

NITRIFICAÇÃO E QUALIDADE DE SOLOS SOB PLANTAÇÕES DE EUCALIPTOS COM DIFERENTES IDADES*

Tótola, M. R.¹ y Lazari, M. F.²

Departamento de Microbiología Universidad Federal de Viçosa – Brasil.

RESUMO

O estudo foi realizado utilizando amostras de solos coletadas em áreas de plantios comerciais de *Eucalyptus grandis* e de híbridos de *E. grandis* com *E. urophylla*, em seis diferentes idades, variando entre 3 e 84 meses; em um pomar de matrizes com 180 meses e em uma mata secundária de vegetação nativa pertencentes à empresa CENIBRA Celulose Nipo-Brasileira S.A., MG. Este trabalho teve como objetivo estudar o efeito do distúrbio causado pelo corte da floresta no processo de nitrificação e em outros processos bioquímicos e microbiológicos do solo. As atividades das enzimas-glicosidase e fosfomonoesterases, o teor de amônio e as taxas de amonificação e de nitrificação líquidas aumentaram com o avanço da idade da vegetação, sendo que os maiores valores foram detectados na área com vegetação nativa e numa área sob eucalipto aos 3 anos de idade, que recebeu cultivo mínimo. O teor de nitrato, ao contrário, apresentou relação inversa com a idade das árvores. A taxa de nitrificação potencial também foi mais elevada em áreas de plantios mais jovens, com idade até 3 anos. Trinta e cinco variáveis de natureza física, química, bioquímica e microbiológica foram utilizadas para análise de agrupamento das áreas estudadas. As áreas com povoamentos de eucalipto mais jovens posicionaram-se mais distantes da área com vegetação nativa, usada como referência, e da área com eucalipto aos 7 anos de idade. A retirada da floresta e posterior implantação de um povoamento de eucalipto causou distúrbio na comunidade microbiana do solo. O aumento da idade do povoamento de eucalipto e a adoção de um sistema de preparo do solo considerado mais conservador, qual seja, o cultivo mínimo, contribuíram para o restabelecimento das condições bioquímicas e microbiológicas encontradas na área com vegetação nativa.

Indexação: Ciclo do nitrogênio; Bioindicadores; Enzimas do Solo; Conservação do Solo.

NITRIFICATION AND SOIL QUALITY UNDER EUCALYPTUS STANDS AT DIFFERENT AGES

ABSTRACT

This study was conducted using soil samples randomly collected in commercial plantations of *Eucalyptus grandis* and of *E. grandis* x *E. urophylla* hybrids, at six different ages (3 to 84 months), in a 180-month-old seed orchard, and in a secondary forest of native vegetation, all areas belonging to CENIBRA Celulose Nipo-Brasileira S.A., MG. The objective of this work was to study the effects of tree harvest on soil nitrification and on other biochemical and microbiological processes. The activity of-glucosidase, phosphomonoesterases, ammonium content, and net ammonification and nitrification rates increased with vegetation age. The highest values were recorded for the native vegetation area and for a 3-year-old no-till *eucalyptus* stand. Nitrate content, on the other hand, showed an inverse relationship to stand age, as well as potential nitrification. Thirty-five physical, chemical, biochemical, and microbiological variables were analyzed by multivariate analysis for grouping the areas under study. The areas with younger trees were positioned farther away from the area with native vegetation, used as reference, and from a seven-year-old *eucalyptus* stand. Tree harvest and the subsequent planting of a new *eucalyptus* stand greatly disturbed the soil microbial community. The increase in stand age and the adoption of a more conservative soil management system, i.e., no-till, contributed to the reestablishment of the biochemical and microbiological conditions found in the area with native vegetation.

* Artigo extraído de Tese de Mestrado.

1. Professor Departamento de Microbiologia (DMB). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 36571-000. E-mail: totola@ufv.br.
2. Estudante de Mestrado em Microbiologia Agrícola DMB/UFV. Bolsista da Capes.

INTRODUÇÃO

O uso do solo para fins agrícolas ou florestais causa alterações no equilíbrio entre as inúmeras reações que mantêm a estabilidade dos ecossistemas naturais, com a concomitante redução da biodiversidade. Como consequência, há uma redução da eficiência com que os recursos são utilizados e ocorrem perdas da energia potencial acumulada na forma de material orgânico e de nutrientes.

Em plantios comerciais de eucalipto com a finalidade de extração de celulose, ocorre uma repetição de processos de sucessão vegetal, em intervalos regulares de aproximadamente cinco a sete anos. Durante esse período, as plantas em crescimento utilizam os nutrientes disponíveis no solo, além daqueles fornecidos por meio da fertilização e da mineralização da manta orgânica. Esse último processo é importante, pois diminui a demanda inicial por nutrientes adicionados como fertilizantes para o crescimento das árvores até o seu corte.

Na medida em que a mineralização da manta orgânica e de raízes repõe parte dos nutrientes exigidos para o crescimento das plantas, um novo estado de equilíbrio dinâmico tende a ser alcançada. Entretanto, ao final do ciclo, quando as árvores são abatidas, uma condição de forte desequilíbrio é estabelecida. Uma grande quantidade de material vegetal, constituído de folhas, de ramos, de galhos e de raízes, é depositada na área, ficando disponível para decomposição. Os nutrientes antes imobilizados, após a ação da microbiota, passam a fazer parte novamente da fração mineral do solo. Ao mesmo tempo, exceto pelo fato de que um estímulo temporário para um aumento da biomassa se estabelece, a demanda pelos nutrientes mineralizados é fortemente reduzida em decorrência da remoção da biomassa vegetal. Nessas condições, perdas significativas de elementos podem ocorrer, a exemplo do nitrogênio que, por apresentar um ciclo muito complexo, interage intensamente com a microbiota do solo e apresenta formas iônicas muito diversas (TATE, 2000).

A quantificação e a compreensão do comportamento das formas de nitrogênio no solo constituem uma das incógnitas nos estudos sobre o nitrogênio em plantios agrícolas ou florestais. As informações relacionadas

ao ciclo deste nutriente têm despertado o interesse de diferentes setores, especialmente quanto aos aspectos econômicos e ambientais. O estudo dos fluxos de nitrogênio em solos sob plantios comerciais de eucalipto, em diferentes idades do desenvolvimento dessa cultura, visa contribuir para o entendimento da dinâmica deste elemento em sistemas florestais sob condições edafoclimáticas brasileiras, permitindo a adoção de práticas que contribuam para minimizar a perda do elemento e os possíveis danos ambientais.

A passagem do nitrogênio da forma orgânica para a amoniacal, durante a decomposição da matéria orgânica, não parece afetar fortemente a conservação do elemento no solo, dada a baixa mobilidade dessa forma iônica. No entanto, a oxidação do amônio a nitrato traz como principal consequência a perda do nitrogênio, por ser essa forma mais móvel na solução do solo (BEGON et al., 1996).

A intensidade de nitrificação em solos florestais é variável, mas o processo parece ser pouco expressivo em solos com valores de pH menores que 4,0 (ALEXANDER, 1977; PERSSON & WIRÉN, 1995). Apesar do crescimento de culturas puras de bactérias nitrificantes em meio líquido ocorrer predominantemente em pH variando de neutro a alcalino, a nitrificação tem sido constatada em solos ácidos em pesquisas desde 1962 (PROSSER, 1989; Chaer & Tótolá, 2007), chegando a ser detectada em solos florestais em pH igual a 3,2 (FEDERER, 1983).

A maioria dos estudos sobre modelagem de indicadores de qualidade de solo sugere que, com o passar do tempo, cessada a intervenção, o ambiente tende a se recuperar e apresentar uma qualidade crescente (TRASAR-CEPEDA et al., 1998; MASCIANDARO & CECCANTI, 1999; Chaer & Tótolá, 2007). Neste trabalho, é demonstrado que o corte de uma floresta de eucalipto causa alterações substanciais na qualidade do solo, avaliada por meio de indicadores microbiológicos, bioquímicos, químicos e físicos, e que essas alterações promovem um aumento da atividade de nitrificação. Adicionalmente, demonstra-se que a qualidade dos solos tende a ser restabelecida com o aumento da idade da floresta e pode ser acelerada pela adoção de práticas de manejo mais conservadoras.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização das Áreas Estudadas

O trabalho foi conduzido com amostras de solos coletadas em áreas de plantios comerciais de *Eucalyptus grandis* e híbridos de *E. grandis* com *E. urophylla*, com idades variando de 3 a 84 meses, em um pomar de matrizes com 180 meses e em mata secundária de vegetação nativa, pertencentes à CENIBRA Celulose Nipo-Brasileira S.A., MG. Essas áreas estão localizadas entre as latitudes 19°05' 02,26S e 19°23' 51,59S e longitudes 42°19' 07,29W e 42°26' 46,88W. Informações adicionais sobre o histórico das áreas amostradas encontram-se no Quadro 1. O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, tropical chuvoso, clima de savana, com chuvas no verão e com inverno seco (VIANELLO & ALVES, 1991; OSAKI, 1994).

O controle de vegetação secundária nas áreas comerciais amostradas é feito por meio de capina química. O sistema de colheita é manual, com o uso de motosserras para o abate, seccionamento dos troncos e desgalhamento das árvores. Os solos estudados sob povoamentos de eucaliptos pertencem à classe Latossolo Vermelho Amarelo. É realizada a adubação no plantio, adicionando-se 100g da mistura N-P-K 5-25-10 por planta e a adubação de manutenção está descrita no Quadro 1.

Nas áreas sob plantações de eucalipto, o preparo do solo antes da reforma consistiu na queima dos restos vegetais em campo, seguida da abertura de covas, exceto para a área 3, onde a queimada não foi realizada. Na área 4 foi realizado o terraceamento e adotado o sistema de cultivo mínimo.

Quadro 1. Identificação das áreas estudadas, abrangendo solos sob eucaliptos em sete diferentes idades e de uma área com vegetação nativa adjacente, pertencentes à empresa CENIBRA Celulose Nipo-Brasileira S.A., MG.

Área	Idade do povoamento	Projeto	Declividade	Espécie	Espaçamento	Material Genético ⁽³⁾	Adubação de manutenção ⁽⁴⁾	Município
01	3 meses	Boa Vista IV	28%	<i>E. grandis</i>	3 x 2,5	C129	—	Naque
02	6 meses	Boa Vista IV	42%	<i>E. grandis</i>	3 x 2,5	C167	400 g por planta de fosfato reativo e 200 g por planta de KCl + B(0,5%)	Naque
03	12 meses	Macedônia	14%	Híbrido	4 x 2,5	C2156	150 g por planta de KCl	Ipaba
04	36 meses	Cantagalo	35%	<i>E. grandis</i>	3 x 2,7	C6	100 g N-P-K 10-10-20	Belo oriente
05	60 meses	Córrego Fundo	21%	<i>E. grandis</i>	3 x 3	Vários	100 g N-P-K 10-10-20	Periquito
06	84 meses	Fábrica	40%	<i>E. grandis</i>	3 x 2,7	C129	100 g N-P-K 10-10-20	Belo Oriente
07 ⁽¹⁾	180 meses	Macedônia	5%	Híbrido	3 x 2	Vários	100 g N-P-K 10-10-20	Ipaba
08 ⁽²⁾	mata nativa	Macedônia	13%	Nativas	-	-	-	Ipaba

- (1) Área que constitui pomar de matrizes, contendo híbridos de *E. grandis* com *E. urophylla*, usados para a obtenção de sementes.
- (2) Área contendo vegetação secundária, composta por espécies nativas, próxima aos plantios comerciais.
- (3) A identificação diz respeito ao clone usado naquele talhão.
- (4) Adubação realizada 1 ano após o plantio, com exceção para a área 2, cuja adubação foi feita aos 4 meses após o plantio.

A caracterização físico-química dos solos amostrados foi realizada no laboratório da própria empresa (Quadro 2), segundo metodologia adotada pelo próprio laboratório.

Quadro 2. Caracterização físico-química das amostras de solo de povoamentos de eucalipto com diferentes idades e de uma área com vegetação nativa adjacente às plantações.

Área	pH em Água	pH em KCl	Matéria Orgânica	P	K	Na	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al
	-----1:2,5-----		dag dm ⁻³	----- mg dm ⁻³ -----			----- cmolc dm ⁻³ -----			
1	4,50	4,02	2,24	2,16	23	2	0,12	0,05	1,36	6,66
2	4,78	4,15	1,80	1,60	21	2	0,85	0,07	0,61	4,23
3	4,47	3,82	2,10	4,48	44	2	0,73	0,18	1,29	7,53
4	5,16	4,52	2,41	0,96	77	3	2,87	0,80	0,03	3,82
5	5,37	4,45	2,45	2,37	47	1	1,74	0,65	0,24	4,04
6	5,51	4,55	2,20	7,67	30	5	3,52	0,55	0,12	3,13
7	5,46	4,59	2,84	1,68	100	7	3,25	0,97	0,07	3,50
8	5,89	5,20	3,99	2,59	144	3	4,34	1,50	0,02	2,59

Área	P orgânico	Soma Bases	CTC efetiva	CTC total	Saturação por bases	m	Zn	Cu	Fe	Mn
	-----%----	-----cmolc dm ⁻³ -----			----- %-----		----- mg dm ⁻³ -----			
1	0,0095	0,23	1,59	6,90	3	85	0,29	0,075	70	1,7
2	0,0131	0,99	1,59	5,21	19	38	0,44	0,778	61	4,2
3	0,0164	1,03	2,32	8,56	12	56	1,05	0,300	57	16,9
4	0,0218	3,88	3,91	7,70	50	1	4,50	3,648	30	283,6
5	0,0177	2,51	2,76	6,56	38	9	0,67	0,934	27	28,8
6	0,0203	4,17	4,28	7,30	57	3	2,22	0,749	19	97,1
7	0,0155	4,52	4,59	8,02	56	1	1,85	0,333	24	117,2
8	0,0254	6,22	6,24	8,81	71	0	4,99	0,958	8	120,4

Cont.

Quadro 2. (Cont.) Caracterização físico-química das amostras de solo de povoamentos de eucalipto com diferentes idades e de uma área com vegetação nativa adjacente às plantações.

Área	Areia			Silte	Argila	Argila dispersa em água	Grau de Floculação	Grau de Dispersão
	Grossa	Fina	Total					
	-----%-----							
1	32	9	41	7	52	41	20	80
2	23	11	34	6	60	51	15	85
3	21	14	35	5	60	51	16	84
4	5	5	10	21	69	56	19	81
5	25	15	40	9	51	36	31	69
6	27	14	41	13	46	34	27	73
7	23	16	39	7	53	42	21	79
8	14	11	25	9	66	46	31	69

- Fósforo, potássio, zinco, cobre e ferro foram extraídos com Mehlich-1.
- Cálcio, magnésio e alumínio trocáveis foram extraídos com KCl a 1 mol L⁻¹.
- Acidez potencial (H + Al) com CaOAc a 1mol L⁻¹ a pH 7,0.
- Matéria orgânica pelo método Walkey-Black.
- Fósforo orgânico foi determinado pelo método da ignição (ANDERSON e INGRAM, 1996).

Amostragem do Solo

A coleta das amostras de solo foi realizada nos dias 30 e 31 de março de 2000. A amostragem foi aleatória, retirando-se 10 amostras simples da camada de 0 a 20 cm para cada amostra composta. Em cada área, foram obtidas três amostras compostas. Essas amostras foram peneiradas no campo em peneira de 5mm, acondicionadas em sacos plásticos e mantidas sob refrigeração durante o transporte até o Laboratório de Biodiversidade e Biotecnologia para o Meio Ambiente, BIOAGRO, UFV, onde também foram mantidas sob refrigeração até a realização das análises.

Amonificação e Nitrificação Líquidas

As determinações das taxas de amonificação e de nitrificação líquidas foram realizadas segundo metodologia descrita por HART et al. (1994), incubando-se amostras de 5g de solo sob condições aeróbicas, no escuro, a 25 °C, durante 28 dias.

O teor de $N-NH_4^+$ foi medido pelo método colorimétrico (KEMPERS & ZWEERS, 1986). O teor de $N-NO_3^-$ foi avaliado segundo metodologia de determinação espectrofotométrica do nitrato em água (MULLIN & RILEY, 1955), com modificações propostas por CANTARUTI & PINHEIRO, não-publicado. Após a extração, foram colocados em tubos de ensaio 2 mL da amostra e os demais reagentes, na seguinte ordem: 1 mL de hidróxido de sódio a 0,3 mol L⁻¹; 0,5 mL de sulfato de cobre a $1,4 \times 10^{-4}$ mol L⁻¹; 1 mL de sulfato de hidrazina a $2,3 \times 10^{-3}$ mol L⁻¹ e 3,5 mL de cloreto de potássio a 1 mol L⁻¹.

Os tubos foram deixados em banho-maria a 80°C por 15 minutos e em seguida permaneceram em temperatura ambiente por 30 minutos para resfriamento. Adicionou-se, a seguir, 1 mL de solução de sulfanilamida a $2,9 \times 10^{-3}$ mol L⁻¹, os tubos foram agitados e, após cinco minutos, adicionou-se 1 mL de solução de N-1-Naftil Etilendiamino Bicloridrato a $1,2 \times 10^{-3}$ mol L⁻¹. Após 20 minutos, foi medida a absorvância da mistura em um espectrofotômetro com comprimento de onda ajustado para 540 nm. O cálculo da concentração de nitrato foi feito usando uma curva-padrão com a concentração variando de 0,02 a 2 mg L⁻¹ de $N-NO_3^-$.

A taxa de nitrificação líquida foi calculada segundo HART et al. (1994), pela diferença entre os teores de $N-NO_3^-$ no início da incubação e após os 28 dias de incubação das

amostras. A taxa de amonificação líquida foi determinada por meio da mesma diferença, considerando-se a soma dos teores de nitrato e de amônio.

Nitrificação Potencial

A nitrificação potencial foi estimada utilizando o método proposto por Belser & Mays (1980), descrito em HART et al. (1994). Amostras de solo foram incubadas em porções de 15g em frascos Erlenmeyer de 250mL, juntamente com 100 mL de uma solução contendo 1,5 mmol L⁻¹ de NH_4^+ e 1 mmol L⁻¹ de P, com cinco repetições por área. As amostras foram mantidas a 25°C sob agitação a 180 rpm, por 24 horas. Às 2, 4, 13, 22 e 24 horas após o início da agitação, foram retiradas alíquotas de cerca de 10 mL para a análise do teor de $N-NO_3^-$ (MULLIN & RILEY, 1955, modificado por CANTARUTI & PINHEIRO, não-publicado). A taxa de produção de nitrato foi calculada por meio da análise de regressão linear das concentrações de nitrato nos tempos de incubação.

Carbono da Biomassa Microbiana

O carbono da biomassa microbiana (CBM) foi determinado após tratamento do solo com irradiação por microondas (ISLAM & WEIL, 1998). Para cálculo do CBM utilizou-se um valor de KC igual a 0,213, que corresponde à fração do CBM extraído pela solução de K_2SO_4 a 0,5 mol L⁻¹ por este método.

Atividades Enzimáticas

A avaliação das atividades da μ -glicosidase (EIVAZI & TABATABAI, 1988) e das fosfomonoesterases ácida e alcalina (TABATABAI) foi baseada na determinação espectrofotométrica do p-nitrofenol liberado após incubação do solo com uma solução tamponada de p-nitrofenil fosfato (fosfatases) ou p-nitrofenil- μ -D-glicosídeo (μ -glicosidase) e tolueno, a 37° C, por 1 h. O p-nitrofenol liberado nas reações foi quantificado em espectrofotômetro a 400 nm. A determinação da atividade da urease foi baseada na quantificação do amônio (KEMPERS & ZWEERS, 1986) liberado após incubação das amostras de solo com uma solução de uréia (KANDELER & GERBER, 1988).

Análises Estatísticas

Os resultados das concentrações de nitrato, de amônio, de carbono da biomassa microbiana, da atividade das enzimas e das taxas de nitrificação e de amonificação líquidas foram submetidos à análise de variância.

A comparação entre cada área foi feita através da aplicação do teste de média de Tukey, baseado na amplitude total estudentizada, em nível de 5 % de probabilidade, utilizando o programa GENES - Versão Windows 5.0 (CRUZ, 1997).

Análise por Componentes Principais

A análise por componentes principais foi feita utilizando as médias das variáveis de cada área, incluindo as características físico-químicas.

As variáveis utilizadas nessa análise foram: CBM, fósforo orgânico, atividade das enzimas urease, fosfomonoesterases alcalina e ácida e μ -glicosidase, teor de nitrato e de amônio, taxa de nitrificação e de amonificação líquidas, pH (em água), matéria orgânica, teores de K, Mg, P, Na, Ca, Al, Zn, Cu, Fe e Mn, acidez potencial, soma de bases, CTC efetiva e CTC total, saturação por bases, saturação por alumínio (m) e as porcentagens de areia grossa, fina, total, silte e argila, argila dispersa em água e grau de floculação. O programa utilizado foi o STATISTICA (StatSoft, 1995).

Análise de Agrupamento

A determinação da distância multivariada (Distância Euclidiana Média) entre as médias dos valores das 35 variáveis anteriormente descritas foi utilizada para análise de diversidade e construção do dendrograma de agrupamento hierárquico (UPGMA) entre as áreas, utilizando os programas GENES (CRUZ, 1997) e STATISTICA (StatSoft, 1995).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teor de nitrato no solo diminuiu com o aumento da idade do plantio de eucalipto (Quadro 3). Comportamento inverso foi observado com relação ao teor de amônio, que aumentou com a idade do povoamento florestal (Quadro 3), com exceção da área 4 que, à semelhança da área 8, contendo vegetação nativa, apresentou teor de amônio mais elevado.

A variação dos teores de nitrato e de amônio em solos coletados sob povoamentos de eucalipto e sob vegetação nativa (Quadro 3) apresentou um comportamento semelhante ao relatado por RICE & PANCHOLY (1972, 1973), que sugeriram que a

nitrificação é inibida em estádios sucessionais mais avançados. Segundo esses autores, o acúmulo preferencial de nitrogênio na forma amoniacal ao longo da sucessão resulta em conservação do elemento e de energia.

Os autores postularam que a atividade de microrganismos nitrificantes parece ser de algum modo influenciada negativamente por substância(s) exsudada(s) pela vegetação presente em comunidades clímax, principalmente taninos (RICE & PANCHOLY, 1973) ou outras substâncias potencialmente inibidoras de Nitrosomonas, como os compostos fenólicos e flavonóides (RICE & PANCHOLY, 1974) e os monoterpenos (PAAVOLAINEN et al., 1998).

Quadro 3. Teor de nitrato e amônio em amostras de solo de povoamentos de eucalipto com diferentes idades e de uma área com vegetação nativa adjacente.

Áreas	Idade do Plantio	Nitrato ($\mu\text{g g solo}^{-1}$)	Amônio ($\mu\text{g g solo}^{-1}$)
1	3 meses	3,96 a	0,74 d
2	6 meses	1,75 b	2,89 c
3	1 ano	1,30 bc	5,01 b
4	3 anos	1,44 bc	12,63 a
5	5 anos	0,32 d	4,16 bc
6	7 anos	0,85 cd	3,37 bc
7	15 anos	0,76 cd	4,72 bc
8	Floresta nativa	0,62 cd	12,24 a

Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey, em nível de 5 % de probabilidade.

A taxa de amonificação variou entre 0,177 e 0,763 g g solo⁻¹ dia⁻¹ e também aumentou com a idade do plantio, exceto para a área 7, que contém árvores matrizes (Quadro 4). Essa área com pomar de árvores matrizes possui um espaçamento maior do que as áreas com plantios comerciais.

Além disso, o desenvolvimento de sub-bosque é controlado por meio de capina química e a manta orgânica é freqüentemente removida. Esse manejo implica em uma menor deposição de material orgânico, o que parece ter contribuído para a baixa atividade de mineralização do nitrogênio observada nesse local.

Os aumentos das taxas de nitrificação e de amonificação com o aumento da idade do povoamento de eucalipto foram também descritos nos trabalhos realizados por ROBERTSON & VITOUSEK (1981) e por ROBERTSON (1982), utilizando solos sob diferentes tipos de vegetação em Indiana, EUA. Observa-se, assim, uma relação direta entre a sucessão da vegetação e o aumento no teor de amônio do solo e na taxa de amonificação líquida, independentemente do tipo de vegetação encontrada no local.

Contrariamente ao observado para o teor de nitrato encontrado no momento da coleta dos solos (Quadro 3), a taxa de nitrificação líquida foi mais elevada nas áreas mais velhas e na área com vegetação nativa (Quadro 4). Com relação a essa característica, os solos sob plantios de eucaliptos puderam ser separados em dois grupos: um grupo abrangendo as áreas de 3 meses a 1 ano, que apresentaram valores negligenciáveis de nitrificação líquida, distinto de outro grupo, constituído de áreas contendo plantios com idade acima de 3 anos até a área contendo árvores matrizes.

ROBERTSON & VITOUSEK (1981) questionaram se os teores de nitrato e de amônio detectados em coleta

única refletiriam as taxas de produção desses íons no solo. Segundo esses autores, a incubação dos solos em laboratório, sob condições de temperatura e de umidade semelhantes às encontradas no local de coleta, poderia fornecer uma melhor estimativa das taxas de produção de nitrato e de amônio. Assim como os resultados obtidos neste experimento com os solos incubados (Quadro 4), não foi observada a diminuição na taxa de nitrificação ao longo do avanço do estágio de sucessão da vegetação no trabalho realizado por aqueles autores. Após o ajuste das equações de regressão entre o teor de nitrato e o tempo de incubação de amostras dos solos com solução de amônio e fosfato, foi calculada a taxa de nitrificação potencial, considerando-se que não há restrição de substrato para o processo (Quadro 4).

A taxa de nitrificação potencial, que segundo HART et al. (1994) pode ser usada como uma estimativa do tamanho da população de microrganismos nitrificantes, foi mais elevada na área 1, com o solo sob plantio comercial aos 3 meses de idade. Os menores valores de nitrificação potencial foram observados nas áreas 5 e 6, com plantios de eucalipto aos 5 e aos 7 anos de idade (Quadro 4).

Quadro 4. Taxas de nitrificação e de amonificação líquidas, equações de regressão linear ajustadas e taxa de nitrificação potencial em amostras de solo de povoamentos de eucalipto com diferentes idades e de uma área com vegetação nativa adjacente.

Área	Nitrificação Líquida	Amonificação Líquida	Equação de regressão	R ²	Nitrificação Potencial
	$\mu\text{g g solo}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ de N-NO_3^-	$\mu\text{g g solo}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ de N-NH_4^+			$\mu\text{g g solo}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ de N-NO_3^-
1	0,001 d	0,185 e	$Y = 0,0746x + 2,5685$	0,81	1,789
2	0,018 d	0,177 e	$Y = 0,0372x + 1,2308$	0,69	0,894
3	0,097 cd	0,236 de	$Y = 0,0416x + 1,7320$	0,80	0,999
4	0,462 b	0,462 bc	$Y = 0,0425x + 1,1112$	0,73	1,022
5	0,414 b	0,504 b	$Y = 0,0262x + 1,1842$	0,94	0,629
6	0,303 bc	0,763 a	$Y = 0,0278x + 0,3811$	0,44	0,668
7	0,346 b	0,346 cd	n.d. (1)	n.d.	n.d.
8	0,680 a	0,680 a	n.d.	n.d.	n.d.

(1) n.d. = não determinado.

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey, em nível de 5 % de probabilidade.

ROBERTSON & VITOUSEK (1981) e ROBERTSON (1982) sugeriram que a taxa de formação de nitrato está diretamente ligada à taxa de mineralização, visto que essa atividade fornece substrato para aquela. A relação direta entre o teor de amônio e as taxas de amonificação e de nitrificação líquidas com o estágio sucessional da vegetação estudada e a relação inversa com o teor de nitrato encontrado nos solos estudados, refletem um ciclo do nitrogênio mais conservativo (MYROLD, 1999). Isto se dá não pelo fato de que a nitrificação é diminuída com o avanço do estágio sucessional, mas sim porque parece estar havendo uma maior imobilização do nitrato pela vegetação. Isto, por fim, conserva o elemento nitrogênio no sistema, que na forma nítrica é de grande mobilidade.

A taxa de produção de nitrato correlacionou-se positivamente ($p < 0,01$, $r = 0,895$) com o pH dos solos estudados. Apesar da nitrificação em campo ter sido detectada em solos ácidos em várias pesquisas (FEDERER, 1983; KREITINGER et al., 1985; PROSSER, 1989; VAN MIEGROET & JOHNSON, 1993; MYROLD, 1999; Chaer & Tótolá, 2007), a taxa de nitrificação é consistentemente maior em solos com pH próximo à neutralidade (SAHRAWAT, 1982), sendo intensificada quando se faz a correção do pH, sob diferentes tipos de vegetação (ROBERTSON, 1982; SILVA et al., 1994; RUDEBECK & PERSSON, 1998).

A taxa de nitrificação líquida igualou-se à de amonificação em três das áreas estudadas, a saber: área 4, contendo eucalipto aos 3 anos; área 7, referente ao pomar de matrizes e a área 8, que contém vegetação nativa (Quadro 4), indicando que a nitrificação nessas áreas é limitada pela disponibilidade de substrato. De fato, pelos dados de nitrificação potencial (Quadro 4), pode-se inferir que o fator limitante para o processo da nitrificação na área 4 tenha sido a disponibilidade do substrato amônio.

Nessa área, a taxa de nitrificação potencial, que é tida como uma estimativa do tamanho da população de nitrificantes, foi consideravelmente maior que a taxa de nitrificação líquida. Taxas de nitrificação potencial semelhantes ou maiores que esta foram encontradas nas áreas 1, 2 e 3. Porém, nessas áreas, verificaram-se baixas taxas de amonificação e menores taxas de nitrificação líquida, em contraste com a alta

nitrificação potencial. Aparentemente, as populações de nitrificantes estão sendo inibidas por outro fator que não a disponibilidade de substrato, a exemplo do pH que, nessas áreas, encontra-se em torno de 4,5, os menores valores dentre as áreas estudadas (Quadro 1).

A nitrificação potencial diminuiu com o avanço da idade do plantio (Quadro 4). As áreas 5 e 6 apresentaram acidez menos acentuada do que aquela encontrada nas áreas mais jovens (Quadro 1) e, aparentemente, a redução da nitrificação não foi causada pela escassez de substrato, já que a taxa de amonificação líquida foi superior à taxa de nitrificação líquida (Quadro 4). Nessas áreas, portanto, a limitação imposta à nitrificação parece ser de natureza aleloquímica. Os plantios de eucalipto apresentam queda de serrapilheira em torno de $5,5 \text{ ton ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ após os 5 anos de idade, a qual mantém-se constante até a idade de 9 anos (NEVES, 2000). O eucalipto é reconhecidamente rico em tanino, que se distribui nas folhas, frutos, sementes e, em maior concentração, no cerne e na casca (MORI, 2000) e o tanino é um inibidor potencial do processo de nitrificação (RICE & PANCHOLY, 1973).

As atividades das enzimas μ -glicosidase e das fosfomonoesterases ácida e alcalina apresentaram o mesmo padrão de comportamento, principalmente nas áreas contendo plantios mais jovens (de 3 meses a 1 ano), que não diferiram entre si (Quadro 5). As atividades das enzimas ligadas aos ciclos do carbono (μ -glicosidases) e do fósforo (fosfomonoesterases) foram mais elevadas nas áreas com povoamentos mais velhos. Essa tendência não foi observada, contudo, para a área 4, com povoamento aos 3 anos, que apresentou os valores mais elevados dentre as áreas com eucalipto e próximos aos observados na área 8, que possui vegetação nativa. A atividade da enzima urease apresentou diferenças significativas entre as áreas mais jovens, não mostrando relação com a idade do plantio. O CBM, embora seja uma pequena fração do carbono orgânico total (menor que 5 %) do solo, é um indicador sensível de qualidade do solo (KENNEDY & PAPPENDICK, 1995; Tótolá & Chaer, 2002; Chaer & Tótolá, 2007) e não variou significativamente nas áreas sob cultivo de eucalipto com diferentes idades, com exceção da área 5, em que o CBM foi mais baixo (Quadro 5). A área 8, contendo vegetação nativa, apresentou o maior conteúdo de CBM.

Quadro 5. Carbono da biomassa microbiana (CBM) e atividade das enzimas μ -glicosidase, urease, fosfomonoesterases ácida e alcalina em amostras de solo de povoamentos de eucalipto com diferentes idades e de uma área com vegetação nativa adjacente.

Área	Carbono (CBM)	μ -glicosidase*	Urease**	Fosfatase Ácida***	Fosfatase Alcalina***
1	2280,88 b	0,5423 d	0,7053 c	3,6681 d	0,4164 e
2	2138,05 b	0,5007 d	0,5729 cd	3,6141 d	0,5321 e
3	2302,31 b	0,4935 d	0,2612 ef	3,5397 d	0,3276 e
4	1309,15 bc	1,0982 b	1,4673 a	7,0544 a	1,9077 b
5	773,17 c	0,8133 c	0,4017 de	5,6771 b	1,0970 d
6	1953,74 bc	0,7168 c	0,4137 de	4,3978 c	1,0913 d
7	2344,04 b	1,1848 b	0,1684 f	5,3448 b	1,3449 c
8	4976,57 a	1,5197 a	1,0027 b	7,6293 a	2,5410 a

(*) Valores em $\mu\text{mol p-nitrofenol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

(**) Valores em $\mu\text{mol de amônio g}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

(***) Valores em $\text{nmol p-nitrofenol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste de Tukey, em nível de 5 % de probabilidade.

A fim de melhor comparar as áreas estudadas, utilizouse a análise por componentes principais (ACP). Essa ferramenta estatística permite a conversão de um conjunto de variáveis de um espaço n-dimensional em um espaço bi ou tri dimensional (CRUZ & REGAZZI, 1994). Os dados obtidos neste trabalho, incluindo os resultados das análises físico-químicas, foram analisados por meio da ACP, totalizando 35 variáveis que explicaram 77 % da variação total (Quadro 6).

Quadro 6. Autovalores associados às 35 variáveis analisadas por componentes principais.

Componente	Autovalor	% Variação Total	Autovalor Acumulado	% Acumulada
1	19,88	56,81	19,88	56,81
2	7,05	20,13	26,93	76,94

A distribuição gráfica das áreas analisadas por componentes principais permitiu visualizar a semelhança entre as áreas (Figura 1). A área 4, contendo eucalipto com 3 anos de idade, foi a que se situou mais próxima da área usada como referência de um solo conservado, área 8, a que contém vegetação nativa. A análise da distribuição gráfica dos escores considerando o componente principal 1, que explica a maior parte da variação (Quadro 6), mostra que as áreas com solo sob cultivo de eucalipto aproximaram-

se da área de referência em ordem crescente de idade do plantio, com exceção da área 4 (Figura 1), onde foi adotado o cultivo mínimo para preparo do solo.

Pôde-se caracterizar um grupo mais afastado abrangendo as áreas mais jovens (3 meses, 6 meses e 1 ano), depreendendo-se que se tratavam de áreas com maior grau de distúrbio, comparativamente à área de referência. Outro grupo, formando um conjunto menos distante da área tida como referência, compreende as áreas de 11 anos (matrizes), de 7 e de 5 anos, indicando que, à medida que a idade da floresta aumenta, o equilíbrio dinâmico, inerente ao processo de sucessão, tende a se restabelecer (Figura 1).

Por permitir uma melhor visualização do agrupamento entre as diferentes áreas estudadas, foi feita outra análise multivariada utilizando o método de agrupamento hierárquico (UPGMA). O dendrograma construído a partir da análise das 35 variáveis (Figura 2) mostra similaridade com a dispersão gráfica obtida a partir da análise por componentes principais (Figura 1), evidenciando um grupo compreendendo as áreas mais jovens, áreas 1, 2 e 3; outro grupo contendo as áreas 5, 6 e de matrizes e a área 4, onde foi utilizado um preparo de solo considerado mais conservador, formando um grupo com a área que contém vegetação nativa. A menor distância encontrada foi 0,74 entre as áreas 2 e 3, mostrando a semelhança que existe entre as áreas que possuem idades

muito próximas (respectivamente, 6 e 12 meses) e a sensibilidade do método de comparação baseado nos indicadores descritos. Por outro lado, a maior distância foi encontrada entre a área 1 e a área com vegetação

nativa, 2,24, o que demonstra que a retirada da floresta e posterior implantação de um novo povoamento altera consideravelmente a qualidade do solo.

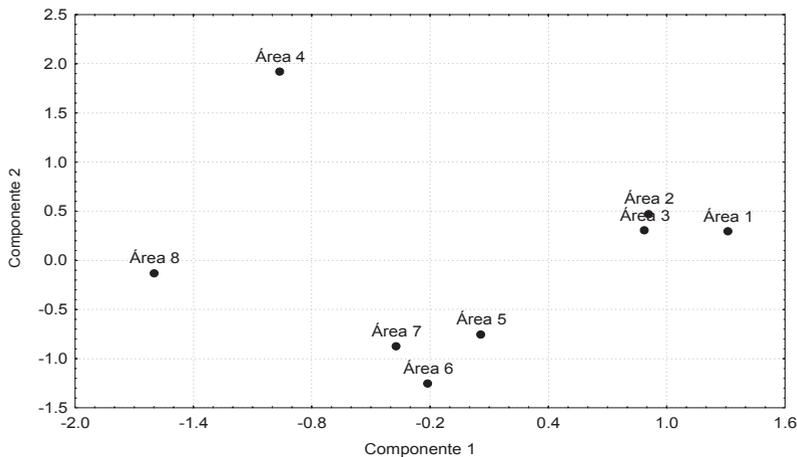


Figura 1. Dispersão dos escores de 8 áreas, sendo sete delas com povoamentos de eucalipto e uma com vegetação nativa, em relação a dois componentes principais, tendo como base 35 variáveis físicas, químicas e microbiológicas dos solos.

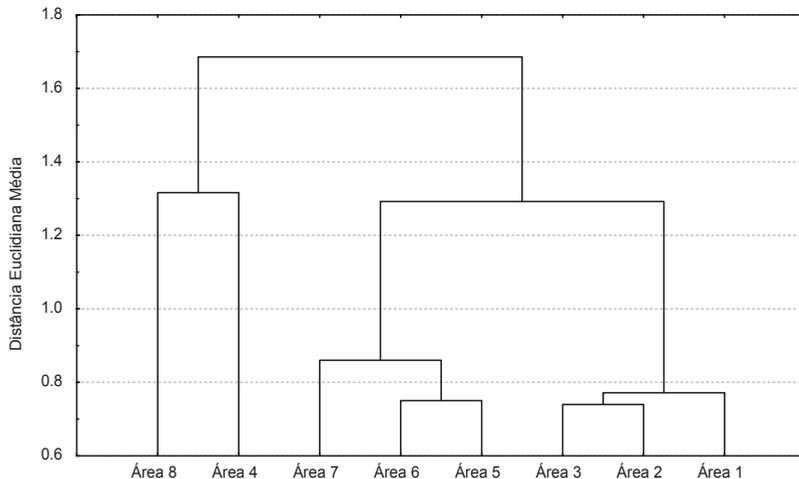


Figura 2. Dendrograma de agrupamento construído pelo método UPGMA, a partir da matriz quadrada de distâncias Euclidianas médias das áreas estudadas, utilizando 35 variáveis físicas, químicas e microbiológicas dos solos.

O cultivo mínimo é uma forma de preparo que favorece a conservação do solo, sendo, portanto, considerado como mais sustentável a longo prazo pois, entre outras coisas, contribui para a manutenção do estoque de nutrientes e de energia no sistema (GATTO, 2000). A

área 4, com eucalipto aos três anos de idade, é a única área em que o cultivo mínimo foi empregado. Essa área caracterizava-se pela presença de um sub-bosque acentuado que, além de oferecer maior proteção às variações de temperatura e de umidade, proporciona

maior diversidade biológica. Autores sugerem que a vegetação pode induzir mudanças no solo (STE-MARIE & PARE, 1999); assim, uma maior diversidade de espécies na área onde o crescimento de sub-bosque é favorecido, em contraste com os plantios das outras áreas sob eucalipto, propicia uma condição de maior conservação do solo e das relações bióticas, fato este refletido na maioria das análises.

O conjunto dos resultados mostra que o corte das árvores e a implantação de novo povoamento de eucalipto causaram um distúrbio acentuado no solo. Ademais, confirmou-se a premissa de que o cultivo mínimo favorece o restabelecimento das propriedades relacionadas com a qualidade e o equilíbrio dinâmico do solo presentes no solo sob vegetação natural. Tomando-se uma área com vegetação nativa como referência, pode-se inferir que a qualidade e possivelmente a estabilidade do solo aumentam conforme aumenta a idade do povoamento florestal, a menos que outros fatores de manejo, como observado para a área onde se adotou o cultivo mínimo, imponham mudanças significativas na seqüência de eventos do processo de sucessão local.

CONCLUSÕES

- O teor de amônio nos solos sob plantações de eucalipto está diretamente relacionado com a sucessão da vegetação, assim como as taxas de amonificação e de nitrificação líquidas e as atividades das enzimas ligadas aos ciclos do fósforo e do carbono.
- O corte das árvores e a implantação de um povoamento de eucalipto causam distúrbio na comunidade microbiana do solo, mas essa alteração não favorece o acúmulo de nitroto. Um novo estado de equilíbrio se restabelece e tende a retornar a uma condição presente em solos com vegetação nativa com o avanço da idade do povoamento.
- Em áreas mais jovens, o fator limitante para o processo de nitrificação líquida foi o baixo pH dos solos, ao passo que nos solos das áreas com mata nativa, com árvores matrizes e com eucalipto aos 3 anos de idade, a disponibilidade de substrato limitou a taxa de nitrificação líquida.

- A nitrificação potencial diminuiu com o aumento da idade dos povoamentos. Nessas áreas, a limitação imposta à nitrificação parece ser de natureza aleloquímica.
- Os indicadores de qualidade do solo utilizados nesse trabalho mostraram-se adequados para agrupar as áreas sob cultivo de eucalipto, de acordo com sua semelhança, em relação a uma área de vegetação nativa usada como referência.
- O avanço da idade dos povoamentos de eucalipto, assim como a utilização do cultivo mínimo, contribuíram para restabelecer valores dos indicadores mais próximos aos observados na área com vegetação nativa.

REFERÊNCIAS

- Alexander, M.** 1977. Introduction to soil microbiology. 2.ed. Cornell University; John Wiley & Sons. 467p.
- Begon, M.; Harper, J. L. R.; Townsend,** 1996. C.R. Ecology: individuals, populations and communities. 3.ed. Oxford: Blackwell Science, 1068p.
- Chaer, G.M. & Tótola, M.R.** 2007. Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma de plantios de eucalipto sobre indicadores de qualidade do solo. *Rev. Bras. Ciên. Solo*. v.31, n.6, p.1381-1396.
- Cruz, C.D.** 1997. Programa GENES - aplicativo computacional em genética e estatística. Viçosa, MG: UFV, 442 p.
- Cruz, C.D. & Regazzi, A.J.** 1994. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Viçosa, MG: UFV, 394p.
- Eivazi, F.; Tabatabai, M.A.** 1988. Glucosidases and galactosidases in soils. *Soil Biol. Biochem.*, v.20, n.5, p.601-606.
- Federer, C.A.** 1983. Nitrogen mineralization and nitrification: depth variation in four New England forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v.47, n.5, p.1008-1014.

- Gatto, A.** 2000. Manejo do solo em áreas de reforma de floresta de eucalipto e seus reflexos na produtividade. Viçosa: UFV, 2000. 62p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa.
- Hart, S.C.; Stark, J. M.; Davidson, E.A.; Firestone, M.K.** 1994. Nitrogen Mineralization, Immobilization and Nitrification. In: WEAVER, R.W.; ANGLE, S.; BOTTOMLEY, P.; BESDICEK, D.; SMITH S.; TABATABAI A.; WOLLUM A. **Methods of Soil Analysis, Part 2. Microbiological and Biochemical Properties.** Madison, Wisconsin: **Soil Sci. Soc. of America.** p. 985-1016.
- Islam, K.R. & Weil, R.R.** 1998. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biol. Fert. Soils**, v.27, n.4, p. 408-416.
- Kandeler, E. & Gerber, H.** 1988. Short term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. **Biol. Fert. Soil.**, v.6, n.1, p. 68-72.
- Kempers, A.J. & Zweepers, A.** 1986. Ammonium determination in soils extracts by the salicylate methods. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, v.17, n.07, p.715-723.
- Kennedy, A.C. & Papendick, R.I.** 1995. Microbial characteristics of soil quality. **J. Soil Water Conserv**, v.50, n.3, p. 243-248.