

# CARBONO ORGÂNICO, NITROGÊNIO TOTAL, BIOMASSA E ATIVIDADE MICROBIANA DO SOLO EM DUAS CRONOSSEQUÊNCIAS DE REABILITAÇÃO APÓS A MINERAÇÃO DE BAUXITA<sup>(1)</sup>

Marco Aurélio Carbone Carneiro<sup>(2)</sup>, José Oswaldo Siqueira<sup>(3)</sup>,  
Fátima Maria de Souza Moreira<sup>(3)</sup> & André Luis Lima Soares<sup>(4)</sup>

## RESUMO

A mineração é uma das atividades antrópicas que causa grande impacto nos ecossistemas e o grau de degradação depende da intensidade de interferência no solo, do volume explorado e do rejeito produzido. Os microrganismos do solo e sua atividade, por participarem de funções-chave, podem fornecer indicações sobre o real estado de reabilitação de áreas mineradas. O objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto da atividade de mineração em duas cronossequências com diferentes estratégias (revegetação) de reabilitação em solos de área de mineração de bauxita sobre diversos atributos: C de compostos orgânicos (CO), N total do solo (Nt), biomassa microbiana, atividade enzimática e respiração do solo. O estudo foi desenvolvido em áreas pertencentes a Alcoa S/A, em dois ambientes distintos: (a) em áreas com vegetação típica de campo, predominantemente herbácea, em altitude inferior a 1.000 m, e (b) em áreas de montanhas, no topo do planalto, incluindo remanescentes de cobertura vegetal nativa representada por floresta subtropical subcaducifólia, a uma altitude de 1.600 m, denominadas serra, com características diferenciadas quanto à estratégia e ao tempo de reabilitação, variando de áreas recém-mineradas à áreas com 19 anos de reabilitação. Coletaram-se amostras compostas com três repetições em oito áreas no campo e nove na serra, em duas profundidades (0–10 e 10–20 cm), no inverno e verão. A mineração de bauxita provocou grande impacto nos atributos estudados, causando reduções

---

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentado ao Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – UFLA. Projeto financiado pelo convênio FAEPE/ALCOA e pela FAPEMIG. Recebido para publicação em janeiro de 2003 e aprovado em novembro de 2007.

<sup>(2)</sup> Professor adjunto da Universidade Federal Goiás – UFG. Campus de Jataí/Laboratório de Solos, Rod. BR 364, km 192, CEP 75800-000 Jataí (GO). E-mail: carbonecarneiro@yahoo.com.br

<sup>(3)</sup> Professores Titular e Adjunto do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras – DCS/UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). Bolsistas do CNPq. E-mail: siqueira@ufla.br; fmoreira@ufla.br

<sup>(4)</sup> Bolsista de iniciação científica, PIBIC. DCS/UFLA - Lab. de Microbiologia do Solo. Bolsista do CNPq. E-mail: andre.sinop@ibest.com.br, atualmente Engenheiro Agrônomo MSc, consultor técnico-comercial para a Agrichem do Brasil LTDA. andrellsoares@hotmail.com

nos seus valores de até 99 %. Tanto no campo como na serra, os teores de CO, de Nt, a biomassa microbiana e a atividade enzimática aumentaram com as diferentes estratégias de reabilitação. Entretanto a resposta dos atributos estudados foi diferenciada em função do tempo de reabilitação. A biomassa microbiana e a atividade enzimática apresentaram recuperação muito rápida, atingindo valores semelhantes aos das áreas de referência a partir do primeiro ano, enquanto para o CO e o Nt estes só foram alcançados de modo consistente em períodos mais longos de reabilitação (18 anos). O coeficiente metabólico ( $qCO_2$ ) foi indicativo do estresse provocado pela mineração, mas não diferenciou os diferentes tempos de reabilitação. Os resultados deste estudo mostram que os atributos essenciais ao funcionamento adequado do solo são recuperáveis pela revegetação.

**Termos de indexação:** solo degradado, atributos biológicos, solos de mineração, recuperação de áreas degradadas.

#### **SUMMARY: SOIL ORGANIC CARBON, TOTAL NITROGEN, MICROBIAL BIOMASS AND ACTIVITY IN TWO REHABILITATION CHRONOSEQUENCES AFTER BAUXITE MINING**

*Mining is a human activity with a harsh impact on ecosystems. The degradation degree depends on the intensity of soil impact, exploited soil volume and amount of mine spoil. Soil microbial activities are responsible for key functions in ecosystems and can indicate the degree of rehabilitation of mined areas. The purpose of this study was to evaluate the impact of bauxite mining in two chronosequences with different rehabilitation strategies (revegetation) on the following soil attributes: organic carbon (C org), total nitrogen (Nt), microbial biomass and respiration, and enzymatic activities. The study was developed in mining areas owned by Alcoa S/A in two different environments: (a) areas originally covered by a tropical prairie vegetation called "campo", at elevations up to 1,000 masl, and (b) in hilly areas, on the plateau top, including remnants of the native vegetation cover, represented by a subtropical deciduous forest, at elevations about 1.600 masl, called "serra". Rehabilitation differed depending on strategies and time, varying from recent mining to 19 years of rehabilitation. Composite samples were collected in eight "campo" and nine "serra" areas, in two layers (0–10 and 10–20 cm) in the winter as well as in the summer, in three replicates. Bauxite mining caused a negative impact on org C, Nt and microbial biomass (C, N and P). The values of these attributes were reduced by up to 99 % in comparison with those in reference areas (native vegetation). In both "campo" and "serra", the C org, Nt, microbial biomass and enzymatic activity increased with the different rehabilitation strategies, although the recovery of the different attributes varied according to the time of rehabilitation. Microbial biomass and enzymatic activity recovered very quickly. It reached values similar to the reference areas after the first year of rehabilitation, whereas org C and Nt only reached the reference values after longer periods (18 years). The metabolic coefficient ( $qCO_2$ ) was very sensitive to indicate the impact of bauxite mining, but did not discriminate the effect of rehabilitation stages. The results of this study show that after mining the essential soil attributes for soil functioning can be recovered by revegetation.*

*Index terms:* degraded soil, biological attributes, mine spoils, land rehabilitation.

## **INTRODUÇÃO**

Dentre as atividades antrópicas que interferem no meio ambiente, a mineração é uma das que causa maior impacto nos ecossistemas (Sengupta, 1993), pois ocasiona profundas alterações nas propriedades físicas, químicas e principalmente na redução da atividade biológica do solo (Fox et al., 1991; Franco et al., 1994). A recuperação dessas áreas é motivo de esforços por

parte das empresas do setor e dos órgãos ambientais, universidades e institutos de pesquisas, que buscam procedimentos eficazes para restabelecer os processos essenciais do solo e dos ecossistemas alterados.

Entre os processos vitais à funcionalidade do ecossistema, destacam-se as formas e os ciclos dos elementos no sistema solo-planta, em especial do C, que exerce função reguladora sobre as transformações e ciclagem dos demais elementos no solo. As

transformações dos materiais orgânicos são catalisadas pela atividade microbiana do solo, que, por isso, desempenha papel essencial na reabilitação de solos degradados (Srivastava & Singh, 1991). Interferências antrópicas drásticas, como a mineração, causam grandes perdas da matéria orgânica, o que ocasiona diminuição da atividade microbiana, pois a matéria orgânica é fonte de nutrientes e energia para a população microbiana do solo e de nutrientes para esta e para as plantas, sendo por isso considerada um atributo-chave para o sucesso da reabilitação de solos minerados (Franco et al., 1994; Williamson & Johnson, 1994). Estudos realizados em solos de mineração de bauxita na Austrália mostraram perdas de 90 % do CO e Nt do solo, sendo necessários em torno de 33 anos para que esses elementos atinjam teores equivalentes aos de áreas adjacentes não mineradas (Schwenke et al., 2000a,b,c).

Outro atributo importante do solo é a biomassa microbiana, que representa a parte viva da matéria orgânica e que regula as transformações bioquímicas, o estoque e o fluxo de C e outros nutrientes, os quais são liberados durante a sua reciclagem, o que ocorre em tempo relativamente rápido em comparação ao CO do solo: menos de um ano (Siqueira et al., 1994). Por isso, a biomassa ativa é um regulador crítico dos processos biológicos do sistema solo-planta, atuando como um indicador sensível das alterações que ocorrem no solo (Srivastava & Singh, 1991; Wardle, 1992; Rice et al., 1996). Do mesmo modo que impacta a matéria orgânica, a mineração reduz sensivelmente a biomassa microbiana. Há áreas de mineração de carvão na Índia que, mesmo após 20 anos de recuperação espontânea, apresentam reduções de 50 % nas concentrações do C e do N da biomassa microbiana, em relação aos teores encontrados em solos sob floresta sem interferência (Srivastava et al., 1989).

As transformações mediadas pela biomassa microbiana são catalisadas pelas enzimas, que exercem também um importante papel na funcionalidade dos processos nos solos. Por isso, a quantificação da atividade de enzimas do solo pode fornecer indicações das alterações nos processos metabólicos (Nannipieri et al., 1990; Dick et al., 1996) e, juntamente com outras avaliações, como o teor de CO, Nt e a biomassa microbiana, pode contribuir para melhor compreensão do efeito da interferência antrópica no solo e servir como um estratificador de ambientes (Kulinska et al., 1982; Klein et al., 1985), especialmente em áreas que foram mineradas e que estão em processo de reabilitação (Clark & Clark, 1981; Klein et al., 1985; Kiss et al., 1993). Dentre as enzimas do solo, as pertencentes às hidrolases, como a  $\beta$ -glicosidase, a urease e a fosfatase, são as mais importantes, pois estas catalisam a quebra de substratos em compostos orgânicos de menor peso molecular, facilitando sua mineralização (Burns, 1983). Uma outra avaliação indireta da atividade heterotrófica do solo é a hidrólise do diacetato de fluoresceína (DAF). Este substrato é hidrolisado por

diversas enzimas, como as proteases, as lipases e as esterases (Schnürer & Roswall, 1982), que são liberadas em grande quantidade pelos decompositores primários, como as bactérias e fungos (Soderstrom, 1977; Lundgren, 1981), servindo como indicador da atividade da biomassa do solo.

Apesar de a importância do CO, Nt, da biomassa e atividade microbiana no solo já ser bastante reconhecida, são escassos os estudos desenvolvidos sobre esses atributos em áreas mineradas e reabilitadas, tampouco em áreas de extração de bauxita. Como esses são atributos essenciais ao bom funcionamento do solo, determinar as alterações ocorridas pode ser de grande interesse prático para avaliar as condições de áreas em reabilitação. O objetivo deste estudo foi avaliar o impacto da mineração de bauxita e os efeitos da reabilitação no teor de CO, no Nt, na biomassa e na respiração microbiana, e na atividade enzimática em duas cronosequências.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em áreas de mineração da companhia Alcoa Alumínio do Brasil S/A, localizada em Poços de Caldas (MG), em dois ambientes distintos: (a) em áreas com vegetação típica de campo, predominantemente herbácea, muitas vezes contínua em altitude inferior a 1.000 m, e (b) em áreas de montanhas, no topo do planalto, incluindo vegetação nativa representada pela floresta subtropical subcaducifólia, a uma altitude de 1.600 m, denominada serra (Quadro 1). Segundo a classificação de Köppen, o clima predominante é Cfb, que apresenta estações bem definidas: chuvosa de outubro a março e seca de abril a setembro, com média de temperatura de 17 °C e umidade relativa de 78 %, referente a 1998 e 1999. As áreas selecionadas para o estudo localizam-se na mesma classe de solo, Cambissolo, e apresentam características diferenciadas quanto às estratégias (revegetação com diferentes espécies vegetais) e ao tempo de reabilitação, variando de recém-mineradas a 19 anos de reabilitação, conforme a descrição apresentada no quadro 1. As amostragens foram feitas no inverno (09/98) e no verão (03/99), sendo realizadas as coletas em duas profundidades de 0–10 e 10–20 cm. Em cada área foram alocadas três parcelas de 6 x 25 m, retirando-se 10 amostras simples, em zig-zag em cada parcela, perfazendo um total de três amostras compostas (três repetições) por área. As amostras foram peneiradas em malha de 4 mm, procedendo-se à uniformização da umidade para 50 % da capacidade de campo, acondicionadas em sacos plásticos e mantidas em refrigeração (4 °C) conforme procedimento descrito por Forster (1995).

As amostras de solo foram enviadas ao Laboratório de Fertilidade do Solo da UFLA-DCS, onde foram determinados o pH em água na relação 1:2,5; os teores de P e K disponíveis extraídos pelo método Mehlich-1

Quadro 1. Descrição das áreas de campo e serras

Ident.	Processo utilizado na reabilitação	Tempo <sup>(1)</sup>
Áreas do Campo		
SR0	Recém-minerada e sem reabilitação	0
BG1	Área recentemente revegetada, na ocasião da primeira amostragem, com braquiária ( <i>Brachiaria decumbens</i> ) e feijão-guandu ( <i>Cajanus cajan</i> ).	1
E4	Área revegetada com eucalipto ( <i>Eucalyptus saligna</i> ). Grande densidade de plantas na área e serapilheira espessa.	4
CA5	Área revegetada com capim-azevém ( <i>Lolium multiflorum</i> ); espécie nativa como o <i>Eupatorium</i> sp. (Asteraceae) e outras espécies herbáceas.	5
CG10	Área revegetada com capim-gordura ( <i>Melinis minutiflora</i> ); de espécies nativas arbóreas, herbáceas e de bracatinga ( <i>Mimosa scabrella</i> ).	10
E18	Área revegetada com eucalipto ( <i>Eucalyptus saligna</i> ). Grande densidade de plantas e serapilheira espessa.	18
B19	Área revegetada com bracatinga ( <i>Mimosa scabrella</i> ) e sub-bosque bem desenvolvido (capim-gordura e outras espécies herbáceas) e serapilheira.	19
RF	Referência, com espécies graminóides e arbustivas (sem alteração antrópica).	---
Áreas da Serra		
SR0	Recém-minerada e sem reabilitação	0
GG1	Área recentemente revegetada, na ocasião da primeira amostragem, com capim gordura ( <i>Melinis minutiflora</i> ), feijão-guandu ( <i>Cajanus cajan</i> ) e várias espécies arbóreas nativas.	1
BG2	Área recentemente revegetada, na ocasião da primeira amostragem, com braquiária ( <i>Brachiaria decumbens</i> ), feijão-guandu ( <i>Cajanus cajan</i> ) e várias espécies arbóreas nativas.	2
B7	Área revegetada com bracatinga ( <i>Mimosa scabrella</i> ) e sub-bosque desenvolvido e revegetado com capim-gordura ( <i>Melinis minutiflora</i> ).	7
M10	Área revegetada com bracatinga ( <i>Mimosa scabrella</i> ), processo de sucessão avançado. Apresenta várias espécies arbóreas nativas em substituição à bracatinga e formação de serapilheira espessa.	10
B15	Área revegetada com bracatinga ( <i>Mimosa scabrella</i> ) e vegetação rasteira e arbustiva com várias espécies nativas, área em processo de sucessão.	15
E18	Área revegetada com eucalipto ( <i>Eucalyptus saligna</i> ), baixa densidade de plantas, o que proporcionou o desenvolvimento de sub-bosque com várias gramíneas e arbustos na área.	18
M19	Área revegetada inicialmente com bracatinga e que atualmente apresenta grande quantidade de espécies nativas arbóreas, sub-bosque denso e fechado e avançado estágio sucessional; serapilheira espessa.	19
RF	Referência, vegetação arbórea densa (sem alteração antrópica)	---

<sup>(1)</sup> Anos após o início do processo de reabilitação, na época da segunda amostragem.

e analisados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente; Ca; Mg e Al trocáveis, extraídos com KCl (1 mol L<sup>-1</sup>) e dosado por espectrofotometria de absorção atômica e por titulometria, e H + Al extraído pelo acetato de Ca 0,5 mol L<sup>-1</sup>; pH 7 e dosado por titulometria. O solo apresentou em geral baixa fertilidade tanto no campo quanto na serra com as seguintes amplitude de valores para os principais indicadores de fertilidade: pH: 4,8 a 5,2; P: 0,1 a 3,0 mg dm<sup>-3</sup>; K: 14 a 60,6 mg dm<sup>-3</sup>; Ca<sup>2+</sup>: 0,4 a 2,4 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg<sup>2+</sup>: 0,1 a 2,6 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; H + Al: 2,1 a 9,1 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Al<sup>3+</sup>: 0,3 a 5,5 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; V: 10 a 51 %, m: 19 a 63 %. A análise textural revelou grande variação para os teores de argila e silte conforme valores a seguir: areia – 80 a 390 g kg<sup>-1</sup>; silte – 250 a 390 g kg<sup>-1</sup> e argila – de 260 a 650 g kg<sup>-1</sup>.

O teor de CO foi determinado pela técnica da oxidação, pelo dicromato de K, e a textura do solo determinada pelo método da pipeta (Embrapa, 1997). O Nt foi extraído por digestão sulfúrica e seguido de destilação Kjeldahl (Keeney & Nelson, 1982). As extrações e determinações do C, N e P da biomassa microbiana (C-BM, N-BM e P-BM) foram realizadas pelos métodos da fumigação-extração propostos por Vance et al. (1987), Brookes et al. (1985) e Brookes et al. (1982), respectivamente. Essas técnicas apresentam como princípio básico a extração do C, N e P microbiano após a morte dos microrganismos e lise celular pelo ataque com clorofórmio e liberação dos constituintes celulares, sendo adotado o fator de conversão de 0,30 para a C-BM (Feigl, 1995), 0,45 para N-BM (Brookes et al., 1985) e 0,40 para P-BM (Brookes et al., 1982).

A respiração microbiana do solo (Resp) foi determinada utilizando o método da captura do CO<sub>2</sub> pelo NaOH (Alef & Nannipieri, 1995). A hidrólise do diacetato de fluoresceína (DAF) foi determinada utilizando-se 3 g de solo úmido em um tubo com capacidade para 100 mL, adicionando-se 50 mL da solução tampão (Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 60 mmol L<sup>-1</sup> a pH 7,0) contendo a fluoresceína (10 mg L<sup>-1</sup> de C<sub>24</sub>H<sub>16</sub>O<sub>7</sub>, na solução tampão), incubando sob rotação a 35 °C por 24 h. Após este período, adicionaram-se 2 mL de acetona (50 mL L<sup>-1</sup>) para interromper a reação e centrifugou-se a suspensão a 3.840 rpm durante 5 min, filtrando o sobrenadante e mensurando em espectrofotômetro a 490 nm (Dick et al., 1996).

A atividade da β-glicosidase foi determinada por espectrofotometria, utilizando 1 g de solo incubado com 0,25 mL de tolueno, 4 mL do tampão (pH 6) e 1 mL de p-nitrofenil-β-D-glucosídeo (0,05 mol L<sup>-1</sup>) por 1 h a 37 °C. Após esta reação, adicionaram-se 1 mL de CaCl<sub>2</sub> (0,5 mol L<sup>-1</sup>) e 4 mL do tampão THAM (pH 12) quando a solução adquiriu uma coloração amarelada e a leitura foi realizada em espectrofotômetro a 410 nm (Eivazi & Tabatabai, 1988). A mensuração da atividade da fosfatase ácida foi baseada na leitura em espectrofotômetro do p-nitrofenol resultante da atividade enzimática da fosfatase ácida, conforme descrito em Dick et al. (1996). Em 1 g de solo, foram adicionadas as seguintes soluções: 0,2 mL de tolueno, 4 mL de tampão (pH 6,5) e 1 mL de p-nitrofenil-fosfato (0,05 mol L<sup>-1</sup>). Assim como a β-glicosidase, a solução adquiriu uma coloração amarelada e a leitura foi feita em espectrofotômetro a 410 nm.

A atividade da urease foi determinada pelo método descrito por Tabatabai & Bremner (1972), que se baseia na determinação da amônia liberada após a incubação do solo com uma solução de uréia por 2 h a 37 °C. Pesaram-se 5 g de solo, adicionando-se 0,2 mL de tolueno, 9 mL de tampão (pH 9) e 1 mL de solução com uréia (0,2 mol L<sup>-1</sup>), incubando por 2 h em estufa a 37 °C. Após este período, adicionaram-se 40 mL de KCl-Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (2,5 mol L<sup>-1</sup>) para interromper a reação. Da solução, pipetaram-se 20 mL, que foram levados a um microdestilador, adicionando-se 0,2 g de MgO (Keeney & Nelson, 1982). No microdestilador, o destilado foi recolhido em um bquer com solução de ácido bórico, contendo como indicadores o vermelho de metila e o verde de bromocresol, sendo titulado com solução padronizada de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (0,005 mol L<sup>-1</sup>).

Os resultados foram submetidos à análise de variância, segundo o esquema de parcela subdividida, sendo consideradas as áreas como tratamentos nas parcelas num total de oito no campo e nove na serra; e a profundidade de amostragem como subparcela. O teste de médias e as correlações utilizadas foram de Duncan e de Pearson, respectivamente, a 5 % de probabilidade de erro utilizando o pacote estatístico SAEG (UFV).

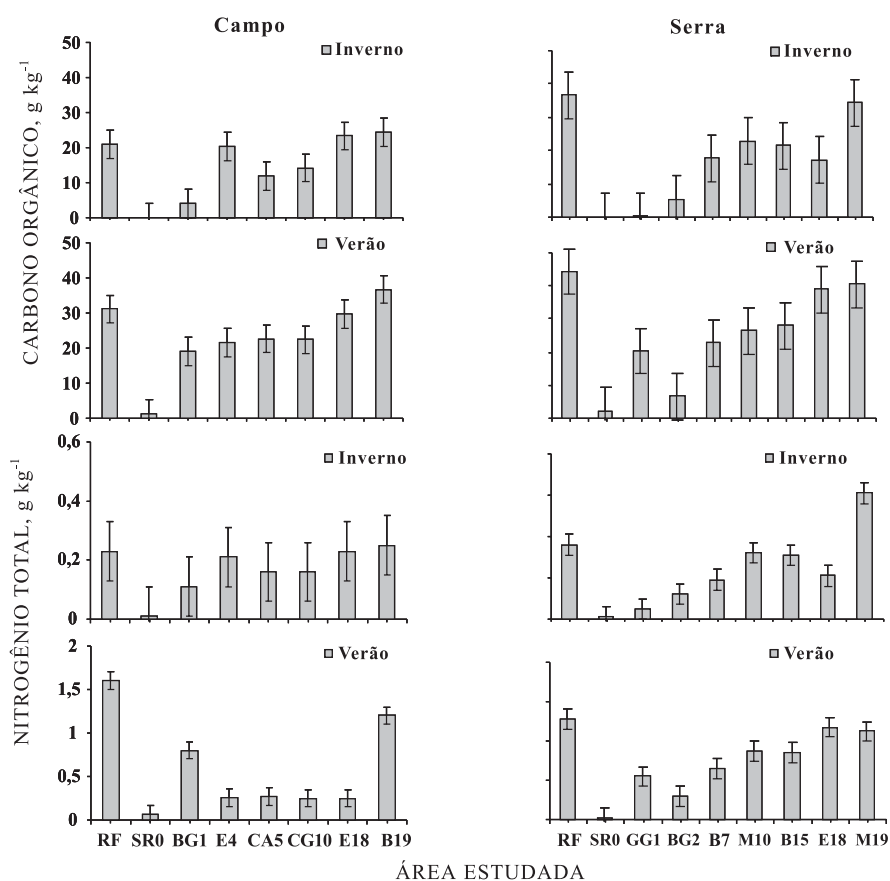
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quando se comparam as áreas recém-mineradas às áreas de referência, verifica-se que a mineração afetou severamente todos os atributos nos dois ambientes avaliados, independente das épocas amostradas (Figura 1 e Quadros 2 e 3), sendo esses reduzidos em até 99 %. Os resultados para as duas profundidades mostraram poucas diferenças para efeito dos tratamentos na maioria das áreas e atributos. Assim, a camada superficial de maior importância em termos de processos do sistema solo-planta tem sido geralmente a considerada em estudos com este enfoque (Feigl et al., 1995). Neste trabalho, apenas os resultados da profundidade 0 a 10 cm serão apresentados e discutidos.

### Carbono orgânico, nitrogênio total e biomassa microbiana.

O teor de CO, encontrado no campo e na época de inverno, apresentou na área em início de reabilitação (BG1) 20 %, em relação à área de referência (RF) (Figura 1). Na serra, nesta mesma época, verificaram-se reduções de 99 % em comparação com a área reabilitada recém-revegetada (GG1) e de 85 % para a área reabilitada com braquiária há dois anos (BG2) em relação à RF. Da mesma forma, no verão, as áreas em início de reabilitação (BG1, E4, CA5 e CG10 no campo e GG1 e BG2 na serra) apresentaram menores teores de CO que as demais áreas estudadas (p < 0,05). Esta redução no teor de CO é devida à remoção da camada fértil do solo. Durante o processo de lavra, a camada superficial (fértil) do solo é retirada, armazenada em pilhas de 2 a 3 m de altura, para posteriormente ser utilizada no processo de reabilitação da área após o período de lavra, que pode durar vários meses e até anos. Neste período, sem aporte de CO, ocorre oxidação rápida da matéria orgânica remanescente no solo. Além das perdas causadas pela oxidação, no preparo do solo minerado para início da reabilitação, este é misturado com o material do subsolo solo (estéril), reduzindo ainda mais o teor da matéria orgânica. Em solos de mineração de bauxita na Austrália, Schwenke et al. (2000a,b) verificaram também redução acentuada do teor da matéria orgânica do solo, o que corrobora os resultados encontrados neste estudo.

Apesar desta redução, quando comparadas com as áreas recém-mineradas (SR0), estas áreas reabilitadas, revegetadas principalmente com gramíneas, promoveram um rápido aumento no teor de CO do solo nos dois ambientes estudados, com maior destaque no verão (Figura 1). Isto se deve principalmente à capacidade destas plantas de se estabelecerem rapidamente nestas áreas, formando um sistema radicular abundante, ampliando o efeito rizosférico, facilitando assim o fluxo de C fotoassimilado para o solo (via rizodeposição) e posteriormente pela produção



**Figura 1. Carbono de compostos orgânicos e nitrogênio total do solo nas duas cronosssequências de reabilitação (Campo e Serra) no verão e inverno comparado às áreas recém-mineradas e sem reabilitação (SR0) e a referência (RF). As linhas nas barras indicam os valores da DMS a 5 % pelo teste de Duncan.**

de necromassa. Estes contribuem também para a estruturação do solo, fator de extrema importância para a manutenção/proteção do C do solo. Este desbalanço no ciclo do C promovido pela mineração mostra-se reversível com o aumento do tempo de reabilitação e desenvolvimento da vegetação, que são processos interdependentes.

Neste estudo, verificaram-se uma relação linear positiva e significativa entre os teores do CO e o tempo de reabilitação da área de  $R^2 = 0,71^{**}$  no inverno e  $R^2 = 0,70^{**}$  no verão, para o campo, e  $R^2 = 0,77^{**}$  no inverno e  $R^2 = 0,84^{**}$  no verão, para a serra. Esta mesma tendência tem sido observada em vários estudos sobre a interferência da mineração de lignita (Leiros et al., 1993), de carvão (Insam & Domsch, 1988) e de bauxita na Austrália (Sawada, 1996) e no Brasil (Costa et al., 1998).

O retorno ao estágio original, representado neste estudo pela referência, raramente acontece em um curto espaço de tempo. De acordo com Insam & Domsch (1988), a recuperação pode exigir até 50 anos, como verificado em solos degradados pela atividade de mineração de carvão na Europa. Em áreas de mineração de bauxita na Austrália, Schwenke et al. (2000 a,b) observaram que o período para recuperação

dos teores do CO da área original está em torno de 30 anos. Em áreas de mineração de bauxita em Porto Trombetas (PA) no Brasil, estudos conduzidos por Costa et al. (1998) indicaram que o retorno a teor original de CO levaria em torno de 10 anos com revegetação espontânea ou reflorestamento. Neste estudo, concentrações semelhantes às da referência e que apresentaram tendências estáveis ocorreram a partir de 18 anos nos dois ambientes estudados. Apesar da grande interferência no solo, os teores de CO se recuperaram com a revegetação.

No campo no inverno, todas as áreas apresentaram teores semelhantes de Nt (Figura 1) ao da RF, e no verão, somente as áreas BG1 e B19 apresentaram concentrações de Nt semelhantes a RF ( $p < 0,05$ ). Na serra, tanto na época de inverno quanto no verão, as áreas com tempo de reabilitação maior ou igual a 10 anos apresentaram concentrações de Nt semelhantes à da área de referência, exceção somente para E18 no inverno.

No início do processo de reabilitação, o solo foi adubado com N (Quadro 1) e isto pode ter influenciado nas concentrações de Nt nas áreas em BG1 no campo e GG1 na serra, no entanto, devido a sua dinâmica, este efeito não perdura por muito tempo. Outro ponto

importante foi a utilização de espécies vegetais fixadoras de  $N_2$  como a bracatinga (*Mimosa scabrella*) e a feijão guandú (*Cajanus cajan*) nas áreas em reabilitação, o que pode ter provocado este aumento no teor de Nt no campo e na serra. Estudos conduzidos por Franco et al. (1994) em áreas de mineração de bauxita em Porto Trombetas PA, reabilitadas com leguminosas arbóreas fixadoras de  $N_2$  e de crescimento rápido, promoveram adição de até  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, contribuindo para o sucesso do processo de reabilitação da área. Na Austrália, também em áreas de mineração de bauxita, a utilização de leguminosas como *Mimosa scabrella* na reabilitação aumentou o teor de Nt após 9 anos, sendo adicionados em torno de  $300 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de N via deposição de resíduos vegetais, enquanto em área adjacente reabilitada com eucalipto a adição de N ficou em  $63 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  de N (Ward, 2000). Neste estudo, apesar desta contribuição, observa-se que o tempo de reabilitação foi o fator que influenciou no processo de acumulação com relação ao Nt, como verificado também no CO, obtendo-se relação linear positiva de  $R^2 = 0,63^{**}$  no inverno e de  $R^2 = 0,15^{ns}$  no verão em áreas do campo e de  $R^2 = 0,68^{**}$  no inverno e de  $R^2 = 0,85^{**}$  no verão em áreas da serra. Portanto, a revegetação das áreas mineradas promoveu uma rápida recuperação parcial deste atributo, porém para atingir os teores próximos dos encontrados nas áreas referências, são requeridos períodos prolongados de 19 e 10 anos para o campo e serra, respectivamente.

No campo, na época de inverno, observou-se que as áreas BG1, E4, CA5 e CG10 apresentaram teores

de C na biomassa microbiana (C-BM) elevados, no entanto diferiram das áreas E18, B19 e da RF (Quadro 2). No verão, com exceção das áreas E4 e CG10, todas as demais apresentaram teores de C-BM semelhantes à RF. Na serra, no inverno, observou-se que somente a área M19 não diferiu da RF, e as áreas GG1 e BG2 apresentaram baixo teor de C-BM, não diferindo da área recém-minerada. No verão, todas as áreas estudadas apresentaram teores de C-BM semelhante ao da referência, com exceção da área BG2, onde não houve a recuperação da concentração de C-BM. Em área de mineração de bauxita e reabilitada na Austrália, foi observado que o teor de C-BM apresentou um rápido aumento nos primeiros anos de reabilitação, atingindo valor de  $366 \mu\text{g g}^{-1}$  de C-BM no solo (Sawada, 1996), fato que corrobora com os resultados aqui encontrados.

A recuperação rápida (a partir de um ano de reabilitação) do teor de C-BM, principalmente no verão, está intimamente relacionada com a revegetação da área que reestabelece a entrada de C via rizosfera e proporciona incrementos no CO para a microbiota. Neste sentido, foram verificadas correlações positivas entre teores de C-BM e CO  $r = 0,55^{**}$  no inverno e de  $r = 0,53^{**}$  no verão para as áreas de campo e de  $r = 0,85^{**}$  no inverno e de  $r = 0,81^{**}$  no verão para as áreas de serra. Para o N da biomassa microbiana (N-BM) no campo, a recuperação também foi rápida, ou seja, a partir de um ano de reabilitação. Ressalta-se que, na época de inverno, a área reabilitada com bracatinga há 19 anos (B19) apresentou duas vezes mais N-BM que a referência (Quadro 2). No verão,

**Quadro 2. Teores de carbono na biomassa microbiana (C-BM), nitrogênio na biomassa microbiana (N-BM) e fósforo na biomassa microbiana do solo (P-BM), respiração microbiana (Resp), e quociente metabólico ( $q\text{CO}_2$ ) nas duas cronossequências de reabilitação (Campo e Serra)**

Área <sup>(1)</sup>	C-BM		N-BM		P-BM		Respiração		$q\text{CO}_2$	
	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão
	— $\mu\text{g g}^{-1}$ solo —						$\mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$ de $\text{CO}_2$ no solo			
	Campo									
SR0	71 c	135 d	0,01 c	0,01 b	18 bc	5 c	3 a	3 a	61 a	22 a
BG1	666 b	1.088 ab	96 b	40 a	26 ab	75 b	5 a	3 a	8 b	3 b
E4	945 b	762 bc	52 b	39 a	15 c	131 a	6 a	4 a	4 b	6 b
CA5	734 b	1.039 ab	61 b	42 a	23 bc	114 ab	4 a	2 a	3 b	1 b
CG10	787 b	506 bc	45 b	22 a	23 bc	149 a	5 a	4 a	3 b	14 b
E18	1.115 a	1.235 ab	56 b	44 a	30 ab	156 a	9 a	4 a	3 b	20 b
B19	1.385 a	1.217 ab	141 a	68 a	49 a	169 a	6 a	5 a	7 b	4 b
RF	1.627 a	1.677 a	62 b	66 a	43 a	195 a	6 a	4 a	2 b	2 b
	Serra									
SR0	87 b	97 c	0,03 c	0,01 c	11 b	4 c	2 c	3 a	41 a	35 a
GG1	61 b	168 b	7 b	21 b	32 a	55 bc	1 c	2 a	13 b	14 a
BG2	55 b	911 a	36 a	26 b	25 a	73 bc	5 bc	6 a	91 a	6 a
B7	285 b	504 a	24 a	59 a	24 a	44 bc	8 b	9 a	27 b	17 a
M10	288 b	797 a	29 a	67 a	41 a	140 ab	6 b	4 a	23 b	5 a
B15	166 b	645 a	23 a	35 a	31 a	172 a	8 b	6 a	54 a	11 a
E18	115 b	445 a	24 a	58 a	41 a	64 bc	6 b	10 a	49 a	24 a
M19	863 a	532 a	44 a	65 a	28 a	147 ab	15 a	5 a	17 b	11 a
RF	719 a	705 a	30 a	83 a	36 a	183 a	9 b	9 a	12 b	19 a

<sup>(1)</sup> Descrição das áreas encontra-se no quadro 1. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, na coluna, pelo teste de Duncan a 5 %.

as áreas reabilitadas não diferiram da RF ( $p < 0,05$ ), no entanto, em valores absolutos, observa-se que a área B19 apresentou teor próximo do da referência. Na serra, somente a área CG1 no inverno e GG1 e BG2 no verão diferiram da RF, não recuperando teores de N-BM. Foram observadas correlações positiva e significativa entre teores de N-BM e de Nt no verão ( $r = 0,63^{**}$ ) e no inverno ( $r = 0,47^*$ ) para as áreas da serra, e no campo somente na época de verão ( $r = 0,56^{**}$ ), indicando que qualquer estratégia que favoreça o incremento do teor de N-BM promoverá melhoria na fertilidade do solo, facilitando assim a reabilitação da área. Os teores de P da biomassa microbiana (P-BM) apresentaram pouca ou nenhuma diferença no inverno nos dois ambientes estudados entre as áreas reabilitadas e a RF (Quadro 2).

A biomassa microbiana do solo tem grande significado ecológico, destacando-se sua função de armazenador de nutrientes e de regulador da ciclagem da matéria orgânica (Wardle, 1992), servindo de indicador das interferências e da qualidade do solo. Além disso, esta fração da matéria orgânica representa um importante reservatório de C, N e P, contendo em torno de 1 a 5 % de C, 2 a 5 % de N e 2 a 20 % de P (Srisvastava & Singh, 1991). Estratégias que promovem o incremento deste atributo do solo são ponto-chave no sucesso do processo de reabilitação de áreas degradadas (Sawada, 1994). Neste sentido, a revegetação inicial das áreas recém-mineradas (empregando gramíneas, braquiária no campo BG1 e capim-gordura na serra GG1) proporcionou incrementos nas concentrações de C, N e P na biomassa microbiana, quando comparadas com as áreas recém-mineradas (SR0), no entanto, nem sempre este incremento foi suficiente para atingir teores semelhantes aos das áreas de referência encontrados no momento da amostragem. A rápida recuperação dos teores da biomassa microbiana resulta principalmente na entrada de C no sistema pelos processos de rizodeposição e decomposição da fitomassa, que ocorrem intensamente nas espécies vegetais utilizadas no início da reabilitação, pois apresentam sistema radicular extenso e de crescimento rápido, além de produzirem grande quantidade de fitomassa.

### Atividade microbiana e enzimática do solo

A respiração microbiana (Resp) nas duas épocas e nas diferentes áreas estudadas encontra-se no quadro 2. De maneira geral, em valores absolutos, a respiração aumentou com o tempo de reabilitação das áreas, tanto no campo quanto na serra, e tem relação direta com o teor de CO no solo, sendo observadas correlação entre a Resp e CO de  $r = 0,55^*$  no inverno e de  $r = 0,40^*$  no verão em áreas de campo e de  $r = 0,83^{**}$  no inverno e de  $r = 0,65^{**}$  no verão em áreas da serra. Este resultado corrobora outro encontrado por Sawada (1994) em solos sob mineração de bauxita e reabilitados com eucalipto. O coeficiente metabólico ( $qCO_2$ ) foi superior nas áreas recém-mineradas, sendo,

portanto, indicativo do estresse provocado pela mineração, mas não diferenciou as estratégias de reabilitação. O  $qCO_2$  elevado indica que está ocorrendo maior gasto de energia para a manutenção da comunidade microbiana, ou seja, devido à condição de estresse, os microrganismos têm que consumir mais substrato para sua sobrevivência.

Para hidrólise do diacetato de fluoresceína (DAF) em áreas de campo, não foram observadas diferenças entre as estratégias de reabilitação com a referência nas duas épocas estudadas, com exceção da área recentemente reabilitada com braquiária (BG1) no inverno, que apresentou menor DAF que as demais áreas reabilitadas ( $p < 0,05$ ). Na serra, no inverno, também não foram verificadas diferenças entre as áreas reabilitadas e a referência, no entanto, no verão, as áreas GG1 e BG2 apresentaram DAF menores que as demais áreas (Quadro 3). Observa-se que a hidrólise do DAF aumenta rapidamente após a reabilitação da área. No campo, valores similares aos de RF são encontrados em áreas reabilitadas a partir de um ano no campo e na serra.

Estes resultados foram semelhantes aos encontrados por Frouz & Nováková (2005) em área de mineração de carvão abandonada na Europa e estão intimamente relacionados com os teores de CO no solo. A hidrólise do DAF, em áreas do campo no inverno, apresentou correlação positivamente com os teores de Nt, CO, N-BM, C-BM e respiração microbiana do solo e nenhuma correlação com estes atributos na serra. No verão, em área do campo, houve correlação positiva entre o DAF e a N-BM e o CO, e na serra, nesta mesma época, observou-se correlação entre o DAF e o Nt, N-BM, CO e a Resp (Quadro 4). O DAF representa o potencial heterotrófico do solo, pois engloba a atividade de grupos de enzimas que atuam na decomposição de materiais orgânicos, como as proteases, lipases e esterases (Schnürer & Roswall, 1982; Dick et al., 1996). Assim, a recuperação deste atributo bioquímico pode indicar efeitos no ciclo de energia do sistema solo-planta e de nutrientes no solo, tornando-se sua recuperação fator-chave para o sucesso da reabilitação de áreas que sofreram alterações antrópicas, como em solo sob mineração de bauxita.

A atividade da  $\beta$ -glicosidase (BGLI) no campo no inverno não variou entre as áreas reabilitadas, já no verão somente a área recentemente reabilitada (BG1) apresentou menor atividade desta enzima diferindo significativamente ( $p < 0,05$ ) das demais áreas estudadas. Na serra, no inverno, também não houve diferenças significativas entre as áreas estudadas, e no verão somente a área GG1 diferiu das demais (Quadro 3). Em áreas do campo e da serra, nas duas épocas estudadas, verificaram-se correlações positiva e altamente significativas entre a atividade da  $\beta$ -glicosidase e todos os atributos bioquímicos avaliados, com exceção da correlação entre BGLI e Resp e BGLI e N-BM na época de verão no campo e na serra, respectivamente (Quadro 4). Estes resultados



sugerem relação direta entre β-glicosidase a estes atributos bioquímicos, principalmente relacionados aos ciclos do C e N do solo. Como o produto da hidrólise da β-glicosidase é fonte importante de energia para os microrganismos do solo, alterações no solo, que resultam em redução acentuada da atividade desta enzima, podem retardar ou mesmo comprometer o

processo de reabilitação da área, o que corrobora vários outros estudos em outros ambientes (Eivazi & Tabatabai, 1988; Tabatabai, 1994; Dick et al., 1996). Os resultados indicam que o teor de CO é o fator-chave para a recuperação da atividade da BGLI nas áreas reabilitadas, uma vez que maior correlação com este atributo e o teor de C-BM foi encontrada (Quadro 4).

**Quadro 3. Hidrólise do diacetato de fluoresceína (DAF) e atividade da β-glicosidase, e da fosfatase ácida e da urease nas áreas de campo e serra e nas duas épocas estudadas nas áreas de campo e serra**

Área <sup>(1)</sup>	DAF		β-glicosidase		Fosfatase		Urease	
	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão
	- mg g <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> de F no solo -		- μg g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> de PNF no solo -				μg g <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> de N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> no solo	
	Campo							
SR0	36 c	61 b	250 b	14 d	250 c	9 c	4 c	2 b
BG1	44 c	406 a	677 a	169 cd	643 b	99 b	15 a	11 ab
E4	190 ab	371 a	743 a	1164 ab	885 ab	1015 a	4 c	14 a
CA5	155 b	408 a	602 a	586 bc	871 ab	978 a	13 ab	<b>11 ab</b>
CG10	145 b	394 a	481 a	828 bc	788 ab	1033 a	11 abc	<b>19 a</b>
E18	231 a	441 a	699 a	1830 a	1062 a	944 a	5 bc	<b>13 a</b>
B19	237 a	467 a	684 ab	1565 a	1037 a	933 a	14 a	19 a
RF	188 ab	374 a	785 a	1206 ab	823 ab	974 a	16 a	19 a
	Serra							
SR0	31 c	<b>44 d</b>	28 b	43 d	82 b	11 b	5 b	3 c
GG1	128 b	292 bc	440 a	618 cd	96 b	972 a	1 b	10 bc
BG2	692 ab	163 cd	602 a	1311 bc	1018 a	952 a	11 a	5 bc
B7	756 a	341 ab	844 a	2067 ab	1125 a	1006 a	18 a	14 ab
M10	753 a	<b>425 ab</b>	803 a	2442 a	1034 a	1028 a	13 a	14 ab
B15	779 a	<b>441 ab</b>	840 a	2506 a	1045 a	894 a	<b>15 a</b>	21 a
E18	551 ab	<b>453 ab</b>	819 a	2419 a	971 a	912 a	<b>11 a</b>	16 ab
M19	108 b	<b>466 ab</b>	842 a	2002 ab	954 a	882 a	<b>14 a</b>	15 ab
RF	559 ab	<b>482 a</b>	693 ab	2206 ab	887 a	918 a	<b>15 a</b>	21 a

<sup>(1)</sup> Descrição das áreas encontra-se no quadro 1. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, na coluna, pelo teste de Duncan a 5 %.

**Quadro 4. Correlação de Pearson entre a hidrólise do diacetato de fluoresceína (DAF), β-glicosidase (BGLI), urease (UASE) e fosfatase ácida (FOS) com o teor de nitrogênio total (Nt), nitrogênio da biomassa microbiana (N-BM), carbono orgânico (CO), carbono da biomassa microbiana (C-BM) e respiração basal (Resp) nas duas épocas e áreas estudadas em amostras da superfície**

	Inverno				Verão			
	DAF	BGLI	UASE	FOS	DAF	BGLI	UASE	FOS
	Campo							
Nt	0,75**	0,57**	-0,27ns	0,73**	0,21ns	0,43*	0,13ns	-0,36ns
N-BM	0,66**	0,67**	0,01ns	0,45*	0,62**	0,35*	0,59**	0,01ns
CO	0,90**	0,83**	-0,34ns	0,75**	0,84**	0,59**	0,77**	0,19ns
C-BM	0,44**	0,70**	0,20ns	-0,27ns	0,37ns	0,83**	0,52**	-0,15ns
Resp	0,50**	0,72**	-0,27ns	0,56**	0,17ns	0,01ns	0,43*	0,09ns
	Serra							
Nt	-0,22ns	0,65**	0,45*	0,38*	0,87**	0,73**	0,68**	-0,68**
N-BM	0,05ns	0,52**	0,28ns	0,44*	0,40*	0,08ns	0,54**	-0,06ns
CO	-0,06ns	0,68**	0,61**	0,50**	0,85**	0,74**	0,74**	-0,30ns
C-BM	-0,34ns	0,71**	0,33ns	0,18ns	0,23ns	0,78**	0,16ns	-0,26ns
Resp	-0,14ns	0,60**	0,53**	0,54**	0,40*	0,55**	0,37*	-0,05ns

ns, \* e \*\*: Efeito não significativo e significativos a 5 e 1 %, respectivamente.

Para a urease, observou-se, no inverno, que áreas reabilitadas com eucalipto (E4 e E18) no campo apresentaram menor atividade, e no verão não foram observadas diferenças entre as áreas reabilitadas. Na serra, em amostras coletadas no inverno, somente a área reabilitada recentemente, GG1, apresentou menor atividade que a RF, e no verão as áreas recentemente reabilitadas (GG1 e BG2) apresentaram menores atividades da urease em relação a RF. Observou-se correlação positiva no campo somente na época do verão entre a atividade da urease e o teor de CO, N-BM, C-BM e respiração microbiana. Na serra, encontrou-se correlação entre a atividade da urease e teor de Nt, CO e respiração microbiana no inverno e entre a urease e o teor de Nt, CO, N-BM e respiração do solo no verão (Quadro 4). Estes resultados indicam que as alterações promovidas pela mineração de bauxita afetaram significativamente a atividade da urease, no entanto, os processos de reabilitação das áreas, aliados ao tempo de reabilitação, promoveram aumentos na atividade desta enzima, reduzindo o impacto desta atividade no solo.

A atividade da fosfatase ácida em todas as áreas reabilitadas foi similar à da área RF no campo e no inverno, e no verão somente a área BG1 apresentou menor atividade em relação a RF (Quadro 3). Na serra, amostras coletadas no inverno na área GG1 apresentaram menor atividade da fosfatase em relação à RF. Assim, como observado na atividade das outras enzimas estudadas, a revegetação das áreas promoveu uma reabilitação rápida da atividade da fosfatase ácida. Observaram-se correlação entre a atividade da fosfatase ácida e o teor de Nt, CO, N-BM e respiração microbiana somente nas amostras coletadas no inverno, tanto no campo quanto na serra (Quadro 4). Resultados semelhantes foram encontrados por Stroo & Jencks (1985) em área sob mineração de carvão, verificando relação entre o teor do CO e de Nt com a atividade da fosfatase ácida. Em áreas sob mineração de manganês nos EUA e na Europa, a fosfatase ácida foi altamente afetada pela mineração, apresentando em torno de 28 % da atividade de uma área adjacente, não minerada, no entanto, quando estas áreas foram revegetadas com gramíneas e leguminosas, apresentaram aumento da atividade desta enzima promovida pela vegetação (Stroo & Jencks, 1982; Ross et al., 1982; Kiss et al., 1993), como confirmado pelos resultados aqui encontrados. Neste estudo, a atividade da fosfatase ácida não discriminou as áreas reabilitadas tanto da serra como do campo, demonstrando que, apesar de participação importante no ciclo do P, a revegetação da área promoveu o rápido retorno de sua atividade.

Os atributos estudados têm grande significado ecológico, destacando-se, por exemplo, sua função de armazenadora de nutrientes e reguladoras da ciclagem da matéria orgânica pela biomassa microbiana, que por isso serve de indicadora das interferências e da qualidade do solo (Grisi, 1995). Estratégias que promovem o incremento destes atributos do solo

representam o ponto-chave no sucesso do processo de reabilitação do solo. Os resultados deste estudo mostram que o tempo de reabilitação é mais determinante que as espécies vegetais na recuperação do teor de CO, Nt e na biomassa microbiana do solo, atributos que servem como indicadores das funções biológicas do solo. Os atributos de atividade biológica do solo sofrem grande impacto da mineração, mas a recuperação de suas funções acontece com certa rapidez a partir de um ano de reabilitação das áreas estudadas.

## CONCLUSÕES

1. A mineração de bauxita provoca grande impacto no solo, causando déficits de até 99 % nos teores de CO, nitrogênio total, na biomassa microbiana e na atividade enzimática do solo.
2. A revegetação das áreas mineradas promoveu a recuperação dos atributos bioquímicos do solo.
3. Os benefícios da revegetação são diferenciados em função do atributo e tempo de reabilitação, ou seja, o tempo de reabilitação da área é o fator-chave na recuperação dos teores de CO e de N total e da biomassa microbiana.
4. Os atributos bioquímicos se recuperam mais rapidamente (a partir de um ano) que os teores de CO e N total, que só atingem valores similares aos das referências a partir de 18 anos de reabilitação.

## LITERATURA CITADA

- ALEF, K. & NANNIPIERI, P. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. London, Academic Press, 1995. 320p.
- BROOKES, D.S.; POWLSON, D.S. & JENKINSON, D.S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 14:319-329, 1982.
- BROOKES, P.C.; LANDMAN, A.; PRUDEN, B. & JENKINSON, D.S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 17:837-842, 1985.
- BURNS, R.G. Extracellular enzyme-substrate interactions in soil. In: SLATER, J.H.; WHITTENBURY, R. & WIMPENNY, W.T., eds. *Microbes in their natural environments*. Cambridge, Cambridge University Press, 1983. p.249-298.
- CLARK, R.K. & CLARK, S.C. Floristic diversity in relation to soil characteristic in lead mining complex in the Pennines, England. *New Phytol.*, 87:799-815, 1981.
- COSTA, E.S.; LUIZÃO, R.C. & LUIZÃO, F.J. Soil microbial biomass and organic carbon in reforested sites degraded by bauxite mining in the Amazon. *Adv. Geocool.*, 31:443-450, 1998.

- DICK, R.P.; BREAKWELL, D.P. & TURCO, R.F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, Soil Science Society of America, 1996. p.247-272.
- EIVAZI, F. & TABATABAI, M.A. Glucosidases and galactosidases in soils. *Soil Biol. Biochem.*, 20:601-606, 1988.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FEIGL, B.J.; SPARLING, G.P.; ROSS, D.J. & CERRI, C.C. Soil microbial biomass in Amazonian soils: Evaluation of methods and estimates of pool sizes. *Soil Biol. Biochem.*, 27:1467-1472, 1995.
- FORSTER, J.C. Soil sampling, handling, storage and analysis. In: ALEF, K. & NANNIPIERI, P., eds. *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. London, Academic Press, 1995. p.49-121.
- FOX, R.L.; PENA, R.S.D.L.; GAVENDA, R.T.; HABTE, M.; HUE, N.V.; IKAWA, H.; JONES, R.C.; PLUCKNETT, D.L.; SILVA, J.A. & SOLTANPOUR, P. Amelioration, revegetation and subsequent soil formation in denuded bauxitic materials. *Allertonia*, 602:128-184, 1991.
- FRANCO, A.A.; CAMPELLO, E.F.C.; DIAS, L.E. & FARIA, S.M. Revegetação de áreas de mineração de bauxita em Porto Trombetas - PA com leguminosas arbóreas noduladas e micorrizadas. In: SIMPÓSIO SUL-AMERICANO, 1.; SIMPÓSIO NACIONAL: RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 2., SOBRADO, 1994, Foz do Iguaçu. Anais. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 1994. p.679.
- FROUZ, J. & NOVAKOVA, A. Development of soil microbial properties in topsoil layer during spontaneous succession in heaps after brown coal mining in relation to humus microstructure development. *Geoderma*, 129:54-64, 2005.
- GRISI, B.M. Biomassa e atividade de microrganismos do solo/ revisão metodológica. *R. Nordestina Biol.*, 10:1-22, 1995.
- INSAM, H. & DOMSCH, K.H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. *Microbiol. Ecol.*, 15:177-188, 1988.
- KEENEY, D.R. & NELSON, D.W. Nitrogen organic forms. In: PAGE, A.L., ed. *Methods of soil analysis: Chemical and microbiological properties*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1982. p.643-698.
- KISS, S.; DRAGAN-BULARDA, M. & PASCA, D. Enzymology of technogenic soils. *Adv. Agron.*, 42:230-278, 1993.
- KLEIN, D.A.; SORENSEN, D.L. & REDENTE, E.F. Soil enzymes: A predictor of reclamation potential and progress. In: TATE, R.L. & KLEIN, D.A., eds. *Soil reclamation processes: Microbiological analyses and applications*. New York, Dekker, 1985. p.141-171.
- KULINSKA, D.; CAMARGO, V.L.L. & DROZDOWICZ, A. Enzyme activities in "Cerrado" soils in Brazil. *Pedobiologia*, 24:101-107, 1982.
- LEIROS, M.C.; GILSOTRES, F.; CECCANTI, B.; TRASARCEPEDA, M.C. & GONZALEZ-SANGREGORIO, M.V. Humification processes in reclaimed open-cast lignite mine soils. *Soil Biol. Biochem.*, 25:1391-1397, 1993.
- LUNDGREN, B. Fluorescein diacetate as a stain of metabolically active bacteria in soil. *Oikos*, 36:17-22, 1981.
- NANNIPIERI, P.; GREGO, S. & CECCANTI, B. Ecological significance of the biological activity in soil. *Soil Biochem.*, 6:293-355, 1990.
- RICE, C.W.; MOORMAN, T.B. & BEARE, M. Role of microbial biomass carbon and nitrogen in soil quality. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, Soil Science Society of America, 1996. p.203-216.
- ROSS, D.J.; SPEIR, T.W.; TATE, K.R.; CAIRNS, A.; MEYRICK, K.F. & PANSIER, E.A. Restoration of pasture after topsoil removal: Effects on soil carbon and nitrogen mineralization, microbial biomass and enzymes activities. *Soil Biol. Biochem.*, 14:575-581, 1982.
- SAWADA, Y. Indices of microbial biomass and activity to assess minesite rehabilitation. In: MINERALS COUNCIL OF AUSTRALIA ENVIRONMENTAL WORKSHOP, 1996, Canberra. Minerals Council of Australia, 1996. p.223-236.
- SCHNÜRER, J. & ROSWALL, T. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. *Appl. Environ. Microbiol.*, 43:1256-1261, 1982.
- SCHWENKE, G.D.; AYRE, L.; MULLIGAN, D.R. & BELL, L.C. Soil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite-mined land at Weipa. II. Soil organic matter dynamics in mine. *Austr. J. Soil Res.*, 38:371-393, 2000b.
- SCHWENKE, G.D.; MULLIGAN, D.R. & BELL, L.C. Soil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite-mined land at Weipa. I. Initial changes to soil matter and related parameters. *Austr. J. Soil Res.*, 38:345-369, 2000a.
- SCHWENKE, G.D.; MULLIGAN, D.R. & BELL, L.C. Soil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite-mined land at Weipa. III. Simulated long-term soil organic matter development. *Austr. J. Soil Res.*, 38:395-410, 2000c.
- SENGUPTA, M. Environmental impacts of mining: Monitoring, restoration, and control. Boca Raton, Lewis Publishers, 1993. 494p.
- SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; GRISI, B.M.; HUNGRIA, M. & ARAUJO, R.S. *Microrganismos e processos biológicos do solo: Perspectiva ambiental*. Brasília, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1994. 142p.
- SODERSTROM, B.E. Vital staining of fungi in pure cultures and in soil with fluorescein diacetate. *Soil Biol. Biochem.*, 9:59-63, 1977.
- SRIVASTAVA, S.C. & SINGH, J.S. Microbial C, N and P in dry tropical forest soils: Effects of alternate land-user and nutrient flux. *Soil Biol. Biochem.*, 23:117-124, 1991.

- SRIVASTAVA, S.C.; JHA, A.K. & SINGH, J.S. Changes with time in soil biomass C, N and P of mine spoils in a dry tropical environment. *Can. J. Soil Sci.*, 69:849-855, 1989.
- STROO, H.F. & JENCKS, E.M. Enzyme activity and respiration in minesoils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:548-553, 1982.
- STROO, H.F. & JENCKS, E.M. Effects of sewage sludge on microbial activity in old, abandoned minesoil. *J. Environ. Quality*, 14:301-304, 1985.
- TABATABAI, M.A. Soil enzymes. In: WEAVER, R.W., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p.775-833. (SSSA Book Series, 5)
- TABATABAI, M.A. & BREMNER, J.M. Assay of urease activity in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 4:479-487, 1972.
- VANCE, E.D.; BROOKES, P.C. & JENKINSON, D.S. An extraction method for measuring microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.*, 19:703-707, 1987.
- WARD, S.C. Soil development on rehabilitated bauxite mines in south-west Australia. *Austr. J. Soil Res.*, 38:453-464, 2000.
- WARDLE, D.A. A comparative assessment of factors with influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. *Biol. Rev.*, 67:321-358, 1992.
- WILLIAMSON, J.C. & JOHNSON, D.B. Conservation of mineral nitrogen in restored soils at opencast coal mine sites: II The effects of inhibition of nitrification and organic amendmensts on nitrogen losses and soil microbial biomass. *Eur. J. Soil Sci.*, 45:319-326, 1994.