Ecol. Manag.*, 133:13-22, 2000.

DEFELIPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. Análise química do solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1981. 17p. (Boletim de Extensão, 29)

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. *Appl. Soil Ecol.*, 16:219-227, 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Rio de Janeiro, Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1979. 412p.

GAMA-RODRIGUES, A.C. Ciclagem de nutrientes por espécies florestais em povoamentos puros e mistos em solos de tabuleiro da Bahia, Brasil. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 107p. (Tese de Doutorado)

GAMA-RODRIGUES, E.F. Biomassa-C Microbiana de Solos de Itaguaí: Comparação entre os Métodos da Fumigação-Incubação e Fumigação-Extração. Itaguaí, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1992. 108p. (Tese de Mestrado)

GAMA-RODRIGUES, E.F. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo – Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, Genesis, 1999. 491p.

GAMA-RODRIGUES, E.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C. & BARROS, N.F. Biomassa microbiana de carbono e de nitrogênio de solos sob diferentes coberturas florestais R. Bras. Ci. Solo, 21:361-365, 1997.

GRISI, B.M. Biomassa e a atividade de microrganismos do solo: Revisão metodológica. R. Nordestina Biol., 10:1-22, 1995.

JENKINSON, D.S. & POWLSON, D.S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil- V. A method for measuring soil biomass. *Soil Biol. Biochem.*, 8:209-213, 1976.

JENKINSON, D.S. & RAYNER, J.S. The turnover of organic matter in some of the Rothamstead classical experiments. *Soil Sci.*, 123:298-305, 1977.

JOERGENSEN, R.G. & BROOKES, P.C. Ninhydrin-reactive nitrogen measurements of microbial biomass in 0.5 M K_2SO_4 soil extracts. *Soil Biol. Biochem.*, 22:1023-1027, 1990.

LAVELLE, P.; BLANCHART, E.; MARTIN, S.; MARTIN, A.; BAROIS, S.; TOUTAIN, F.; SPAIN, A. & SCHAEFER, R. A hierarchical model for decomposition in terrestrial ecosystem. Application to soils in the humid tropics. *Biotropica*, 25:130-150, 1993.

- LUIZÃO, R.C.C.; BONDE, T.A. & ROSSWALL, T. Seasonal variation of soil microbial biomass – the effects of clearfelling a tropical rainforest and establishment of pasture in the Central Amazon. *Soil Biol. Biochem.*, 8:805-813, 1992.
- MATSUOKA, M.; MENDES, I.C. & LOUREIRO, M.F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). *R. Bras. Ci. Solo*, 27:425-433, 2003.
- MELE, P.M. & CARTER, M.R. Effect of climatic factors on the use of microbial biomass as an indicator of changes in soil organic matter. In: MULONGOY, K. & MERCKX, R. *Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture*. Chichester, John Wiley, 1993. 392p.
- MONTEIRO, M.T. Carbono, nitrogênio e atividade da biomassa microbiana: Indicadores a qualidade do solo e da serapilheira em sítios florestais do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2001. 75p. (Tese de Mestrado)
- PARTON, W.J.; SANFORD, R.L.; SANCHEZ, P.A. & STEWART, J.W.B. Modeling soil organic matter dynamics in tropical soils. In: COLEMAN, D.C.; OADES, J.M. & WEHARA, G., eds. *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*. Honolulu, NifTal Project, 1989. p.153-171.
- SANTANA, R.C. Predição de biomassa e alocação de nutrientes em povoamentos de eucalipto no Brasil. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2000. 71p. (Tese de Doutorado)
- SPARLING, G.P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Aust. J. Soil Res.*, 30:195-207, 1992.
- TATE, K.R.; ROSS, D.J. & FELTHAM, C.W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: Effects of experimental variables and some different calibration procedures. *Soil Biol. Biochem.*, 20:329-335, 1988.
- 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*. *R. Árvore*, 8:123-132, 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. Biol. Biochem.*, 19:559-565, 1987.
- VOLKOFF, B.; CERRI, C.C. & MELFI, J.A. Húmus e mineralogia dos horizontes superficiais de três solos de campo da altitude dos Estados de Minas Gerais, Paraná e Santa Catarina. *R. Bras. Ci. Solo*, 8:277-283, 1984.
- WARDLE, D.A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. *Biol. Rev.*, 67:321-358, 1992.
- WARDLE, D.A. Changes in the microbial biomass and metabolic quotient during leaf litter succession in some New Zealand forest and scrubland ecosystem. *Funct. Ecol.*, 7:346-355, 1993.
- WARDLE, D.A. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass: a global-scale synthesis. *Soil Biol. Biochem.*, 13:1627-1637, 1998.