



ATIVIDADES MICROBIANAS E AS TRANSFORMAÇÕES NO CICLO DOS ELEMENTOS NO SOLO

Diogo Milhomem Machado¹, Thiago Rodrigo Schossler¹, Alan Mario Zuffo², Fabrício Ribeiro de Andrade¹, Adelfran Cavalcante Piauilino²

1 Pós-graduando em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas pela Universidade Federal do Piauí - Brasil (diogo.milhomem@gmail.com)

2 Pós-graduando em Agronomia - Fitotecnia pela Universidade Federal do Piauí - Brasil

Recebido em: 06/10/2012 – Aprovado em: 15/11/2012 – Publicado em: 30/11/2012

RESUMO

O aumento da população, com o conseqüente aumento na demanda de alimentos e outras matérias primas, tem causado um aumento na exploração dos recursos naturais. Nos ecossistemas naturais é mantida uma estreita e harmônica integração da cobertura vegetal com o sistema físico, químico e biológico do solo, através de processos essenciais, como a ciclagem de nutrientes, pela formação e decomposição da matéria orgânica. O reconhecimento da importância dos microrganismos para a qualidade do solo e para a nutrição de plantas tem demandado um número de análises de diversos parâmetros microbiológicos. As plantas e microrganismos constituem um importante componente regulador da ciclagem de nutrientes no sistema solo planta. As atividades microbianas influenciam diretamente os atributos químicos, físicos e biológicos do solo, sendo a matéria orgânica e o manejo do solo importantes fatores que atuam na decomposição, imobilização e transformação dos ciclos dos elementos biogeoquímicos. O objetivo do trabalho foi fazer uma revisão de literatura sobre a atividade microbiana e as transformações por elas mediadas nos ciclos biogeoquímicos do nitrogênio, carbono, fósforo, enxofre e metais pesados.

PALAVRAS-CHAVE: Fixação biológica, macronutrientes, ciclagem de nutrientes, manejo

MICROBIAL ACTIVITY AND TRANSFORMATION IN THE CYCLE OF ELEMENTS IN SOIL

ABSTRACT

The increase in population, with a consequent increase in demand for food and other raw materials, has caused an increase in exploitation of natural resources. In natural ecosystems is maintained a close and harmonious integration of the system with the cover physical, chemical and biological soil through essential processes such as

nutrient cycling, the formation and decomposition of organic matter. The recognition of the importance of microorganisms for soil quality and for plant nutrition has led to a number of analyzes of various microbiological parameters. Plants and microorganisms are an important component regulator of nutrient cycling in the soil plant. The microbial activities directly influence the chemical, physical and biological soil organic matter and soil management and the important factors that act in the decomposition, immobilization and transformation of the biogeochemical cycles of the elements. The objective was to review the literature on microbial activity and the transformations they mediated biogeochemical cycles of nitrogen, carbon, phosphorus, sulfur and heavy metals.

KEYWORDS: biological fixation, macronutrients, nutrient cycling, management

INTRODUÇÃO

O aumento da população, com o conseqüente aumento na demanda por alimentos e outras matérias primas, tem causado um aumento na exploração dos recursos naturais de forma descontrolada, causando sérios prejuízos ao ambiente. O solo, a água e os microrganismos, são recursos naturais essenciais para a vida no planeta, porém são afetados cada dia mais pelo aumento na exploração agrícola, atividade industrial e urbanização.

Nos ecossistemas naturais é mantida uma estreita e harmônica integração da cobertura vegetal com o sistema físico, químico e biológico do solo, através de processos essenciais, como a ciclagem de nutrientes, pela formação e decomposição da matéria orgânica. O acúmulo de matéria orgânica na superfície do solo, em decorrência da produção de palhada pelas plantas, apresenta-se como fator fundamental para que sejam obtidas vantagens como a melhoria dos atributos químicos do solo, diminuição das perdas de solo por lixiviação e erosão, reciclagem de nutrientes e fornecimento gradativo dos mesmos para as culturas comerciais durante a decomposição (AMADO, 2000).

O adequado manejo dos resíduos vegetais produzidos num cultivo é capaz de maximizar a ciclagem dos nutrientes, aumentando assim a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, otimizando os recursos internos (CHAGAS et al., 2007). Quando o manejo é feito de forma correta a decomposição dos resíduos no solo aumenta a disponibilidade de nutrientes para as culturas que serão plantadas futuramente, propiciando maiores teores de N (TORRES et al., 2005), de P (TEIXEIRA et al., 2011), além de aumentar a disponibilidade de outros nutrientes nas camadas superficiais do solo (CALEGARI et al., 1992).

A biomassa microbiana é um dos principais componentes de um ecossistema natural ou alterado pelo homem, uma vez que atua na decomposição da matéria orgânica, alterando a disponibilidade de nutrientes para as plantas e influenciando as propriedades físicas do solo, como a estabilidade dos agregados (SIQUEIRA et al., 1994). O reconhecimento da importância dos microrganismos para a qualidade do solo e para a nutrição de plantas tem demandado um número de análises de diversos parâmetros microbiológicos em ensaios de avaliação de impactos ambientais. Segundo SOUZA et al., (2008) a avaliação do C e N da biomassa permite monitorar quantitativamente o impacto de novas tecnologias na microbiota do solo em culturas como a soja.

A comunidade microbiana do solo é influenciada pela temperatura, aeração,

disponibilidade de nutrientes e pelos substratos orgânicos, tendo sua estrutura reflexos diretos no potencial da imobilização de N, pois depende da relação C: N dos microrganismos, que variam entre espécies e grupos microbianos (VARGAS et al., 2004). Quando o suprimento de N pela mineralização da MO e pelas deposições atmosféricas não são suficientes para atender às necessidades das plantas, há adições suplementares de N, por meio de fertilização mineral ou orgânica, esta última via, por fixação biológica de N₂ (FBN) por leguminosas e podem constituir uma alternativa interessante (BINKLEY et al., 2000; FORRESTER et al., 2006; COELHO et al., 2006).

ALVES et al., (2006) observaram que a fixação biológica de nitrogênio inoculada com rizóbio e sob plantio direto em culturas de soja, proporciona alta produtividade de grãos e balanço positivo de N para o sistema, enquanto que o manejo adotado para o fertilizante nitrogenado nas culturas de milho e algodão pode resultar em balanço negativo, porém, mudanças nos estoques de carbono e nitrogênio do solo, em razão da utilização de sistemas agrícolas, podem ser determinadas pela avaliação na fração leve livre presente na matéria orgânica, FRAZÃO et al., (2010).

PEREZ et al. (2005) afirma que o manejo do solo também interfere no carbono da biomassa microbiana, promovendo sua diminuição no preparo intensivo do solo, como aração e gradagem e subsolagem e pouco se sabe sobre o efeito do preparo do solo no nitrogênio da biomassa microbiana e nitrogênio total em solos como de cerrados. ANDRADE et al., (2004) encontrou efeito negativo do Pb sobre o C da biomassa microbiana do solo com propágulos de FMA, o Pb altera a atividade da microbiota rizosférica, ocorrendo interação entre a presença de propágulos de FMA e o estágio de desenvolvimento da planta. A atividade da fosfatase alcalina é um indicador adequado na avaliação do stress causado pelo Pb no solo.

GATIBONI et al., (2007) e RHEINHEIMER et al., (2008) afirmaram que em solos bem adubados ou pouco intemperizados, o fósforo na forma inorgânica pode ser a principal fonte de P às plantas, enquanto em solos com baixos teores de P disponível, o P orgânico torna-se relevante para o sistema. Assim, quanto mais pobre em P disponível for o sistema, maior é a dependência das formas orgânicas, inclusive do P armazenado na biomassa microbiana, GATIBONI et al. (2008). No entanto, para o enxofre elementar (S⁰), este quando aplicado ao solo, somente é absorvido pelas plantas depois de sua oxidação a sulfato por meio de reações catalisadas, principalmente, por microrganismos (HOROWITZ & MEURER, 2006). O enxofre elementar aplicado às folhas é assimilado pela planta de soja, independentemente da dose e da natureza da fonte desse nutriente (VITTI et al., 2007).

O presente trabalho apresenta uma revisão de literatura sobre a atividade microbiana e as transformações por elas mediadas nos ciclos biogeoquímicos do nitrogênio, carbono, fósforo, enxofre e metais pesados.

NITROGÊNIO OS PROCESSOS E A RELAÇÃO COM OS MICRORGANISMOS

O processo pelo qual o nitrogênio circula através das plantas e do solo pela ação de organismos vivos é conhecido como ciclo do nitrogênio. Durante seu ciclo, o nitrogênio passa por processos conhecidos como, desnitrificação, mineralização, imobilização e nitrificação. Muitos trabalhos são realizados com o intuito de entender

melhor o ciclo desse elemento.

O nitrogênio é o nutriente mais exigido pelas plantas. Este elemento, porém, encontra-se quase totalmente complexado na forma orgânica (98%), dependendo da biomassa microbiana do solo (BMS), para a sua transformação e, conseqüente, absorção pelas plantas (COSER et al., 2007). A BMS representa a menor porcentagem de nitrogênio total do solo, mas é responsável pela reserva lábil e ciclagem de nutrientes, decomposição da matéria orgânica, fluxo de energia e é sensível às mudanças que ocorrem no solo, sendo, portanto uma boa indicadora de qualidade do solo (JACKSON et al., 2003).

A utilização de nitrogênio na adubação mostra benefícios às culturas em geral, mas existem indícios de que promove aumento da concentração de óxido nitroso (N_2O) na atmosfera, problema também relacionado à atividade industrial e considerado um dos causadores do aquecimento global e seus impactos negativos na agricultura e na sociedade em geral. O processo que envolve a redução bioquímica de formas oxidadas do N a formas gasosas (N_2 e N_2O), é um dos processos mais conhecidos e recebe o nome de desnitrificação (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006).

A liberação ou imobilização dos nutrientes depende da dinâmica dos microrganismos, da quantidade de resíduos vegetais, do rápido retorno e da eficiência de utilização de carbono pela microbiota. A imobilização microbiana do fertilizante nitrogenado é a principal causa da menor disponibilidade de N. Nas condições edafoclimáticas do Cerrado, a dupla incorporação dos restos culturais com arado de aiveca, no início da estação seca e no início das chuvas (outubro e novembro), diminui os teores de N no solo e, conseqüentemente o aproveitamento deste pela cultura do milho (FIGUEIREDO et al., 2005).

Com o avanço no melhoramento da genética das plantas e nas pesquisas em microbiologia do solo tornaram-se possíveis a obtenção de grande parte do nitrogênio requerido pela cultura, pelo uso de inoculantes com estirpes de rizóbio. A aplicação de nitrogênio favorece a população bacteriana, resultando em diminuição das relações C: N e C: nitrogênio reativo com ninidrina (N-Nin) da biomassa microbiana e em aumento da imobilização microbiana deste nutriente (VARGAS et al., 2004). A fixação biológica do nitrogênio em leguminosas é um importante processo que ocorre principalmente na cultura da soja. O plantio direto tem favorecido a FBN e ainda reduzido problemas na agricultura como, assoreamento, erosão entre outros problemas.

Em um experimento realizado por FIGUEIREDO et al., (2005), foram encontradas diferenças entre as dinâmicas de utilização do N fertilizante para os sistemas sob plantio direto indicando que o revolvimento realizado pelos arados de discos e de aivecas, para a correção química do solo, no primeiro ano do experimento, proporcionou um ambiente diferenciado nesses sistemas, que permanece ainda após alguns anos.

No cerrado em uma área de solo não perturbado de Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso, PEREZ et al., (2005), encontram resultados onde o nitrogênio da biomassa microbiana apresentou os maiores valores quando comparado a uma área com cultivo de soja, a avaliação foi feita em quatro épocas do ciclo da cultura. O nitrogênio microbiano e o nitrogênio total diminuíram com o aumento da profundidade (Tabela 1). Nesse caso a presença do nitrogênio variou com a profundidade. Outros autores também encontraram resultados mostrando que alguns nutrientes também podem diminuir a presença do nitrogênio, foi o caso de

SILVA et al., (2009), que encontraram efeito significativo do P sobre a quantidade de N na planta proveniente do fertilizante e dos adubos verdes e sobre o aproveitamento do N do fertilizante e dos adubos verdes.

TABELA 1. Nitrogênio total (N_{total}) e da biomassa microbiana (N_{mic}) e a relação porcentual entre essas duas variáveis, em razão das profundidades do solo e das épocas do ciclo da cultura da soja.

Profundidade (cm)	Cerrado	GR	SG	SD
Nitrogênio total (g N kg ⁻¹ de solo)				
0-5	1,42 a	1,21 b	1,19 b	1,36 a
5-10	1,17 a	1,10 a	1,08 a	1,18 a
10-20	0,97 a	0,86 b	1,05 a	0,99 a
20-30	0,77 a	0,70 a	0,75 a	0,77 a
30-40	0,61 a	0,57 a	0,54 a	0,54 a
Nitrogênio da biomassa microbiana (mg N kg ⁻¹ de solo)				
0-5	41,88 a	27,39 b	24,82 b	21,12 b
5-10	38,35 a	15,45 b	14,84 b	19,14 b
10-20	41,11 a	12,89 b	8,13 b	14,15 b
20-30	23,90 a	10,64 c	7,09 c	17,08 b
30-40	12,35 a	8,99 a	8,52 a	10,50 a
$N_{mic} : N_{total}$				
0-5	3,02 a	2,25 b	1,88 b	2,07 ab
5-10	3,37 a	1,52 b	1,41 b	1,65 b
10-20	4,22 a	1,68 b	0,82 c	1,40 bc
20-30	3,08 a	1,69 bc	0,97 c	2,26 ab
30-40	2,13 a	1,72 a	1,92 a	1,99 a

⁽¹⁾Para cada variável, médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; Cerrado *sensu stricto*; GR: uma gradagem; SG: uma subsolagem e duas gradagens; SD: semeadura direta da soja, sem revolvimento do solo.

FONTE: PEREZ et al., (2005)

Um importante processo no ciclo do nitrogênio é a nitrificação, é um processo realizado por bactérias quimioautotróficas e ocorre em duas etapas, primeiro a nitrificação, que é a transformação de amônio a nitrito e depois a nitratação, que é a transformação de nitrito a nitrato (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006). D'ANDRÉA et al., (2004), realizando um trabalho com estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo concluíram que a nitrificação atinge níveis insignificantes abaixo do pH 6,0 e em uma profundidade de 20 cm, os teores de amônio estiveram negativa e significativamente correlacionados com o pH do solo, além de variarem de modo diretamente proporcional ao teor de C da biomassa microbiana.

O nitrogênio sofre suas transformações de forma muito rápida. As práticas culturais atuam nas transformações do nitrogênio no solo e a melhor forma de garantir a produtividade no campo sem comprometer a sustentabilidade do planeta é a utilização bem planejada dos fertilizantes nitrogenados (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006).

CARBONO

As plantas e microrganismos constituem importantes componentes reguladores da ciclagem de nutrientes no sistema solo planta; sendo o carbono um dos elementos que participam diretamente desse processo regulatório, pois as plantas utilizam o carbono presente na atmosfera para produzir substâncias que farão parte de órgãos da planta. Quando a planta finaliza seu ciclo, os restos vegetais são depositados no solo, que passa a ser chamado de matéria orgânica e a ser utilizada pelos microrganismos, que dessa forma promove a regulação do ciclo dos principais nutrientes. Os microrganismos são responsáveis pela decomposição dos materiais orgânicos, imobilização, mineralização e transformação de compostos, promovendo a liberação de CO₂ para a atmosfera, liberação e transformação de nutrientes no solo, podendo estes terem aspectos positivos ou negativos.

Para que os microrganismos possam realizar a decomposição dos compostos orgânicos depositados no solo, utilizam o N presente no solo ou compostos orgânicos como fonte primária de energia para realizar a quebra de compostos de carbono, para assim absorvê-los e promover o crescimento da biomassa, por isso a relação C: N de muitas plantas podem influenciar na biomassa microbiana bem como na disponibilidade do nitrogênio. O nitrogênio pode ficar imobilizado não estando disponíveis para as plantas, quando o material orgânico apresentar uma alta relação C: N (>20), isso geralmente ocorre quando o solo recebe algum material rico em lignina, sendo característica intrínseca das gramíneas produzirem este composto.

Quando imobilizado o nitrogênio, passa a ser deficiente nas plantas, SILVA et al., (2009) trabalhando com o cultivo de gramíneas em monocultivo e consorciada com leguminosas, mostrou que milho e sorgo no sistema solteiro apresentam uma maior relação C: N, o que causa uma maior imobilização do nitrogênio disponível no solo quando os restos vegetais destas culturas forem depositados ao solo e iniciar o processo de degradação dos resíduos, portanto a consorciação de espécies de cobertura apresenta elevado potencial para incrementar a oferta de nitrogênio nos sistemas de produção. Isso se deve a maioria das espécies testadas, serem leguminosas, que apresentam capacidade de absorverem o N atmosférico por meio das bactérias fixadoras de nitrogênio e sintetizá-lo em compostos.

No solo, existe a necessidade de um manejo adequado, de forma que quando seu uso é incorreto, acarreta grandes problemas, como foi visto por VARGAS, et al. (2004), onde a presença do nitrogênio no solo além de limitar a produtividade das plantas exploradas, limita também a atividade da biomassa microbiana, dessa forma a aplicação do nitrogênio pode acarretar na diminuição desta relação. O manejo do solo pode influenciar no teor de carbono do solo assim como no carbono da biomassa microbiana, aqueles sistemas que causam menores perturbações aos solos tendem a apresentar maiores teores de carbono (VARGAS et al., 2004), dessa forma mantem se o equilíbrio do ecossistema.

PEREZ et al., (2004) trabalhando com a quantificação de carbono orgânico em diferentes tipos de manejo em um Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso no Cerrado, sendo os tipos de manejo, a semeadura direta da soja, uma subsolagem e uma gradagem e como parâmetro comparativo coletou amostras de solo em uma região com vegetação nativa, verificou um efeito linear na quantificação do carbono nas diferentes profundidades amostradas (0–5, 5–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm), de

forma que a quantidade de carbono decrescia de acordo com que se aprofundava a amostragem independentemente do manejo adotado (Figura 1), corroborando com os dados obtidos por D'ANDRÉA, et al., (2004), que verificou esse decréscimo de acordo com que se aprofundava a amostragem. Resultado semelhante foi observado por WENDLING et al., (2005) para a área de mata quando comparada com o sistema plantio direto (capim tifton) e sistema convencional, sendo esse efeito relacionado aos teores de argila dos solos, pois a argila confere ao carbono orgânico proteção coloidal maior e dificulta a degradação do material orgânico.

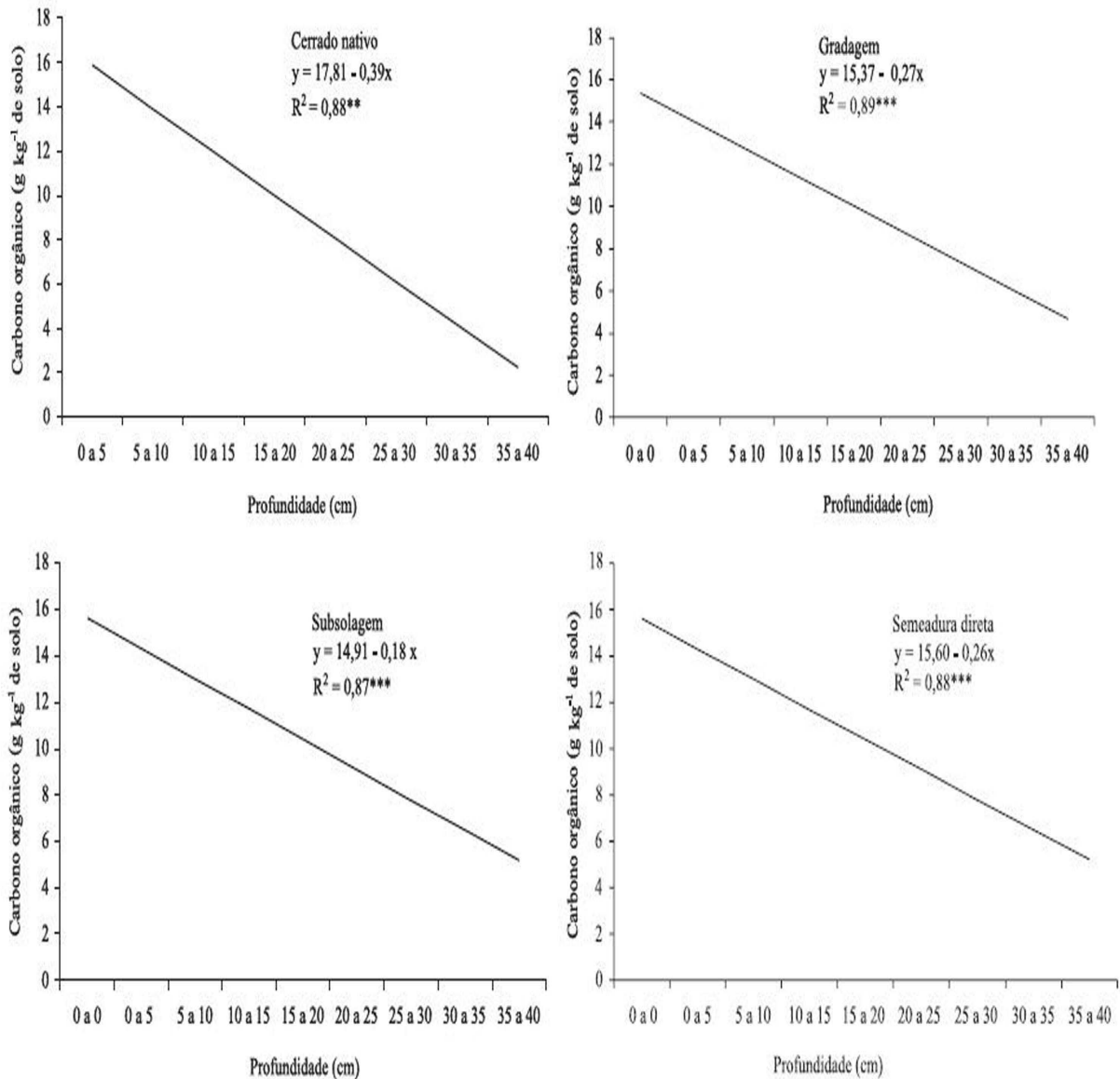


FIGURA 1. Relação entre o carbono orgânico e a profundidade do solo no cerrado nativo, no solo sob gradagem, no solo sob subsolação e no solo sob semeadura direta.

FONTE: PEREZ et al., 2004

A argila constitui um fator preponderante no estoque de carbono nos solos devido a essa propriedade coloidal, mesmo em solos com baixos teores de argila seu efeito é significativo, FRAZÃO et al., (2010) viram que isso pode ser verificado em solos de mesma classe como é o caso de um Neossolo Quartzarênico que apresentou variações na quantidade de argila nas diferentes áreas amostradas, onde aquela área que apresentou maior quantidade de argila obteve um maior estoque de carbono no solo mesmo sobre o sistema convencional de plantio.

De acordo com PEREZ et al., (2004), a subsolagem apresentou os maiores valores de carbono microbiano aos 30 dias após a germinação (865,7 mg kg⁻¹ de solo). Este valor foi reduzido para 80,3 mg. kg⁻¹ de solo na floração. Os valores de carbono na semeadura direta mantiveram-se mais estáveis, principalmente na camada de 0–20 cm. As camadas de 0–5 e 5–10 cm apresentaram diferença na maioria das épocas estudadas e das demais camadas. A subsolagem mostrou o menor valor do carbono orgânico do solo, após a colheita da soja, o elevado teor de carbono microbiano aos 30 dias após a germinação evidencia que houve um aumento populacional dos microrganismos no solo, sendo isso relacionado à degradação da matéria orgânica, já que estes utilizam a mesma como fonte de energia para completar o seu ciclo de vida.

Mas a redução do carbono orgânico no solo, para o sistema convencional não é regra, pois D'ANDRÉA, et al., (2004) não encontrou diferença entre o carbono orgânico do sistema plantio direto e o sistema convencional, apenas uma tendência de redução dos teores no sistema convencional, porém o equipamento utilizado para o preparo do solo pode ter influenciado, já que foi utilizada apenas uma gradagem e no primeiro caso foi feita uma subsolagem e duas gradagens, nesse caso o rompimento dos agregados do solo em partículas menores acabou expondo a matéria orgânica que se encontrava protegida fisicamente, além do aumento da aeração do solo que implica no aumento da atividade microbiana.

O material utilizado nos sistemas de plantio direto influencia de forma significativa os teores de C no solo. A gramínea usada no sistema de plantio direto possui um sistema radicular muito agressivo o que proporciona a deposição de restos vegetais ao longo do perfil do solo, além da parte aérea ser retirada para fenação o que implica a remoção da maior parte de matéria seca da cultura, o que poderia influenciar na quantidade de carbono nos primeiros 10 cm de camada de solo (WENDLING et al., 2005). Verificou-se que no cultivo, independente do manejo adotado, diminuiu drasticamente o teor de carbono orgânico no solo, isso está relacionado à taxa de deposição de materiais passíveis de decomposição dos microrganismos, é importante salientar que mesmo sendo o sistema plantio direto o revolvimento do solo é inevitável, só que em proporções e frequências menores, além de apresentar incidência direta dos raios solares sobre a matéria seca depositada sobre o solo, o que acelera a atividade microbiana.

SILVA et al., (2009), trabalhando com espécies florestais implantadas a mais de 20 anos verificou que mesmo em sistemas cuja perturbação é menos intensa, isto é, o revolvimento do solo apenas na época de plantio apresenta diminuição do carbono orgânico e do carbono microbiano quando comparada ao cerrado nativo, sendo os níveis de carbono microbiano metade em comparação ao cerrado (Tabela 1). Porém quando o cerrado é substituído por uma espécie nativa, como o caso do carvoeiro (*Sclerolobium paniculatum* Vogel) o teor de matéria orgânica aumenta significativa no solo ficando até acima da mata nativa solo, isso se deve a composição qualitativa da serapilheira e a quantidade produzida pelo carvoeiro em

relação ao pinus e eucalipto. Já que a oxidação biológica da matéria orgânica original do solo, decorrente do preparo e cultivo do solo e o declínio inicial da produção de serapilheira são iguais para as plantas cultivadas (SILVA et al., 2009).

TABELA 2. Propriedades biológicas do solo à profundidade de 0-10 cm.

Espécie	CBM	CBM/C _{org}	Fosfatase ácida	Ariilsulfatase	Beta- glicosidase
	-----(g kg^{-1})-----		-----($\mu \text{ p-nitrofenol g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)-----		
Eucalipto	183 b	1,07 b	1,118 b	79 b	85 a
Carvoeiro	223 b	0,92 b	1,452 a	113 a	71 ab
Pinus	169 b	0,95 b	541 c	33 c	69 b
Cerrado	453 a	2,00 a	1,171 b	83 b	76 ab

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

FONTE: SILVA et al., 2009

A utilização de plantas na recuperação de solos degradados é uma estratégia eficiente, por ela absorver os compostos tóxicos, ciclar nutrientes e estimular microrganismos que tem capacidade de quebrar compostos e/ou transformarem em elementos não tóxicos que podem ser absorvidos pelas plantas. Quando estimulada a biomassa microbiana pode promover efeitos benéficos ao solo, melhorando suas características físico-químicas. Em solos cultivados com *Atriplex nummulária* sob irrigação de rejeito salino proveniente da dessalinização da água, foram observados maiores teores de carbono microbiano após três anos de cultivo se igualando a área nativa que não recebeu o rejeito e nem o plantio de *Atriplex nummulária*, porém a área nativa apresentou uma emissão de CO₂ elevada se igualando a área com três anos de plantio, refletindo em maior quociente metabólico (qCO₂) indicando que a biomassa microbiana na área sem cultivo possui maior atividade metabólica do que nas áreas cultivadas (PEREIRA et al., 2004).

ENXOFRE E FÓSFORO

O enxofre é um dos elementos essenciais para as plantas, porém este é menosprezado por muitos produtores e técnicos por não ser requisitado em grandes proporções pelas plantas. Trata-se de um nutriente absorvido diretamente pelas plantas na forma de dióxido de enxofre (SO₂) presente na atmosfera. Essa forma de enxofre na maioria dos ambientes aparece em concentração relativamente baixa, já que de forma excessiva ela passa a ser prejudicial por provocar a chuva ácida. VITTI et al. (2007), demonstraram que o enxofre elementar (S⁰) aplicado nas folhas foi absorvido e acarretou no aumento da produção de grãos, semelhantemente à aplicação ao solo. A mesma produtividade com o uso de 20 kg ha⁻¹ de S⁰ no solo foi alcançada com a dose de 6 kg ha⁻¹ via foliar, resultando em um maior conteúdo de proteína solúvel total.

No solo o enxofre encontra-se na forma orgânica e inorgânica, passando aos microrganismos a função preponderante de realizar a oxidação e/ou redução química. Os microrganismos decompositores atuam diretamente sobre a palhada, tendo sua velocidade de degradação regulada pela umidade, temperatura, manejo do solo, aeração e o material a ser decomposto. A atuação destes microrganismos

regula a disponibilidade do enxofre no solo, atuando na liberação para o solo e posterior absorção pelas plantas.

CRUSCIOL et al. (2005) trabalhando com nabo forrageiro que apresenta uma palhada de baixa persistência no solo quando comparado às gramíneas, viram que quando manejado no florescimento, o nabo forrageiro pode produzir até três toneladas de fitomassa, sendo capaz de acumular $14,0 \text{ kg ha}^{-1}$, a sua liberação se dá nos primeiros 20 dias, sendo que aos 53 dias após a dessecação aproximadamente 80% do enxofre já foi liberado para o solo ou está retido na biomassa microbiana. Para o fósforo foi verificado um acúmulo de $15,3 \text{ kg ha}^{-1}$ e uma menor porcentagem de liberação 55,8% aos 53 dias após a dessecação, sendo a velocidade máxima atingida entre o 10º e 20º dia após a dessecação, isso demonstra uma rápida ação dos microrganismos decompositores tornando esse nutriente disponível no sistema ou retido em sua biomassa.

Estimativas recentes apontam que, em todo o planeta, grande parte das terras produtivas apresentam concentrações de fósforo (P) insuficientes para sustentar o potencial produtivo das culturas agrícolas (HINSINGER, 2001). A baixa disponibilidade desse elemento para as plantas é atribuída a grande reatividade e a alta taxa de retenção de seus íons no solo (MENDES & JÚNIOR, 2003). É nesse momento em que torna se importante a presença dos microrganismos no solo. Além de o P imobilizado na biomassa microbiana constituir-se num reservatório lábil desse nutriente, os microrganismos do solo também desempenham papel fundamental nos processos de mineralização e solubilização desse elemento.

TOKURA et al. (2002) monitorando o fósforo em duas profundidades (0-5 e 5-10) em diferentes tipos de solos em plantio direto e área adjacente (controle) demonstrou que a camada mais superficial em ambas as áreas encontra se a maior fração de P. Com o tempo, no cultivo sob plantio direto, em uma mesma classe de solo, a participação das formas de P não-lábeis em relação ao P total começaram a diminuir, sendo acompanhada por um aumento relativo das formas mais lábeis. O fósforo não lábil constitui uma fração não absorvida pelas plantas, considera se essa fração como a fração perdida de fósforo, sendo dificilmente retornada ao sistema.

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) colonizam quase todas as plantas, sob condições naturais de campo e produção de mudas, os FMAs colonizam as raízes da planta hospedeira promovendo uma simbiose onde as FMAs promovem o aumento da zona de absorção das raízes, mediante o desenvolvimento de hifas externas, que crescem além da zona de depleção, favorecendo o aporte de nutrientes, especialmente do fósforo, esses efeitos positivos foram evidenciados por ANJOS et al. (2005) e ROCHA et al., (2006) em mudas de maracujá-doce e cedro respectivamente. Esse mesmo efeito benéfico das micorrizas pode se estender até o pós-plantio como evidenciado por SILVEIRA et al. (2002) trabalhando com o abacateiro.

O efeito benéfico dos FMAs se estendem também as culturas anuais como evidenciado por MIRANDA et al. (2005) que trabalhando com capim-andropógon e soja cultivados na presença e ausência de FMAs nativos de suas respectivas áreas de cultivo e coleta de solo verificaram que as plantas cultivadas com presença de FMAs apresentaram um incremento em altura de 95% e 53% respectivamente quando comparado ao solo sem FMAs.

METAIS PESADOS

No solo, a contaminação por metais pesados causa grande interferência nas diversas formas de vida e no funcionamento dos ecossistemas como um todo. Uma das consequências é a dificuldade em reflorestar as áreas contaminadas, sendo assim, há um grande interesse nos microrganismos do solo capazes de minimizar a toxidez destes metais no ambiente.

Processos como mineralização de materiais orgânicos, amonificação, fixação biológica de N₂, nitrificação, dentre outros, podem ser afetados diretamente pela contaminação com metais ou, indiretamente, pelos efeitos tóxicos desses metais sobre as plantas, causando decréscimo na quantidade de substratos liberados na região rizosférica (JÚNIOR et al, 1998).

Atualmente, a contaminação dos solos por metais pesados (MP) é um grave problema ambiental, por causa da sua persistência e alto poder de toxicidade (REDDY & PRASAD, 1990; ANDRADE et al., 2004). Entre os MP, o Pb, além de ser potencialmente tóxico, é pouco estudado em relação ao seu efeito na microbiota do solo, especialmente em solos tropicais. Os efeitos prejudiciais dos MP no solo podem ser medidos pela biomassa microbiana (BROOKES & MACGRATH, 1984; ANDRADE et al., 2004). KANDELER et al., (1996); ANDRADE et al., (2004) avaliaram, além da biomassa e respiração, a atividade de 13 enzimas envolvidas nos ciclos do C, N, P e S e constataram que nos solos contaminados com MP, houve significativa redução da biomassa microbiana e nas atividades enzimáticas envolvidas na ciclagem de N, P e S. ANDRADE et al., (2004), pesquisando sobre a biomassa e atividade microbiana do solo sob influência de chumbo e da rizosfera da soja micorrizada, observou que o Pb disponível no solo correlacionou-se negativamente com o C da biomassa (Figura 2). O C da biomassa microbiana do solo com propágulos de FMA, amostrado na época do florescimento da planta, diminuiu em 60%, na maior dose de Pb adicionada, o que poderia ser devido, em parte, a uma redução na quantidade de micélio externo do FMA decorrente do excesso de Pb no solo.

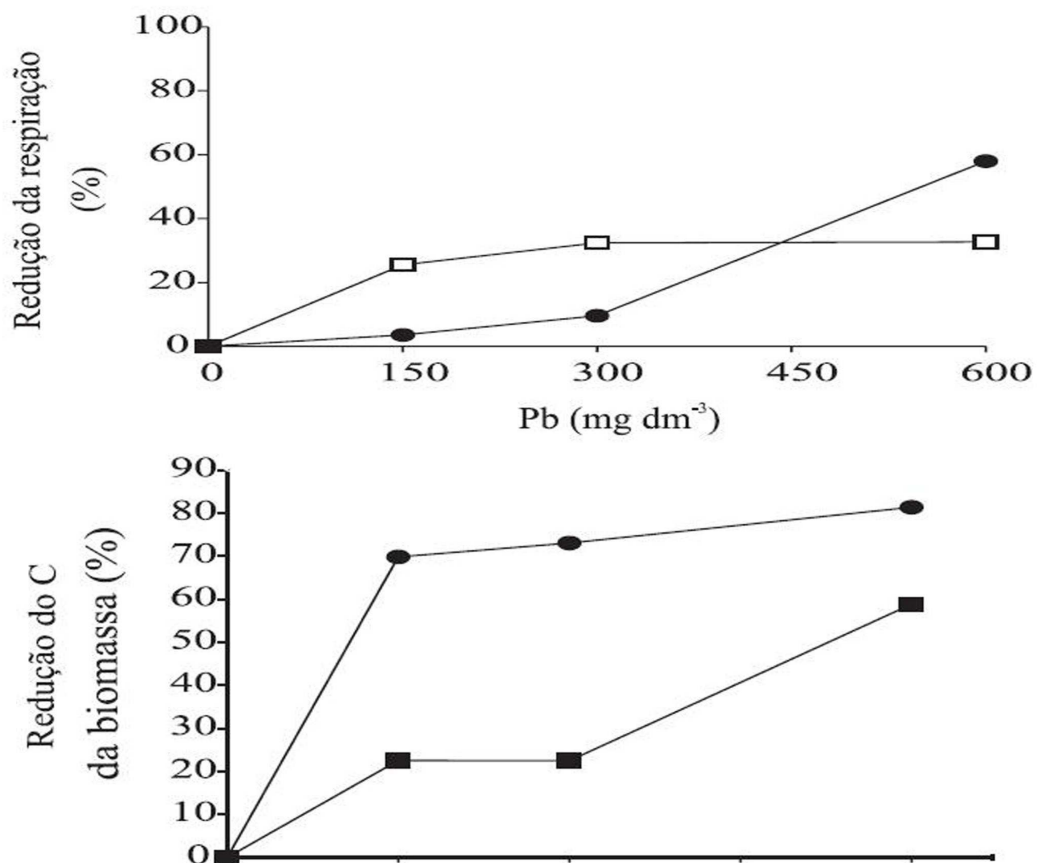


FIGURA 2. Redução da respiração e do C da biomassa microbiana em função das doses de Pb (■ com FMA e □ sem FMA, no florescimento da soja; ■ com FMA e □ sem FMA, na maturação da soja).

FONTE: ANDRADE et al., 2004

A microbiota do solo é influenciada negativamente pela adição de Pb ao solo. Atividades relacionadas com a ciclagem de nutrientes poderiam ser prejudicadas pela contaminação por MP, os quais têm alta permanência no solo, sendo de difícil remoção, o que pode acarretar na diminuição da mineralização da matéria orgânica. Para que haja uma reabilitação dos solos degradados, há a necessidade de uma restauração ou estimulação da atividade biológica, para isso são necessários avanços no entendimento do impacto da contaminação sobre os microrganismos do solo e seus processos e da contribuição destes na remediação de solos poluídos com metais pesados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As atividades microbianas influenciam diretamente os atributos químicos, físicos e biológicos do solo, sendo a matéria orgânica e o manejo do solo importantes fatores que atuam na decomposição, imobilização e transformação dos ciclos dos elementos biogeoquímicos. Além de contribuírem de forma direta e indireta para reduzir o impacto da atuação do homem, os microrganismos e seus processos, atuam como agentes no combate a poluição do meio ambiente. Todos os processos e mecanismos apresentados são potencialmente aplicáveis, objetivando a melhoria quantitativa e qualitativa da produção agrícola e a sustentabilidade

ambiental.

REFERÊNCIAS

ALVES, B. J. R. et al. **Fixação biológica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.41, n.3, p.449-456, 2010.

AMADO, T.J.C. et al. Leguminosas e adubação mineral como fontes de nitrogênio para o milho em sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v.24 p.179-189, 2000.

ANJOS, E. C. T. et al. **Produção de mudas de maracujazeiro-doce micorrizadas em solo desinfestado e adubado com fósforo.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.40, n.4, p.345-351, 2005.

ANDRADE, S. A. L.; SILVEIRA, A. P. D. S. **Biomassa e atividade microbianas do solo sob influência de chumbo e da rizosfera da soja micorrizada.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 39, n. 12, p. 1191-1198, 2004.

BINKLEY, D.; GIANDINA, C.; BASHKIN, M. A. Soil phosphorous pools and Supply under the influence of Eucalyptus saligna and nitrogen fixing Albizia facaltaria. **Forest Ecology and Management**, v.128, p.241-247, 2000.

BROOKES, P. C.; MACGRATH, S. P. Effects of metal toxicity on the size of the soil microbial biomass. **Journal of Soil Science**, v.35, p.341-346, 1984.

CALEGARI, A. **Plantas para adubação verde de inverno no sudoeste do Paraná.** IAPAR, Londrina, Boletim técnico 35, 1990. 37 p.

CHAGAS, E. et al. Decomposição e liberação de nitrogênio, fósforo e potássio de resíduos da cultura do feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.723-729, 2007.

COELHO, S. R. F. et al. **Crescimento, nutrição e fixação biológica de nitrogênio em plantiosmistas de eucalipto e leguminosas arbóreas.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.41, n.3, p.449-456, 2006.

COSER, T. R. et al. **Nitrogênio da biomassa microbiana em solo de Cerrado com aplicação de fertilizante nitrogenado.** Pesquisa agropecuária Brasileira, Brasília, v.42, n.3, p.399-406, 2007.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. **Persistência de palhada e liberação de nutrientes do nabo forrageiro no plantio direto.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.40, n.2, p.161-168, 2005.

D'ANDRÉA, A. F. et al. **Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.39, n.2, p.179-186, 2004.

FIGUEIREDO, C. C. et al. **Sistemas de manejo na absorção de nitrogênio pelo milho em um Latossolo Vermelho no Cerrado**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.40, n.3, p.279-287, 2005.

FRAZÃO, L. A. et al. **Estoque de carbono em Neossolo Quartzarênico sob uso agrícola**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.45, n.10, p.1098-1204, 2010.

FORRESTER, D. I. et al. Mixed-species plantations of Eucalyptus with nitrogen-fixing trees: a review. **Forest Ecology and Management**, v.233, p.211-230, 2006.

GATIBONI, L. C. et al. **Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatases ácidas durante a diminuição do fósforo disponível no solo**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.43, n.8, p.1085-1091, ago. 2008.

GATIBONI, L. C. et al. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.691-699, 2007.

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil, The Hague**, v. 237, p. 173-195, 2001.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Oxidação do enxofre elementar em solos tropicais. **Ciência Rural**, v.36, p.822-828, 2006.

JACKSON, L. E. et al. Responses of soil microbial processes and community structure to tillage events and implications for soil quality. **Geoderma**, v.114, p. 305-317, 2003.

JÚNIOR, H. E. D. et al. Metais pesados, densidade e atividade microbiana em solo contaminado por rejeitos de indústria de zinco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.631-640, 1998.

KANDELER, E.; KAMPICHLER, C.; HORAK, O. Influence of heavy metals on the functional diversity of soil microbial communities. **Biology and Fertility of Soils**, v.23, p.299-306, 1996.

MENDES, I. C.; JUNIOR, F. B. R. **Microrganismos e disponibilidade de fósforo (P) nos solos: Uma análise crítica**. Embrapa Cerrados, Planaltina – DF, Documento 85, 2003. 26p.

MIRANDA, J. C. C.; VILELA, L.; MIRANDA, L. N. **Dinâmica e contribuição da micorriza arbuscular em sistemas de produção com rotação de culturas**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.40, n.10, p.1005-1014, 2005.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2. ed. Lavras: Editora UFLA, v.1. 2006. 729 p.

PEREIRA, S. V.; MARTINEZ, C. R.; PORTO, E. R.; OLIVEIRA, B. R. B.; MAIA, L. C. **Atividade microbiana em solo do Semi-Árido sob cultivo de *Atriplex nummulária***. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.39, n.8, p.757-762, 2004.

PEREZ, K. S. S.; RAMOSE, M. L. G.; MCMANUS, C. **Carbono da biomassa microbiana em solo cultivado com soja sob diferentes sistemas de manejo nos Cerrados**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.39, n.6, p.567-573, 2004.

PEREZ, K. S. S.; RAMOS, M. L. G.; MCMANUS, C. **Nitrogênio da biomassa microbiana em solo cultivado com soja, sob diferentes sistemas de manejo, nos cerrados**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 40, n. 2, p.137-144, 2005.

REDDY, G. N.; PRASAD, M. N. V. Heavy metal binding proteins/ peptides: Ocurrence, structure, synthesis and functions. A review. **Environmental and Experimental Botany**, v.30, p.251-264, 1990.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. **Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 36, p. 151-160, 2001.

ROCHA, F. S. et al. **Dependência e resposta de mudas de cedro a fungos micorrízicos arbusculares**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.41, n.1, p. 77-84, 2006.

SILVA, P. C. G. et al. **Fitomassa e relação C/N em consórcios de sorgo e milho com espécies de cobertura**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.44, n.11, p.1504-1512, 2009.

SILVA, L. G. et al. **Atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo de cerrado em plantio de espécies florestais**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.44, n.6, p.613-620, 2009.

SILVA, E. C. et al. **Aproveitamento de nitrogênio pelo milho, em razão da adubação verde, nitrogenada e fosfatada**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.44, n.2, p.118-127, 2009.

SILVEIRA, S. V.; SOUZA, P. V. D.; KOLLER, O. C. **Efeito de fungos micorrízicos arbusculares no desenvolvimento do abacateiro**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.37, n.11, p.1597-1604, 2002.

SIQUEIRA, J. O. et al. **Microrganismos e processos biológicos no solo: perspectiva ambiental**. Brasília, Embrapa-SPI, 1994. 142p.

SOUZA, R. A. et al. **Avaliação qualitativa e quantitativa da microbiota do solo e da fixação biológica do nitrogênio pela soja**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.43, n.1, p.71-82, 2008.

TEIXEIRA, et al. Decomposição e liberação de nutrientes da parte aérea de plantas

de milho e sorgo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.3, p.867-876, 2011.

TOKURA, A. M. et al. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.10, p.1467-1476, 2002.

TORRES, J. L. R. et al. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.609-618, 2005.

VARGAS, L. K. SELBACH, P. B.; SÁ, E, L, S. **Alterações microbianas no solo durante o ciclo do milho nos sistemas plantio direto e convencional**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.39, n.8, p.749-755, 2004.

VITTI, G, C. et al. **Assimilação foliar de enxofre elementar pela soja**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.42, n.2, p.225-229, 2007.

WENDLING, B. et al. **Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.40, n.5, p.487-494, 2005.