

Atributos Físicos, Químicos e Biológicos de um Latossolo de Cerrado sob Plantio de Espécies Florestais



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 256

Atributos Físicos, Químicos e Biológicos de um Latossolo de Cerrado sob Plantio de Espécies Florestais

*Luciana Gomes da Silva
Ieda de Carvalho Mendes
Fábio Bueno Reis Junior
Marcelo Ferreira Fernandes
José Teodoro de Melo
Eiyti Kato*

Embrapa Cerrados
Planaltina, DF
2009

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina, DF

Fone: (61) 3388-9898

Fax: (61) 3388-9879

<http://www.cpac.embrapa.br>

sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *Fernando Antônio Macena da Silva*

Secretária-Executiva: *Marina de Fátima Vilela*

Secretária: *Maria Edilva Nogueira*

Supervisão editorial: *Jussara Flores de Oliveira Arbués*

Equipe de revisão: *Francisca Eljani do Nascimento*

Jussara Flores de Oliveira Arbués

Assistente de revisão: *Elizelva de Carvalho Menezes*

Normalização bibliográfica: *Paloma Guimarães Correa de Oliveira*

Editoração eletrônica: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Capa: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Foto(s) da capa: *Luciana Gomes da Silva*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Souza*

Alexandre Moreira Veloso

1ª edição

1ª impressão (2009): tiragem 100 exemplares

Edição online (2009)

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Cerrados

4882 Atributos físicos, químicos e biológicos de um latossolo de Cerrado sob plantio de espécies florestais / Luciana Gomes Silva... [et al.]. – Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2009.

22 p. – (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Cerrados, ISSN 1676-918X, ISSN online 2176-509X ; 256).

1. Cerrado. 2. *Eucalyptus grandis*. 3. *Pinus tecunumanii*. 4. Qualidade do solo. I. Silva, Luciana G. II. Série.

583.766 - CDD 21

© Embrapa 2009

Sumário

Resumo	5
Abstract.....	6
Introdução.....	7
Material e Métodos.....	8
Caracterização das áreas estudadas	8
Amostragem de solo e métodos analíticos	9
Análises estatísticas	10
Resultados e Discussão.....	11
Atributos físicos e químicos.....	11
Atributos biológicos	14
Qualidade do solo	16
Conclusões.....	19
Agradecimentos	20
Referências	20

Atributos Físicos, Químicos e Biológicos de um Latossolo de Cerrado sob Plantio de Espécies Florestais

Luciana Gomes Silva¹; Ieda de Carvalho Mendes²; Fábio Bueno Reis Junior³; Marcelo Ferreira Fernandes⁴; José Teodoro de Melo⁵; Eiyti Kato⁶

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto de plantios florestais nos atributos de um Latossolo Vermelho-Amarelo de Cerrado. Amostras de solo foram coletadas (0 cm a 10 cm de profundidade) em áreas cultivadas há mais de 20 anos com pinus (*Pinus tecunumanii*), eucalipto (*Eucalyptus grandis*) ou carvoeiro (*Sclerobium paniculatum*). Uma área adjacente sob Cerrado nativo foi incluída como referência do solo original. Aumentos na densidade do solo foram observados sob pinus e eucalipto. Sob pinus, observaram-se ainda reduções na macroporosidade. Os teores de matéria orgânica foram menores sob pinus e eucalipto do que sob Cerrado. Os cultivos com pinus e carvoeiro promoveram decréscimos no pH e na saturação por bases e incremento da saturação por alumínio. Diferentemente, a saturação por bases aumentou e a acidez do solo não foi significativamente alterada sob eucalipto. O carbono da biomassa microbiana sob pinus, eucalipto e carvoeiro foi aproximadamente a metade do sob Cerrado. Atividades de fosfatase ácida e arilsulfatase foram inibidas pelo pinus e estimuladas pelo carvoeiro. Entre os reflorestamentos avaliados, o pinus promoveu a redução mais acentuada da qualidade do solo de Cerrado. As variáveis microbiológicas foram as mais sensíveis em detectar o efeito dos diferentes reflorestamentos sobre a qualidade do solo.

Termos para indexação: carbono da biomassa microbiana, enzimas do solo, *Eucalyptus grandis*, *Pinus tecunumanii*, *Sclerobium paniculatum*, qualidade do solo.

¹ Engenheira Agrônoma, Mestrando da Faculdade de Agronomia e Veterinária – UnB, Caixa Postal 04508, CEP 70910-970, Brasília, DF, luciana.silva@conab.gov.br

² Engenheira Agrônoma, Ph.D., Pesquisadora da Embrapa Cerrados, mendesi@cpac.embrapa.br

³ Engenheiro Agrônomo, Ph.D., Pesquisador da Embrapa Cerrados, fabio@cpac.embrapa.br

⁴ Engenheiro Agrônomo, Ph.D., Embrapa Tabuleiros Costeiros. Av. Beira Mar 3250, CEP 49025-040, Aracaju, SE, marcelo@cpac.embrapa.br

⁵ Engenheiro Florestal, D.Sc., Pesquisador da Embrapa Cerrados, teodoro@cpac.embrapa.br

⁶ Engenheiro Agrônomo, D.Sc., Professor da Faculdade de Agronomia e Veterinária – UnB, kato@unb.br

Physical, Chemical and Biological Attributes of a Cerrado Oxisol under Different Forest Species

Abstract

*The objective of this study was to evaluate the impact of forest plantations on physical, chemical and microbiological attributes of a Cerrado Oxisol. Soil samples were collected (0 cm to 10 cm depth) on sites grown with pinus (*Pinus tecunumanii*), eucalyptus (*Eucalyptus grandis*) and carvoeiro (*Sclerolobium paniculatum*) over 20 years. An adjacent native Cerrado area was used as a reference of the original soil conditions. Increases in soil density were observed under pinus and eucalyptus. Reductions in macroporosity also occurred at the pinus sites. Soil organic matter contents were lower under pinus and eucalyptus than under Cerrado. Pinus and carvoeiro plantations decreased soil pH and base saturation, and increased the aluminum saturation. On the other hand, base saturation increased and pH was not significantly affected under eucalyptus. Soil microbial biomass carbon under the pinus, eucalyptus and carvoeiro sites was about half of that found under Cerrado. The activities of acid phosphatase and arylsulfatase were inhibited by pinus and stimulated by carvoeiro. Among the forest systems evaluated pinus promoted the greatest reduction on soil quality. The microbiological variables were the most sensitive to detect the effects of these systems on soil quality.*

*Index terms: microbial biomass carbon, soil enzymes, *Eucalyptus grandis*, *Pinus tecunumanii*, *Sclerolobium paniculatum*, soil quality.*

Introdução

O Brasil situa-se entre os dez países com maiores áreas de florestas plantadas do mundo. Essa área é estimada em 5,74 milhões de hectares, dos quais cerca de 90 % são constituídos por eucalipto e pinus (SOCIEDADE..., 2007). Esses reflorestamentos apresentam rápido crescimento, excelente produtividade e custos de implantação/manutenção em declínio (JUVENAL; MATTOS, 2002).

Em virtude de as condições edafoclimáticas e fisiográficas da região do Cerrado serem favoráveis ao estabelecimento de plantios de eucalipto e pinus, nas décadas de 1970 e 1980, esses reflorestamentos tiveram uma expansão acelerada nessa região (JUVENAL; MATTOS, 2002). Com a perspectiva de aumento da demanda mundial por celulose e madeira certificada, a possibilidade da expansão de sistemas integrados lavoura-pecuária-floresta e considerando que projetos florestais são uma das estratégias para sequestro de carbono no âmbito dos mecanismos de desenvolvimento limpo, é crescente a demanda por tecnologias voltadas a atividades sustentáveis da produção florestal e de estudos sobre os impactos dessa atividade no meio-ambiente.

Por estarem mais diretamente associados à produtividade das plantas, até recentemente apenas os atributos químicos e físicos do solo eram considerados para avaliar os impactos e a capacidade produtiva das áreas destinadas à produção florestal (SCHOENHOLTZ et al., 2000). Contudo, a crescente valorização dos serviços ambientais proporcionados pelos sistemas florestais, tais como a ciclagem de nutrientes, o armazenamento de carbono e o reaproveitamento de resíduos urbanos e industriais, tem estimulado a inclusão dos atributos biológicos do solo entre os parâmetros que avaliam a adoção de práticas sustentáveis de manejo florestal e de seus impactos ao meio-ambiente (BARETTA et al., 2005; CHAER; TÓTOLA, 2007).

Como o conhecimento do funcionamento biológico e da ecologia microbiana dos solos brasileiros ainda apresenta muitas lacunas, a existência de três plantios adjacentes de espécies florestais, com mais de 20 anos de idade, constituiu-se numa oportunidade única para avaliar

o impacto de plantios de eucalipto, pinus e carvoeiro nos atributos, físicos, químicos e biológicos de um Latossolo de Cerrado, objetivo deste trabalho.

Material e Métodos

Caracterização das áreas estudadas

O estudo foi conduzido em um Latossolo Vermelho-Amarelo, textura argilosa (61 % de argila, 15 % de silte, 4 % de areia fina e 20 % de areia grossa), em áreas experimentais da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF (15° 35' 30"S e 47° 42' 00"W, altitude de 1.175 m). O clima é do tipo tropical estacional (Aw), conforme classificação de Köppen, com precipitação média de 1.500 mm, concentrada entre outubro e março.

Os sistemas avaliados foram os reflorestamentos de pinus (*Pinus tecunumanii*), com 21 anos (espaçamento 3,0 m x 3,0 m); de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) com 24 anos (espaçamento 3,0 m x 2,0 m) e de carvoeiro (*Sclerolobium paniculatum* Vogel), espécie de leguminosa nativa do Cerrado, com 21 anos (espaçamento 3,0 m x 2,0 m). Para o estabelecimento desses plantios, a vegetação original de Cerrado foi removida e o solo foi gradeado. A adubação foi realizada em covas apenas no plantio. O eucalipto foi adubado com 40 g de sulfato de amônio, 60 g de superfosfato triplo, 20 g de cloreto de potássio, 2 g de sulfato de zinco, 3 g de bórax e 500 g de calcário dolomítico; o pinus, com 100 g de superfosfato simples, 40 g de cloreto de potássio 3 g de bórax e 2 g de sulfato de zinco; e o carvoeiro, com 120 gramas por cova da fórmula 4-30-16 + Zn. Nas três áreas, não houve corte das espécies florestais. Por ocasião da amostragem de solo, as plantas apresentavam um diâmetro médio na altura do peito de 93 cm, 102 cm e 54 cm, nos plantios de pinus, eucalipto e carvoeiro, respectivamente. Para fins de amostragem, os reflorestamentos foram subdivididos em três parcelas de 30 m x 40 m na plantação de pinus; de 15 m x 15 m na de eucalipto; e de 6 m x 50 m na de carvoeiro. Os dados apresentados constituem as médias dessas três parcelas. Como referência das condições originais do solo, foi utilizada uma área adjacente sob vegetação nativa do tipo Cerrado sensu stricto, que também foi subdividida em três parcelas de 30 m x 40 m.

Amostragem de solo e métodos analíticos

A coleta do solo foi realizada em março de 2006 (período chuvoso). As camadas de serapilheira e húmus apresentavam espessuras médias em torno de 7,8 cm; 2,7 cm; e 6,3 cm nos plantios de pinus, eucalipto e carvoeiro, e foram removidas antes da coleta do solo, realizada na profundidade de 0 cm a 10 cm.

As determinações de densidade e porosidade do solo (EMBRAPA, 1997) foram realizadas em amostras indeformadas (duas subamostras por parcela). A porosidade total foi estimada a partir do volume de água do solo saturado (0 kPa). A macroporosidade e a microporosidade foram determinadas pelo método da mesa de tensão, sendo o volume de macroporos correspondente à massa de água retida entre 0 e -6 kPa e o de microporos à retida a tensões inferiores a -6 kPa.

Amostras deformadas foram retiradas para as análises dos atributos químicos e biológicos (10 subamostras, por parcela, para compor uma amostra composta), homogeneizadas e passadas por uma peneira de malha de 4 mm. Resíduos de plantas e raízes foram removidos cuidadosamente. As amostras de solo foram armazenadas entre 7 °C e 10 °C, até o momento da realização dos ensaios.

Após secagem ao ar, as amostras de solo foram analisadas quanto às variáveis químicas: pH em água, matéria orgânica e teores de P, Ca, Mg, K, e Al. Os teores de matéria orgânica foram determinados pelo método de Walkley & Black (NELSON; SOMMERS, 1982). Ca, Mg e Al foram extraídos com KCl 1N e determinados por absorção atômica (Ca e Mg) e titulação com NaOH 0,025 M (Al); P e K foram extraídos com o extrator Mehlich-1 e determinados por espectrofotometria de ionização de chama (K) e pelo método do azul de Mo (P), conforme descrito em Embrapa (1997).

O método CFE, clorofórmio fumigação-extração, foi utilizado para as análises de carbono da biomassa microbiana (CBM). Após a coleta, o teor de água das amostras de solo (20 g) foi elevado a 95 % da capacidade de campo e estas foram pré-incubadas, no escuro, por sete

dias, à temperatura ambiente. Em seguida, metade das amostras foi fumigada por 48 horas com clorofórmio livre de álcool. Durante esse período, as amostras não-fumigadas foram mantidas à temperatura ambiente. O CBM foi extraído conforme descrito por Vance et al. (1987), usando um fator de correção (Kec) igual a 0,35. O quociente microbiano (qMic) expressa a percentagem do carbono microbiano em relação ao carbono orgânico total do solo e foi calculado da seguinte forma: $(CBM / Corg) \times 100$, utilizando os valores do CBM e de C orgânico expressos em mg. O carbono orgânico do solo (Corg) foi calculado pela divisão do teor de matéria orgânica por 1,724 (NELSON; SOMMERS, 1982).

As atividades das enzimas do solo associadas ao ciclo do carbono (β -glicosidase), do fósforo (fosfatase ácida) e do enxofre (arilsulfatase) foram avaliadas de acordo com Tabatabai (1994).

Análises estatísticas

A comparação dos dados foi feita com o teste não-paramétrico de Wilcoxon ($P < 0,1$).

Para visualizar as semelhanças entre os tratamentos com base na análise conjunta das variáveis, os sistemas florestais foram ordenados pela técnica de análise de componentes principais (ACP), utilizando-se uma matriz de variância-covariância. Nessa análise, foram incluídas as variáveis: densidade de solo, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, matéria orgânica, CTC, pH, saturação por alumínio, CBM, fosfatase ácida, β -glicosidase e arilsulfatase. Dada a inclusão de variáveis que refletem diversos processos do funcionamento dos solos, diferenças na ordenação das amostras foram interpretadas como mudanças promovidas pelas coberturas vegetais sobre a qualidade geral do solo. Previamente à ACP, os dados de cada variável foram relativizados pelos respectivos valores máximos encontrados nas amostras. Essa transformação teve por objetivo cancelar o efeito de diferenças na magnitude das unidades das variáveis sobre a ordenação. O número de componentes principais (CPs) significativos foi selecionado comparando-se os autovalores reais aos autovalores

“broken-stick” de cada CP (JACKSON, 1993). Esse procedimento assegura que apenas CPs com mais informação do que a esperada ao acaso sejam interpretados. As variáveis associadas aos CPs foram identificadas pela correlação de Pearson entre os escores das amostras na ordenação e os valores dessas variáveis. Para comparar a sensibilidade das variáveis edáficas em separar as coberturas vegetais, essas variáveis foram ordenadas no espaço das amostras de solo pelo procedimento de “reciprocal averaging” (HILL, 1973).

Resultados e Discussão

Atributos físicos e químicos

Verificaram-se, em relação à vegetação nativa, aumentos na densidade do solo nos plantios de eucalipto e pinus, sendo que, no plantio de pinus, também houve redução da macroporosidade, acompanhada de aumento na microporosidade (Tabela 1). Resultados similares foram observados por Behera e Sahani (2003) numa plantação de eucalipto na Índia. Aumentos de densidade do solo em superfície sob sistemas florestais podem estar relacionados ao tempo de utilização da área, arquitetura do sistema radicular, pouca cobertura do solo durante o período inicial de crescimento das plantas, trânsito de máquinas e implementos agrícolas e condições de umidade do solo quando do seu preparo e plantio das mudas (COSTA et al., 2003).

Tabela 1. Propriedades físicas dos solos à profundidade de 0 cm a 10 cm.

	Densidade do solo	Microporos	Macroporos	Porosidade
	g cm ⁻³%.....		
Eucalipto	0,91 a ⁽¹⁾	32,2 b	31,8 a	64,7 b
Carvoeiro	0,77 b	41,0 a	30,0 ab	71,0 a
Pinus	0,87 a	40,8 a	26,2 b	67,0 ab
Cerrado	0,78 b	35,8 ab	34,8 a	70,7 a

¹ Valores seguidos por letras iguais, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Wilcoxon ($p < 0,10$).

Nos plantios de pinus e eucalipto, ocorreram reduções significativas nos teores de matéria orgânica, em relação à área de Cerrado (Tabela 2). Resultados semelhantes têm sido reportados na literatura (FONSECA

et al., 1993; ZINN et al, 2002; BEHERA; SAHANI, 2003) e estão associados à oxidação biológica da matéria orgânica original do solo causada pelo seu preparo e cultivo, ao declínio inicial da produção de serapilheira e às mudanças em sua composição qualitativa que ocorrem nos plantios florestais. Diferentemente do observado na área sob pinus e eucalipto, o teor de matéria orgânica no plantio de carvoeiro não diferiu da área de Cerrado. Embora a quantidade de serapilheira retornada ao solo nos três sistemas florestais não tenha sido avaliada, esse resultado pode estar relacionado à quantidade e à qualidade dos resíduos vegetais retornados ao solo por essa leguminosa. Garay et al. (2003), ao compararem os teores de matéria orgânica em plantios de eucalipto e da leguminosa *Acacia mangium*, no Espírito Santo, verificaram que o maior estoque de serapilheira no plantio de acácia (10 t ha⁻¹, em comparação a 5 t ha⁻¹ no plantio de eucalipto), aliado à sua menor relação C/N, resultaram em maior incorporação de matéria orgânica ao solo. Binkley e Giardina (1997) também reportaram aumentos nos teores de matéria orgânica e N total em plantios de leguminosas florestais. O efeito inibitório do N sobre as taxas de decomposição da matéria orgânica e a respiração microbiana do solo foi reportado por Fog (1998) e Fernandes (2006), que sugeriram que o maior aporte desse nutriente ao solo pode resultar em maior conservação do C orgânico.

Tabela 2. Propriedades químicas¹ dos solos na profundidade de 0 cm a 10 cm.

	Matéria Orgânica	pH H ₂ O	m	P	K	Ca	Mg	CTC	V
	g kg ⁻¹		%	mg dm ⁻³			cmol _c dm ⁻³		%
Eucalipto	29 b ⁽²⁾	4,86 a	60 b	0,7	157 a	0,47 a	0,55 a	11,2 a	13 a
Carvoeiro	42 a	4,57 b	72 a	0,4	34 c	0,16 b	0,21 b	9,7 ab	4 b
Pinus	30 b	4,48 b	70 a	0,7	14 d	0,16 b	0,18 b	8,6 b	4 b
Cerrado	39 a	4,91a	49 b	0,5	49 b	0,34 a	0,32 ab	9,6 ab	8 ab

¹m = saturação por alumínio = 100[Al³⁺ / (Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Al³⁺)]; CTC = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + H⁺ + Al³⁺; e V(%) = saturação por bases = 100[(Ca²⁺ + Mg²⁺ + K) / CTC].

² Valores seguidos por letras iguais, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Wilcoxon (p < 0,10).

Em relação ao Cerrado nativo, nas áreas sob pinus e carvoeiro houve reduções no pH e nos teores de K, Ca e Mg, acompanhados de um

aumento médio de 40 % na saturação por Al (m%) (Tabela 2). Embora a saturação por bases (V%) do solo sob pinus e carvoeiro não tenha diferido significativamente da do Cerrado, o valor médio dessa variável sob esses dois reflorestamentos foi cerca de metade da observada sob a vegetação nativa. Decréscimos de pH e nos teores de bases e incrementos nas concentrações de Al extraível em plantações de pinus, comparativamente a pastagens, têm sido relatados em diferentes solos da Austrália e Nova Zelândia (GIDDENS et al., 1997; SAGGAR et al., 2001). A liberação de ácidos orgânicos por acículas em decomposição e a maior absorção de cátions do que ânions têm sido reportados como possíveis causas da acidificação dos solos sob pinus (GIDDENS et al., 1997). Ademais, em plantios dessa espécie florestal, o acúmulo das acículas na superfície do solo promove a retenção de quantidades consideráveis de nutrientes na serapilheira, alterando o equilíbrio do sistema solo-planta (CHAVES; CORRÊA, 2005). Assim como ocorrido sob carvoeiro, no presente estudo, decréscimos no pH do solo e nos teores de bases têm sido reportados em áreas cultivadas com outras leguminosas arbóreas, como *Albizia* (RHOADES; BINKLEY 1996) e *Acacia mangium* (YAMASHITA et al., 2008), comparativamente a áreas dominadas por espécies não-leguminosas.

Em relação ao Cerrado, o plantio de eucalipto promoveu um acréscimo no teor de K (Tabela 2), conforme também verificado por Fonseca et al. (1993) e Gama-Rodrigues et al. (2008 b). Os teores de Ca, Mg e a saturação por bases não diferiram em relação ao Cerrado nativo, porém foram superiores aos dos plantios de carvoeiro e pinus (Tabela 2). Uma vez que os três plantios (pinus, eucalipto e carvoeiro) foram adubados somente quando da sua implantação e não houve replantio, esses resultados podem ser atribuídos à absorção de nutrientes pelo eucalipto nas camadas mais profundas do solo e seu retorno via decomposição da serapilheira. Na Austrália, Noble e Randall (2005) verificaram que o retorno de nutrientes na forma de serapilheira de *E. cloeziana* aumentou os teores de Ca, Mg, K e Na no solo, enquanto Zaia e Gama-Rodrigues (2004) verificaram, em estudos conduzidos no norte fluminense, que o *E. grandis*, devido aos seus menores teores de lignina, possuiu taxas mais elevadas de decomposição de serapilheira, possibilitando uma maior taxa de ciclagem de nutrientes. Entretanto, cabe destacar que

existe na literatura grande variação de resultados quanto aos efeitos promovidos por reflorestamentos de eucalipto, nos atributos químicos do solo (CHAER; TÓTOLA, 2007; GAMA-RODRIGUES et al., 2008a). Diferenças de clima, solo, espécies plantadas, ecossistema nativo usado como referência e manejo das áreas reflorestadas tornam a generalização desses efeitos inadequada.

Os teores de P não variaram significativamente entre as quatro áreas avaliadas, resultado também verificado por Fonseca et al. (1993), em solos sob eucalipto.

Atributos biológicos

Nos três plantios de espécies florestais, ocorreram reduções no CBM e no qMic, em relação ao solo sob vegetação nativa (Tabela 3), conforme também observado por Behera; Sahani (2003), Chaer e Tótola (2007) e Gama-Rodrigues et al. (2008a). Mesmo após mais de 20 anos do estabelecimento desses sistemas, os níveis de biomassa microbiana não atingiram os patamares observados nas áreas sob vegetação nativa. Além dos efeitos associados à remoção da vegetação nativa e preparo do solo por ocasião do estabelecimento desses plantios, as reduções no CBM também refletem as alterações relacionadas à quantidade e à qualidade dos resíduos vegetais disponíveis à microbiota sob os sistemas florestais (GAMA-RODRIGUES et al., 2008a).

Embora os teores de matéria orgânica no Cerrado nativo e no plantio de carvoeiro tenham sido semelhantes, este último apresentou um teor de CBM inferior ao do Cerrado nativo. Como o CBM é considerado um indicador sensível das mudanças que ocorrem no solo, esse resultado confirma observações anteriores de que nem sempre esses dois parâmetros estão correlacionados (MARCHIORI-JUNIOR; MELO, 2000). Além disso, a redução do qMic nos três sistemas florestais (Tabela 3) também indica uma menor eficiência relativa da microbiota estabelecida sob essas áreas em converter os resíduos orgânicos do solo em biomassa, comparativamente àquela presente no solo sob Cerrado nativo. A ocorrência de efeitos antimicrobianos relacionados às folhas de eucalipto (MAHAKUR; BEHERA, 1999) e às acículas do pinus (NSABIMANA et al., 2004) tem sido relatada na literatura e poderia

reduzir o crescimento microbiano, ainda que os recursos para esse fim fossem abundantes. Alguns estudos têm sugerido que, sob condições de estresse ambiental (nutricional, térmico, hídrico), os microrganismos derivam uma maior porção dos recursos energéticos disponíveis no sistema para manter mecanismos celulares de convivência com as condições estressantes (maior custo de manutenção) em detrimento do crescimento da biomassa (SCHIMEL et al., 2007). De fato, correlações positivas foram encontradas entre qMic e as variáveis pH ($P < 0,001$; $r = 0,74$) e macroporosidade ($P < 0,05$; $r = 0,59$), ao passo que correlação negativa foi observada entre essa relação e a saturação de alumínio (m) ($P < 0,001$; $r = -0,79$). Esses resultados corroboram a hipótese de que fatores de estresses ambientais de naturezas físicas e químicas contribuem para o controle da eficiência de comunidades microbianas em converter os recursos energéticos em biomassa.

Tabela 3. Propriedades biológicas dos solos na profundidade de 0 cm a 10 cm ⁽¹⁾.

	CBM	qMic	Fosfatase Ácida	Arilsulfatase	β -glicosidase
	mg C kg ⁻¹	μ g <i>p</i> -nitrofenol g ⁻¹ h ⁻¹
Eucalipto	183 b	1,07 b	1118 b	79 b	85 a
Carvoeiro	223 b	0,92 b	1452 a	113 a	71 ab
Pinus	169 b	0,95 b	541 c	33 c	69 b
Cerrado	453 a	2,00 a	1171 b	83 b	76 ab

⁽¹⁾ Valores seguidos pelas mesmas letras, nas colunas, não diferem entre si pelo teste de Wilcoxon ($p < 0,10$).

Os menores níveis de atividade enzimática (fosfatase ácida, arilsulfatase e β -glicosidase) foram observados no solo sob pinus, embora as três áreas sob plantios de espécies florestais tenham apresentado teores semelhantes de CBM (Tabela 3). Nsabimana et al. (2004) também observaram baixos níveis de atividade enzimática numa área sob pinus na África do Sul e atribuíram esse resultado aos efeitos inibitórios exercidos por compostos fenólicos presentes nas acículas. Por outro lado, o carvoeiro apresentou as maiores atividades de fosfatase ácida e arilsulfatase. Como esse plantio também apresentou um teor elevado de matéria orgânica, esse resultado sugere uma maior dependência do carvoeiro, com relação à atividade dessas enzimas, para a ciclagem do P e S orgânico. Considerando-se que a atividade das enzimas é

medida sob condições ótimas de pH, temperatura, disponibilidade de substrato e umidade (atividade potencial), pode-se afirmar ainda que as alterações no perfil da atividade enzimática do solo nos plantios de pinus e carvoeiro também refletem as mudanças na estrutura funcional (taxonômica e/ou fisiológica) da microbiota entre as áreas. Os níveis de atividade enzimática da área sob eucalipto não diferiram dos obtidos na área sob Cerrado.

Qualidade do solo

O resultado da análise de componentes principais (ACP) é apresentado na Fig. 1, que representa a distribuição dos sistemas florestais avaliados de acordo com as similaridades nos atributos dos solos considerados na matriz primária. Aproximadamente 97 % da variabilidade dos dados originais foi representada em um gráfico de duas dimensões, sendo cerca de 61 % dessa variabilidade associada ao componente principal 1 (CP1), e 36 %, ao componente principal 2 (CP2). Os demais CP não contribuíram significativamente para explicar a variação dos dados originais.

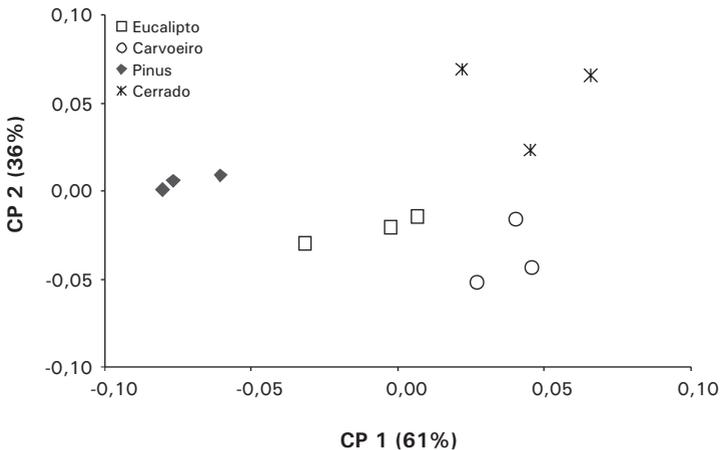


Fig. 1. Análise de componentes principais (ACP) representando a distribuição das coberturas florestais, de acordo com as similaridades nas propriedades dos solos consideradas na matriz primária. A fração da variabilidade dos dados originais representada por cada um dos componentes principais (CP) é indicada entre parênteses nos eixos da figura.

A análise conjunta dos atributos de solo foi capaz de discriminar claramente todos os tipos de coberturas vegetais investigados (Fig. 1). Essa separação foi observada principalmente ao longo do CP1 e se deu de acordo com a sequência: pinus < eucalipto < carvoeiro = cerrado. É interessante notar que esse CP foi correlacionado a diversas variáveis de naturezas físicas, químicas e biológicas (Tabela 4). Essas correlações foram positivas com a atividade de fosfatase ácida e arilsulfatase, matéria orgânica, CBM, macroporosidade e porosidade total, e negativas com a densidade do solo. Com base nessas observações, é possível sugerir a ocorrência de um gradiente crescente de qualidade do solo, da esquerda para a direita do CP1, sendo o pinus a cobertura florestal que promoveu a redução mais acentuada dessa qualidade.

O CP2 foi correlacionado positivamente com o CBM e negativamente com a saturação por Al (m%) (Tabela 4). Devido aos seus maiores valores de CBM e menores de saturação por alumínio, o Cerrado nativo também formou um agrupamento distinto dos reflorestamentos, ao longo desse CP (Fig. 1).

Tabela 4. Coeficientes de correlação de Pearson entre os atributos químicos, físicos e microbiológicos e os componentes principais 1 e 2.

Variáveis	Coeficientes de Pearson	
	Componente 1	Componente 2
CBM	0,664 ** ⁽¹⁾	0,824 **
Fosfatase ácida	0,903 **	-0,240 ns
Arilsulfatase	0,875 **	-0,351 ns
β- glicosidase	0,246 ns	-0,017 ns
Matéria orgânica	0,783 **	0,056 ns
CTC	0,326 ns	-0,316 ns
pH	0,485 ns	0,426 ns
Saturação por Al (m%)	-0,415 ns	-0,663 **
Densidade do solo	-0,701 **	-0,165 ns
Microporosidade	-0,237 ns	-0,206 ns
Macroporosidade	0,660 **	0,196 ns
Porosidade	0,644 **	0,352 ns

⁽¹⁾ **: significativo a 1% de probabilidade, ns: não significativo a 5% de probabilidade.

A análise multivariada empregada possibilitou ainda a ordenação das variáveis edáficas no espaço das amostras de solo (Fig. 2), a qual foi determinada pela técnica do “reciprocal averaging”. De acordo com essa estratégia, variáveis localizadas a maiores distâncias da origem da ordenação (coordenada 0,0) apresentam maior sensibilidade para a separação das amostras.

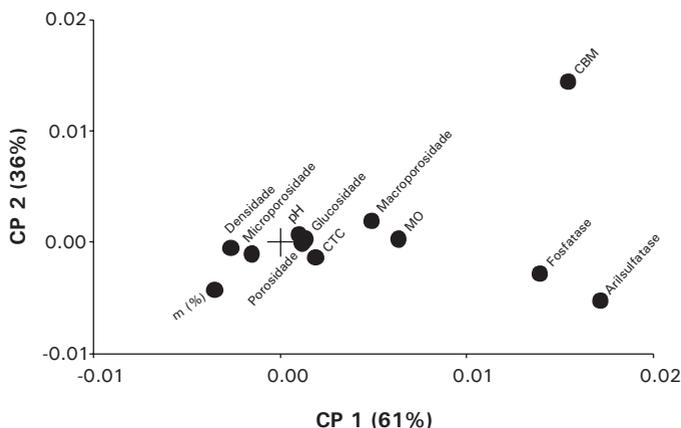


Fig. 2. Ordenação das variáveis edáficas no espaço das amostras de solo, determinada pelo procedimento de “reciprocal averaging”. A distância Euclidiana das variáveis até a origem (coordenada 0,0; indicada por +) é proporcional à sensibilidade das mesmas em separar as amostras de solo de acordo com a ACP da Fig. 1.

Observou-se que, com exceção da β -glicosidase, os demais atributos microbiológicos (CBM, fosfatase ácida e arilsulfatase) apresentaram sensibilidade destacada em relação aos atributos físicos e químicos para diferenciar os sistemas avaliados, reforçando a importância da inclusão desses atributos nos estudos de impacto ambiental e de avaliação da qualidade de solo. Ao avaliarem os efeitos do monocultivo de pinus nos atributos biológicos do solo, Baretta et al. (2005) também observaram que o CBM foi o atributo que mais contribuiu para aferir a dissimilaridade entre diferentes coberturas florestais.

É importante ressaltar que os atributos biológicos utilizados no presente estudo (biomassa microbiana e atividade enzimática) são refletidos em

vários aspectos do funcionamento do solo e foram correlacionados ao CP1 juntamente com variáveis químicas e físicas de grande importância para a qualidade do solo, como matéria orgânica, densidade, macroporosidade e porosidade total do solo (Tabela 4). Além da alta sensibilidade e da capacidade de refletir aspectos do funcionamento do solo, essas variáveis satisfazem ainda outros critérios para um bom indicador de qualidade do solo, tais como a determinação analítica simples e barata e a distribuição universal.

Por estarem em contato direto com os resíduos vegetais, as camadas mais superficiais do solo geralmente irão repercutir com mais intensidade os impactos das mudanças na quantidade e qualidade desses resíduos que ocorrem em função do estabelecimento de diferentes coberturas florestais (SAGGAR et al., 2001). No presente estudo, as alterações nos atributos físicos, químicos e biológicos na camada de 0 cm a 10 cm indicam que, passados mais de 20 anos desde o estabelecimento das coberturas florestais, um novo equilíbrio foi estabelecido no solo e que o funcionamento do solo, nessas áreas, é diferenciado em relação ao solo sob vegetação nativa. As consequências dessas alterações, principalmente aquelas relacionadas às perdas do CBM, sobre a produção e sustentabilidade dos sistemas florestais deverão ser objeto de estudos futuros.

Conclusões

O reflorestamento com carvoeiro apresenta maior capacidade de preservação das propriedades físicas e do teor de matéria orgânica do solo de Cerrado, comparativamente ao com eucalipto ou pinus.

Entre os reflorestamentos estudados, o plantio com eucalipto promove a manutenção dos maiores teores de bases e resulta em menor acidez do solo de Cerrado.

A substituição do Cerrado nativo por reflorestamentos com pinus, eucalipto ou carvoeiro resulta em queda acentuada do C da biomassa microbiana e da relação entre esta variável e o C orgânico (qMic).

A atividade potencial de enzimas envolvidas na ciclagem de formas orgânicas de fósforo (fosfatase ácida) e enxofre (arilsulfatase) do solo é estimulada pelo carvoeiro e inibida pelo pinus, comparativamente à cobertura de Cerrado original.

O plantio de pinus apresenta os maiores impactos negativos sobre a qualidade geral do solo de Cerrado, entre os reflorestamentos investigados.

Com exceção da enzima β -glucosidade, os demais atributos microbiológicos investigados (CBM, arilsulfatase e fosfatase ácida) são mais sensíveis para diferenciar solos de Cerrado sob diferentes coberturas vegetais do que os atributos de naturezas físicas e químicas.

Agradecimentos

Ao técnico agrícola Osmar Teago de Oliveira e aos funcionários do laboratório de Microbiologia do Solo da Embrapa Cerrados Maria das Dores Silva e Clodoaldo Alves de Sousa, pela valiosa contribuição na condução dos trabalhos. Iêda Carvalho Mendes, Fabio Bueno Reis Junior e Marcelo Fernandes agradecem ao auxílio de bolsas e financiamento de projetos pelo CNPq.

Referências

BARETTA, D.; SANTOS, J. C. P; FIGUEIREDO, S. R.; KLAUBERG-FILHO, O. Efeito do monocultivo de *Pinus* e da queima do campo nativo em atributos biológicos do solo no Planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 715-724, 2005.

BEHERA, N.; SAHANI, U. Soil microbial biomass and activity in response to *Eucalyptus* plantation and natural regeneration on tropical soil. **Forest Ecology and Management**, v. 174, p. 1-11, 2003.

BINKLEY, D.; GIARDINA, C. Nitrogen fixation in tropical forest plantations. In: NAMBIAR, E. K. S.; BROWN, A. G. (Ed). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Camberra: ACIAR, 1997, p. 297-337.

CHAER, G. M.; TÓTOLA, M. R. Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma de plantios de eucalipto sobre indicadores de qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1381-1396, 2007.

CHAVES, R. Q.; CORREA, G. F. Macronutrientes no sistema solo *Pinus caribaea* morelet em plantios apresentando amarelecimento das acículas e morte de plantas. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 691-700, 2005.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um latossolo bruno afetada pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 527-535, 2003.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997, 212 p.

FERNANDES, M. F. **Fatty acid profiling of soil microbial communities: a comparison of extraction methods and temporal dynamics in plant residue amended soils**. 2006. 154 f. Tese (Ph.D.) – Oregon State University, Corvallis, Oregon, E.U.A. Disponível em: <<http://ir.library.oregonstate.edu/dspace/bitstream/1957/2694/1/Marcelo%20Fernandes%202006%20PhD.pdf>>. Acesso em: 19 jan. 2007.

FOG, K. The effect of added nitrogen on rate of decomposition of organic matter. **Biological Reviews**, v. 63, p. 433-462, 1988.

FONSECA, S.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. P.; COSTA, L. M.; LEAL, P. G. L.; NEVES, J. C. L. Alterações em um latossolo sob eucalipto, mata natural e pastagem: I. propriedades físicas e químicas. **Revista Árvore**, v. 17, n. 3, p. 271-288, 1993.

GAMA-RODRIGUES, E. F.; BARROS, N. F.; VIANA, A. P.; SANTOS, G. A. Alterações na biomassa e na atividade microbiana da serapilheira e do solo, em decorrência da substituição de cobertura florestal nativa por plantações de eucalipto, em diferentes sítios da região do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1489-1499, 2008a.

GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C. PAULINO, G. M.; FRANCO, A. A. Atributos químicos e microbianos de solos sob diferentes coberturas vegetais no norte do estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1521-1530, 2008b.

GARAY, I.; KINDEL, A.; CARNEIRO, R.; FRANCO, A.; BARROS, E.; ABBADIE, L. Comparação da matéria orgânica e de outros atributos do solo entre plantações de *Acacia mangium* e *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 705-712, 2003.

GIDDENS, K. M.; PARFITT, R. L.; PERCIVAL, H. J. Comparison of some soil properties under *Pinus radiata* and improved pasture. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 40, p. 409-416, 1997.

HILL, M. O. Reciprocal averaging; an eigenvector method of ordination. **Journal of Ecology**, v. 61, p. 237-249, 1973.

JACKSON, D. A. Stopping rules in principal components analysis: a comparison of heuristical and statistical approaches. **Ecology**, v. 74, p. 2204-2214, 1993.

JUVENAL, T. L.; MATTOS, R. L. G. **O setor florestal no Brasil e a importância do reflorestamento**. Rio de Janeiro: Setor Florestal. BNDES Setorial, n. 16, p. 3-30, 2002.

MAHAKUR, D.; BEHERA, N. Decomposition of *Eucalyptus* leaf litter in field conditions. **Ecology Environment and Conservation**, v. 5, n. 1, p. 65-68, 1999.

MARCHIORI JUNIOR, M.; MELO, W. J. Alterações na matéria orgânica e na biomassa microbiana em solo de mata natural e submetido a diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 6, p. 1177-1182, 2000.

NSABIMANA, D.; HAYNES, R.; WALLIS, F. Size, activity and catabolic diversity of the soil microbial biomass as affected by land use. **Applied Soil Ecology**, v. 26, n. 2, p. 81-92, 2004.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. (Ed.) **Methods of soil analysis: part 2: chemical and microbiological properties**. Madison: SSSA and ASA, 1982. p. 539-580.

NOBLE, A. D.; RANDALL, P. J. The impact of trees and fodder shrubs on soil acidification. **Rural Industries Research and Development Corporation**. p. 1-76, 2005.

RHOADES, C.; BINKLEY, D. Factors influencing decline in soil pH in hawaiian *Eucalyptus* and *Albizia* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 80, p. 47-56, 1996.

SAGGAR, S.; HEDLEY, C. B.; SALT, G. J. Soil microbial biomass, metabolic quotient, and carbon and nitrogen mineralization in 25-years-old *Pinus radiata* agroforestry regimes. **Australian Journal of Soil Research**, v. 39, p. 491-504, 2001.

SCHIMMEL, J.; BALSER, T. C.; WALLENSTEIN, M. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function. **Ecology**, v. 88, p. 1386-1394, 2007.

SCHOENHOLTZ, S. H.; MIEGROET, H. V.; BURGER, J. A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, v. 138, p. 335-356, 2000.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA - SBS. **Fatos e números do Brasil florestal**. 2007. 109 p.

TABATABAI, A. Soil enzymes. In: WEAVER, R. W.; ANGLE, J. S.; BOTTOMLEY, P. S. (Ed.). **Methods of soil analyses: part 2: microbiological and biochemical properties**. 2nd ed. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, 1994. p. 775-833.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 19, p. 703-707, 1987.

YAMASHITA, N.; OHTA, S.; HARDJONO, A. Soil changes induced by *Acacia mangium* plantation establishment: comparison with secondary forest and *Imperata cylindrical* grassland soils in South Sumatra, Indonesia. **Forest Ecology and Management**, v. 254, p. 362-370, 2008.

ZAIA, F. C.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Ciclagem e balanço de nutrientes em povoamentos de eucalipto na região norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 843-852, 2004.

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