

DIVISÃO 3 - USO E MANEJO DO SOLO

Comissão 3.1 - Fertilidade do solo e nutrição de plantas

ATRIBUTOS BIOQUÍMICOS E QUÍMICOS DO SOLO RIZOSFÉRICO E NÃO RIZOSFÉRICO DE CULTURAS EM ROTAÇÃO NO SISTEMA DE SEMEADURA DIRETA⁽¹⁾

Meire Aparecida Silvestrini Cordeiro⁽²⁾, José Eduardo Corá⁽³⁾ & Ely Nahas⁽⁴⁾

RESUMO

Sistemas autossustentáveis favorecem as populações microbianas devido à conservação e ao aumento da matéria orgânica no solo. Além disso, as plantas que fazem parte desses sistemas promovem o efeito rizosférico, por meio da zona de influência das raízes, que resulta no aumento da atividade e na modificação da população microbiana. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da rotação de culturas de inverno sobre sequências de verão, em sistema de semeadura direta, nos atributos bioquímicos (amilase, urease, celulase e protease) e químicos (carbono orgânico total - COT, carboidratos totais e proteínas totais) em solo rizosférico (SR) e não rizosférico (SNR). Este estudo foi constituído de três culturas de inverno: milho (*Zea mays* L.), girassol (*Helianthus annuus* L.) e guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp), que estavam em rotação sobre três sequências de verão: soja/soja (*Glycine max* L.), milho/milho e soja/milho, e duas posições no solo: solo aderido às raízes das plantas (SR) e solo da entrelinha de plantio (SNR). As atividades da amilase, celulase, protease e urease no SR foram 16, 85, 62 e 100 % maiores do que no SNR; para COT e proteínas totais a diferença foi de 21 %. Das culturas de inverno, o milho foi a que mais estimulou as atividades das enzimas amilase, celulase, urease e protease no SR, bem como a atividade das enzimas amilase, urease e protease no SNR. De modo geral, os teores de proteínas totais não foram influenciados pelas culturas de inverno e pelas sequências de verão; os carboidratos totais foram influenciados pelas culturas de inverno milho e girassol. Para o COT houve influência apenas da sequência de verão milho/milho. Os atributos bioquímicos e químicos avaliados neste estudo podem ser utilizados como indicadores das alterações no solo promovidas pelas culturas de inverno e pelas sequências de verão.

Termos de indexação: enzimas do solo, efeito rizosférico, atividade microbiana.

⁽¹⁾ Trabalho extraído da Tese de Doutorado da primeira autora. Recebido para publicação em 24 de novembro de 2011 e aprovado em 02 de outubro de 2012.

⁽²⁾ Doutora em Agronomia (Ciência do Solo). Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP/FCAV - Campus de Jaboticabal. Rodovia Paulo Donato Castellane, s/n. CEP 14883-260 Jaboticabal (SP). E-mail: meiresilves@yahoo.com.br

⁽³⁾ Professor Adjunto do Departamento de Solos e Adubos, UNESP/FCAV. E-mail: cora@fcav.unesp.br

⁽⁴⁾ Professor Titular do Departamento de Produção Vegetal, UNESP/FCAV. E-mail: enahas@fcav.unesp.br

SUMMARY: BIOCHEMICAL AND CHEMICAL ATTRIBUTES OF RHIZOSPHERIC AND NON-RHIZOSPHERIC SOIL IN NO TILL CROP ROTATION SYSTEM

*Self-sustaining systems encourage microbial populations due to the conservation and improvement of organic matter in the soil. In addition, the plants constituents of these systems produce the rhizospheric effect through the influence zone of the roots, increasing activity and modifying the microbial population. The objective of this study was to evaluate the effect of winter crop rotation and summer crop sequences in a no tillage system, based on biochemical (amylase, urease, cellulase, and protease) and chemical (organic carbon, total carbohydrates, and total protein) characteristics in rhizospheric (SR) and non-rhizospheric soil (SNR). Three winter crops were studied: corn (*Zea mays L.*), sunflower (*Helianthus annuus L.*), and pigeon pea (*Cajanus cajan (L.) Millsp.*), in rotation with three summer sequences: soybean/soybean (*Glycine max L.*), corn/corn, and soybean/corn. Samples were taken from soil adhering to the plant roots (SR) and from in-between the rows (SNR). The activities of amylase, cellulase, protease, and urease in SR were 16, 85, 62, and 100 % higher, respectively, than in SNR. For total organic carbon and total protein, the difference was 21 %. Of the winter crops, corn stimulated higher amylase, cellulase, protease, and urease activity in SR, as well as amylase, protease, and urease activity in SNR. The winter crops and the summer sequences did not affect total protein levels. The total carbohydrates were influenced by winter corn and sunflower crops. Only the summer corn/corn sequence influenced total organic carbon. The biochemical and chemical properties analyzed in this study can be used as indicators of changes in soil caused by winter crops and summer sequences.*

Index terms: soil enzymes, rhizospheric effect, microbial activity.

INTRODUÇÃO

Os microrganismos são fundamentais para manutenção da qualidade do solo devido a seu envolvimento na dinâmica da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e decomposição de resíduos vegetais (Acosta-Martínez et al., 2008). O manejo do solo altera a comunidade microbiana; mesmo assim, o sistema de semeadura direta pode ser considerado autossustentável, visto que favorece a conservação e o aumento da matéria orgânica do solo (MOS) e o aumento das populações microbianas (Doran et al., 1998). A rotação de culturas, fazendo parte do sistema de semeadura direta, promove mudanças na qualidade e quantidade de resíduos comparada aos monocultivos, altera a biomassa microbiana e a dinâmica da comunidade microbiana, alterando a ciclagem de carbono (C) e nitrogênio (N) por meio de mudanças na decomposição dos resíduos vegetais (Wright et al., 2008).

Além dos resíduos de cultura, as plantas exercem influência decisiva no aumento e na diversidade microbiana devido à zona de influência das raízes. O ambiente da rizosfera é bastante complexo, resultante da liberação de células, mucilagens, exsudados e lisados que contêm aminoácidos, enzimas, proteínas, açúcares, carboidratos complexos, álcoois, vitaminas e hormônios (Kluepfel, 1993). Esses compostos são prontamente utilizados pelos microrganismos, promovendo o chamado efeito rizosférico, que é o aumento da atividade e a modificação da comunidade

microbiana na rizosfera (Daane et al., 2001). Esse efeito é também causado pela ação direta de enzimas derivadas das raízes e por diversas ações indiretas, como a maior aeração do solo em função da distribuição das raízes (Herman et al., 2006).

A comunidade rizosférica é formada por microrganismos com diferentes tipos de metabolismo e respostas adaptativas a variações em função de tipo de solo, espécie de plantas, estado nutricional, idade, estresse, doenças, entre outros fatores (Cardoso & Nogueira, 2007). O ensaio de uma variedade de enzimas do solo dá uma indicação da diversidade de funções que pode ser assumida pela comunidade microbiana (Claassens et al., 2008). As enzimas do solo são utilizadas como indicadores para medir a qualidade do solo por serem sensíveis ao seu manejo e por estarem diretamente relacionadas com as transformações dos nutrientes (Yang et al., 2008) e da comunidade microbiana (Araújo & Monteiro, 2007). A quantificação da atividade enzimática do solo pode fornecer informações acerca das alterações nos processos metabólicos, contribuindo para melhor compreensão sobre os efeitos das práticas de manejo e uso empregadas no solo (Carneiro et al., 2008).

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da rotação de culturas de inverno e sequências de verão em sistema de semeadura direta nos atributos bioquímicos (amilase, urease, celulase e protease) e atributos químicos (carbono orgânico total, carboidratos totais e proteínas totais) em solo rizosférico (SR) e solo não rizosférico (SNR).

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área experimental e sistemas de manejo cultural

O estudo foi conduzido em 2008 na safra de inverno, no campo experimental da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, campus de Jaboticabal (FCAV-UNESP), localizada ao norte do Estado de São Paulo, definida pelas coordenadas 21° 25' S e 48° 18' W, sob solo classificado como Latossolo Vermelho eutrófico (Embrapa, 1999), cujas características químicas e físicas da camada de 0-15 cm foram: pH (CaCl₂) = 5,4; matéria orgânica = 25 g dm⁻³, P (resina) = 36 mg dm⁻³; K = 4,0 mmol_c dm⁻³; Ca = 35 mmol_c dm⁻³; Mg = 18,0 mmol_c dm⁻³; H+Al = 30 mmol_c dm⁻³; CTC = 87,8 mmol_c dm⁻³; V = 65 %; areia = 370 g kg⁻¹; silte = 65 g kg⁻¹, e argila = 565 g kg⁻¹.

O clima, segundo a classificação de Köppen, é Cwa, denominado clima mesotérmico com inverno seco, e chuvoso no verão, com temperatura média de 22 °C, variando de 17 a 29 °C.

A área experimental foi cultivada com milho e soja em sistema convencional, utilizando revolvimento do solo com grades de disco e arado por mais de 20 anos. O sistema de semeadura direta foi implantado em 2002, utilizando-se blocos casualizados em faixas. Os tratamentos foram constituídos de três sequências de verão: soja (*Glycine max* L.) e milho (*Zea mays* L.) em monocultivo e de forma alternada em cada safra, soja e milho, denominadas respectivamente: soja/soja, milho/milho e soja/milho, combinando, no ano seguinte, com sete culturas de inverno: girassol (*Helianthus annuus* L.), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.), milheto (*Pennisetum americanum* (L.) Leeke), guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp), sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), crotalária (*Crotalaria juncea* L.) e milho (considerado neste estudo também como uma cultura de inverno). Esse sistema de cultivo foi repetido nos anos seguintes. Dessa forma, no mês de outubro de 2007, foram semeadas as culturas de verão, que foram colhidas no mês de março de 2008, sendo realizada a seguir a semeadura das culturas de inverno, ainda no mês de março.

As recomendações técnicas para as culturas foram mantidas no decorrer dos anos agrícolas. A aplicação de inseticidas, herbicidas e fungicidas, quando necessária, foi realizada nas diferentes culturas, conforme recomendação técnica. Os critérios para adubação foram estabelecidos conforme descrito por Rajj et al. (1997), com base na análise química do solo, sendo utilizada adubação de semeadura de 300 kg ha⁻¹ da mistura de grânulos 08-20-20 (NPK) para a cultura de milho no verão e aplicação de 450 kg ha⁻¹, em cobertura, de sulfato de amônio. Para a soja foram utilizados 200 kg ha⁻¹ da mistura 00-20-20, com inoculação das sementes com *Bradyrhizobium japonicum*. As culturas de inverno não foram adubadas.

Delineamento experimental e análise estatística

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, no esquema com faixas e três repetições. As parcelas experimentais ocupavam uma área de 600 m² (40 m de comprimento por 15 m de largura cada). Por ocasião das avaliações, foi considerado o efeito bordadura, tornando assim a área útil da parcela de 20 m de comprimento por 10 m de largura, que corresponde a 200 m².

Para este estudo foram efetuadas as coletas em duas posições no solo: solo rizosférico (SR) e solo não rizosférico (SNR). Foram selecionadas três culturas de inverno (milho, girassol e guandu), que estavam nas parcelas em rotação com as três sequências de verão (soja/milho, milho/milho e soja/soja), anteriormente cultivadas nas faixas, totalizando 18 tratamentos. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5 % pelo programa estatístico SISVAR (Ferreira, 2008).

Amostragem e preparo das amostras de solo

No início do florescimento, em junho de 2008, foram retiradas 20 amostras simples de solo de cada parcela experimental para compor uma amostra composta. Para amostragem do SR, 20 plantas inteiras foram retiradas e realizou-se a separação cuidadosa das raízes em laboratório, sendo o solo aderido a estas considerado como solo rizosférico. As raízes com solo aderido foram colocadas em sacos plásticos e agitadas manualmente, para o máximo aproveitamento do SR.

As amostras do SNR foram coletadas nas entrelinhas da parcela útil, na profundidade de 0-15 cm, com auxílio de um trado holandês. Todas as amostras foram peneiradas (2 mm), retirando-se todo material estranho (folhas, insetos, galhos etc.). Parte de cada amostra foi mantida em geladeira até o momento das análises e parte foi seca ao ar (TFSa) e conservada em temperatura ambiente.

Análises bioquímicas e químicas do solo

Foram avaliadas as atividades das enzimas do solo associadas ao ciclo do C (celulase e amilase) e do N (urease e protease). A celulase foi analisada conforme método descrito por Kanazawa & Miyashita (1986), e a amilase, conforme descrito por Cole (1977). Esses métodos consistem na incubação das amostras de solo na presença de substratos específicos, carboximetil celulose e amido, respectivamente, ambos a 10 mg mL⁻¹, em temperatura de 50 °C para celulase e de 37 °C para amilase, por 24 h. A concentração de glicose foi medida em espectrofotômetro (com comprimento de onda de 660 nm) pelo método dos açúcares redutores de Somogy-Nelson (Somogy, 1952), sendo expressa em µg glicose g⁻¹ solo 24 h⁻¹.

A urease foi determinada como proposto por McGarity & Myers (1967), realizando-se a incubação das amostras de solo por 3 h, a 37 °C, utilizando-se

ureia 1 % como substrato, seguida de centrifugação e determinação. Os resultados foram calculados a partir de uma curva-padrão com solução de sulfato de amônio e expressos em $\mu\text{g N-NH}_4 \text{ g}^{-1} \text{ solo } 3 \text{ h}^{-1}$. A protease foi determinada pelo método descrito por Nannipieri et al. (1979), que consiste na incubação das amostras de solo com caseína 1 % como substrato, por 1 h, em temperatura de 52 °C e pH 8,1, seguida da determinação da quantidade de tirosina liberada por meio da reação com o reagente Folin. A atividade da protease foi expressa em $\mu\text{g tirosina g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$.

O teor de carbono orgânico total (COT) foi determinado conforme método descrito por Sims & Haby (1971), com solução de dicromato de potássio e ácido sulfúrico. O cálculo dos teores foi feito com base numa curva-padrão determinada com solução de sacarose 7 %, expressos em $\text{mg C g}^{-1} \text{ solo}$. O teor dos carboidratos totais foi determinado após incubação com ácido sulfúrico por 24 h, conforme descrito por Angers & Mehuys (1989), e calculado com base numa curva-padrão de glicose, expresso em $\mu\text{g C g}^{-1} \text{ solo}$. O teor das proteínas totais do solo foi determinado utilizando-se método descrito por Wrigth & Upadhyaya (1996) para a extração com solução de citrato, e a determinação foi realizada conforme Hartree (1972). Os resultados foram expressos em $\mu\text{g proteína g}^{-1} \text{ solo}$, após cálculos com base numa curva-padrão determinada com BSA (albumina de soro bovino). Em todas as análises foram efetuadas três repetições para cada amostra de solo.

RESULTADOS

A atividade da amilase no SR e SNR variou de 148 a 250 $\mu\text{g glicose g}^{-1} \text{ solo } 24 \text{ h}^{-1}$ (Figura 1a,b). Maior atividade da enzima foi observada apenas no SR em relação ao SNR na cultura de girassol (Figura 1a) e na sequência soja/soja (Figura 1b). Tanto no SR como no SNR das culturas de inverno, a maior atividade foi observada no solo sob milho, que diferiu significativamente ($p < 0,05$) da atividade do solo sob girassol (Figura 1a). A atividade da amilase foi maior no SR do que no SNR da sequência soja/soja. Foram verificados resultados semelhantes entre o SR das sequências de verão, porém foi maior ($p < 0,05$) no SNR das sequências soja/milho e milho/milho que no de soja/soja (Figura 1b).

Exceto na sequência soja/milho, o SR, tanto das culturas de inverno (Figura 1c) como das sequências de verão (Figura 1d), mostrou maior ($p < 0,05$) atividade da urease que o SNR. Em média, a atividade do SR foi 100 % maior do que a do SNR. O milho promoveu os maiores valores da atividade da urease tanto no SR como no SNR quando comparado ao guandu, sendo a atividade significativamente igual à observada no solo sob girassol (Figura 1c). No SR das sequências milho/milho e soja/soja foram observados valores superiores aos obtidos no solo milho/soja; no SNR as atividades de todas as sequências foram iguais (Figura 1d).

À semelhança da atividade da urease, o SR, tanto das culturas de inverno (Figura 1e) como das sequências de verão (Figura 1f), mostrou maior ($p < 0,05$) atividade da celulase que o SNR, exceto na cultura do guandu. A atividade do SR também foi consideravelmente maior (85 %) do que no SNR. O SR da cultura do milho promoveu maior atividade enzimática (334 $\mu\text{g glicose g}^{-1} \text{ solo } 24 \text{ h}^{-1}$) e foi maior que nas demais culturas de inverno (Figura 1e). Nenhum efeito da sequência de verão foi verificado sobre a atividade da celulase, tanto no SR como no SNR (Figura 1f).

A atividade da protease variou de 34 a 84 $\mu\text{g tirosina g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ no SR e de 16 a 67 $\mu\text{g tirosina g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$ no SNR (Quadro 1). Esses resultados mostram que a atividade da enzima foi em média 62 % maior no SR em relação ao SNR. A análise de variância mostrou efeito significativo na interação tripla (culturas de inverno x sequências de verão x SR e SNR). Assim, comparações significativas ($p < 0,05$) entre SR e SNR foram encontradas nos solos sob as culturas de milho e guandu, ambos nas sequências de verão milho/milho, e girassol nas sequências soja/milho e soja/soja (Quadro 1). A cultura de inverno milho proporcionou maior atividade da protease no SR (84,1 $\mu\text{g tirosina g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) e SNR (67,1 $\mu\text{g tirosina g}^{-1} \text{ solo h}^{-1}$) sob as sequências milho/milho e soja/milho, respectivamente. A menor atividade da enzima foi encontrada tanto no SR como no SNR sob a influência da sequência soja/soja.

De maneira geral, os maiores valores do carbono orgânico total (COT) ($p < 0,05$) foram observados no SR em comparação ao SNR (Quadro 1). Os teores de COT foram, em média, 21 % maiores no SR em relação ao SNR. Tanto as interações no SR como no SNR proporcionaram pouca variação nos valores do COT: de 14,5 a 19,3 $\mu\text{g C g}^{-1} \text{ solo}$ e de 11,6 a 13,6 $\text{mg C g}^{-1} \text{ solo}$, respectivamente; contudo, foi maior no SR da sequência milho/milho em relação às demais.

Houve variação nos teores dos carboidratos totais de 1.295 a 1.550 $\mu\text{g C g}^{-1} \text{ solo}$ (Figura 2a,b), porém diferença significativa entre os conteúdos do SR e SNR apenas foi constatada na cultura de girassol (Figura 2a). Enquanto o aumento da quantidade de carboidratos totais do SNR para o solo SR foi em média de 5 %, na cultura de girassol foi de 15 %. O SR das culturas milho e girassol apresentou valores superiores ($p < 0,05$) aos encontrados no guandu, porém não houve efeito do SNR das culturas de inverno (Figura 2a). Nenhum efeito das sequências de verão foi verificado sobre os teores de carboidratos totais, tanto no SR como no SNR (Figura 2b).

Diferenças significativas dos teores das proteínas totais foram verificadas entre o SR e SNR (aumento médio de 23 %) em todas as culturas de verão e inverno, exceto o guandu (Figura 2c,d). Entretanto, nenhum efeito significativo foi observado tanto das culturas de inverno (Figura 2c) como das de verão (Figura 2d).

No quadro 3 foram incluídas as médias gerais dos resultados com a finalidade de verificar o efeito do solo

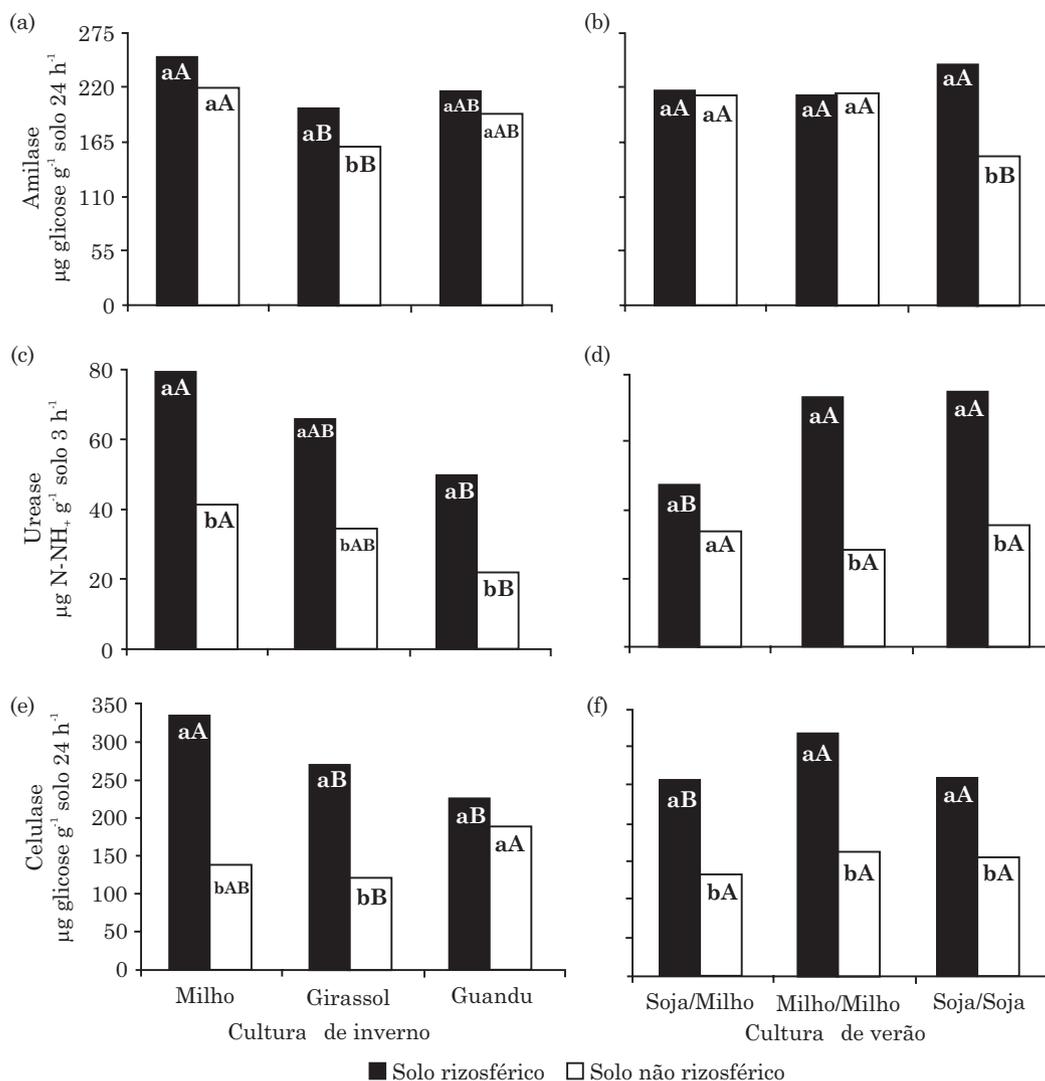


Figura 1. Efeito das culturas de inverno e das sequências de verão em sistema de semeadura direta na atividade das enzimas amilase (a, b), urease (c, d) e celulase (e, f) em solo rizosférico e não rizosférico. Letras minúsculas iguais (solo rizosférico e não rizosférico) e letras maiúsculas iguais (culturas de inverno ou as sequências de verão) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

rizosférico (SR/SNR) sobre as variáveis estudadas. Excetuando os teores de carboidratos totais, os valores observados no solo rizosférico foram significativamente maiores, em média 45 %, do que no solo não rizosférico. As atividades da celulase, protease e urease no solo rizosférico foram 85, 62 e 100 % maiores do que as do solo não rizosférico. O efeito da rizosfera para as demais variáveis variou de 16 a 21 %.

DISCUSSÃO

Efeito rizosférico

As enzimas avaliadas neste estudo fazem parte do ciclo do C (amilase e celulase) e do ciclo do N (urease e protease) e são responsáveis por catalisar importantes

reações no solo, como a hidrólise da ureia pela urease, a degradação de resíduos vegetais pela celulase e amilase (Shan et al., 2008) e a mineralização do N orgânico pela protease (Mondini et al., 2006). Estudos prévios mostraram que a atividade dessas enzimas foi maior no SR em relação ao SNR (Abdalla & Langer, 2009; Nannipieri et al., 2007; Pandey & Palmi, 2007). De acordo com esses estudos, as atividades da urease, celulase e protease foram estimuladas no SR das culturas de inverno e pelas sequências de verão, quando comparadas às do SNR. Em adição, maiores quantidades de COT e proteína foram observadas no SR comparado ao SNR. Isso foi descrito por Koranda et al. (2011), que relataram a disponibilidade de alto teor de C e de N no SR comparado ao SNR. Interessante ressaltar que o efeito rizosférico sobre a atividade da amilase apenas ocorreu na cultura do girassol. Provavelmente, essa resposta deu-se em

Quadro 1. Efeito das culturas de inverno e das sequências de verão em sistema de semeadura direta na atividade da enzima protease e no teor de carbono (C) orgânico total em solo rizosférico e solo não rizosférico

Sequência de verão	Atividade da enzima protease				
	Cultura de inverno				
	Milho	Girassol	Guandu	Média	Teste F
	µg tirosina g ⁻¹ solo h ⁻¹				
	Solo rizosférico				
Soja/milho	77,4 Aa(a)	79,6 Aa(a)	59,8 Aa(a)	72,3 A	22,21*
Milho/milho	84,1 Aa(a)	55,9 Bb(a)	70,2 Aab(a)	70,1 A	
Soja/soja	52,2 Ba(a)	52,9 Ba(a)	34,8 Ba(a)	46,6 B	
Média	71,2 a	62,8 ab	54,9 b		
Teste F	7,64*				
	Solo não rizosférico				
Soja/milho	67,1 Aa(a)	20,3 Bb(b)	45,9 Aa(a)	44,4 A	11,13*
Milho/milho	55,4 Aab(b)	55,7 Aa(a)	23,9 Bb(b)	45,0 A	
Soja/soja	40,9 Ba(a)	16,7 Bb(b)	24,8 ABab(a)	27,5 B	
Média	54,5 a	30,9 b	31,5 b		
Teste F	20,17*				
	mg C g ⁻¹ solo				
	Solo rizosférico				
Soja/milho	15,6 Aa(a)	14,7 Aa(a)	16,3 Aa(a)	15,5 B	9,39*
Milho/milho	16,7 Ab(a)	19,3 Aa(a)	15,4 Ab(a)	17,1 A	
Soja/soja	14,8 Aa(a)	15,9 Aa(a)	14,5 Aa(a)	15,1 B	
Média	15,7 a	16,6 a	15,4 a		
Teste F	2,60 ^{ns}				
	Solo não rizosférico				
Soja/milho	12,5 Aa(b)	12,7 Aa(b)	12,5 Aa(b)	12,6 A	0,94 ^{ns}
Milho/milho	11,6 Ab(b)	13,2 Aab(b)	14,6 Aa(a)	13,1 A	
Soja/soja	13,6 Aa(a)	13,2 Aa(b)	13,1 Aa(b)	13,3 A	
Média	12,6 a	13,1 a	13,4 a		
Teste F	0,83 ^{ns}				

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha, maiúscula na coluna e minúscula entre parênteses, comparando rizosfera e solo não rizosférico, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

razão de o acúmulo de carboidratos ter ocorrido apenas nessa cultura.

A fração rizosfera atua como componente, auxiliando na manutenção e desenvolvimento das plantas. O material depositado no SR inclui compostos de baixo e alto peso molecular, como monômeros (glicose e aminoácidos), polímeros (polissacarídeos e proteínas), que são substâncias prontamente utilizadas pelos microrganismos, favorecendo a atividade enzimática (Pandey & Palni, 2007), além de células e restos de raiz, resíduos e células microbianas e enzimas extracelulares (Nannipiere et al., 2007), o que explicaria a maior atividade microbiana observada no SR (Quadro 3).

No sistema de cultivo mínimo e de rotação de culturas, esse efeito decorre também das interações dos resíduos vegetais, que alteram o fluxo de energia e nutrientes das raízes das plantas (Barea et al., 2005). Em adição, na semeadura direta há aumento da

biomassa e da atividade microbiana (Balota et al., 2004). A região da rizosfera é reconhecida pelo acúmulo de substâncias orgânicas das raízes, denominadas de rizodepósitos. As substâncias acumuladas nesse microambiente influenciam a comunidade microbiana, a qual coloniza a rizosfera utilizando esses exsudatos como fonte de C (Grayston et al., 1998).

Efeito das culturas

Entre as culturas de inverno, a do milho estimulou mais as atividades das enzimas amilase, celulase, urease e protease do SR do que as outras culturas. Efeito semelhante também foi observado com a atividade das enzimas amilase, urease e protease do SNR. No SR da sequência milho/milho também foram constatados os mais altos teores de CO₂, em comparação com as demais sequências (Quadro 1). As plantas constituem fontes de enzimas para o solo,

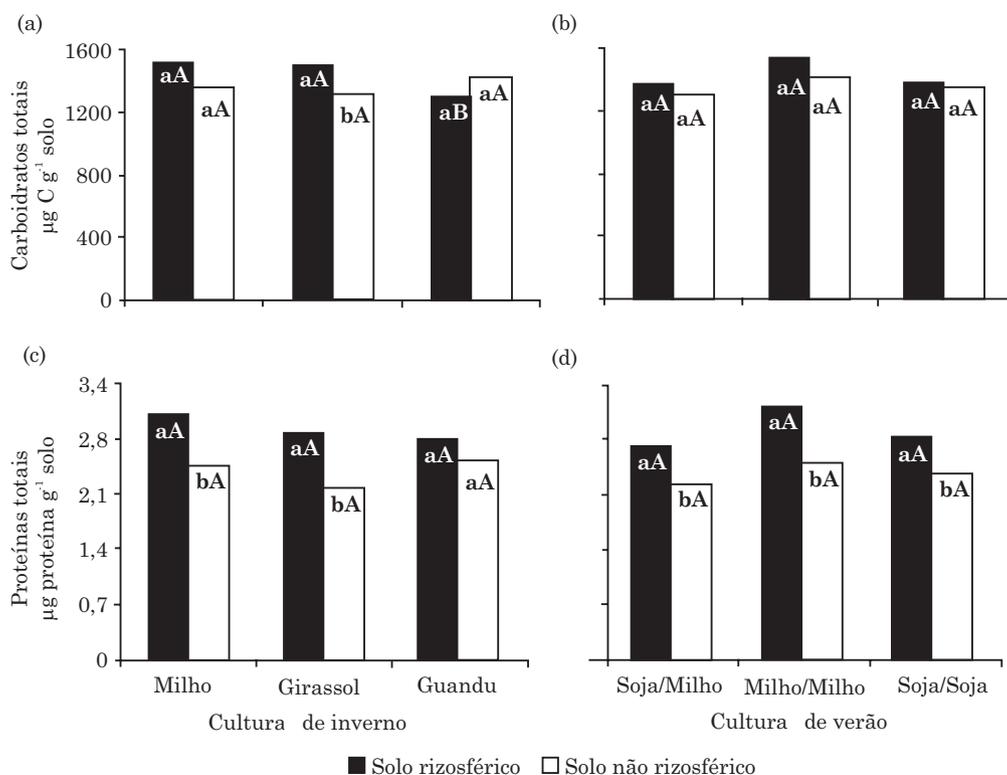


Figura 2. Efeito das culturas de inverno e das sequências de verão em sistema de semeadura direta no teor de carboidratos totais (a, b) e no teor de proteínas totais (c, d) em solo rizosférico e solo não rizosférico. Letras minúsculas iguais (solo rizosférico e não rizosférico) e letras maiúsculas iguais (culturas de inverno ou as sequências de verão) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %.

sendo possível que a composição química das culturas cultivadas influencie nesse aspecto (Mendes & Reis Júnior, 2004). Além disso, a cultura do milho possui sistema radicular fasciculado, o que o diferencia de uma leguminosa que possui o sistema radicular pivotante. Além disso, a constituição do material vegetal de uma gramínea é diferente da de uma leguminosa, que apresenta relação C:N mais baixa, favorecendo a mineralização (Teixeira et al., 2003).

As atividades da amilase e da celulase do SR não foram influenciadas pelas sequências de verão. Contudo, efeito diferenciado ocorreu sobre as atividades da urease e da protease: a atividade da urease foi mais estimulada pelas sequências milho/milho e soja/soja, e a da protease aumentou mais sob a influência das sequências milho/milho e soja/milho. Em geral, os resultados da atividade das enzimas do SNR foram similares aos obtidos no SR das sequências de verão. As divergentes respostas apresentadas pelas diferentes plantas sobre a atividade das enzimas podem ser decorrentes do estímulo diferenciado da comunidade microbiana ao efeito da rizosfera (Caravaca et al., 2004). A rotação de culturas e o sistema de semeadura direta avaliados neste estudo são manejos que podem influenciar a composição dos exsudatos por meio do tipo e da idade das plantas utilizadas, do metabolismo, da condição nutricional e de outros fatores ambientais

(Oliveira et al., 2009). Além disso, as quantidades de resíduos vegetais incorporados ao solo, incluindo o sistema radicular morto, e a taxa de decomposição desses resíduos alteram os fluxos de energia e nutrientes para a comunidade microbiana (Nannipiere et al., 2007).

As plantas são as principais responsáveis pela adição ao solo de compostos orgânicos primários sintetizados no processo de fotossíntese, que, dependendo da quantidade de resíduos depositados no solo, poderá resultar em aumento no teor de CO do solo (Faria et al., 2008), bem como de carboidratos e proteínas totais, que são constituintes da MOS, oriundos da decomposição dos resíduos orgânicos e do metabolismo microbiano (Guerra et al., 2008). No entanto, neste estudo não foram observadas diferenças significativas entre as culturas de inverno e sequências de verão para as proteínas totais.

D'Andréa et al. (2002) não observaram diferenças para o COT em superfície na comparação de sistemas de manejo como semeadura direta de milho, feijão e arroz. Steiner et al. (2011), avaliando sistema de produção em rotação ou não com culturas de cobertura (aveia + ervilhaca + nabo/milho/trigo/mucuna + braquiária + crotalaria/milho/soja), não verificaram influências significativas nos teores de CO do solo, atribuindo tal efeito à rápida mineralização

Quadro 3. Efeito rizosférico sobre a atividade das enzimas amilase, celulase, protease e urease e valores de carboidratos totais, proteínas totais e carbono orgânico total

Variável	SR	SNR	SR/SNR	F
Amilase (µg glicose g ⁻¹ solo 24 h ⁻¹)	221,0 a	191,2 b	116	9,45 [*]
Urease (µg N-NH ₄ g ⁻¹ solo 3 h ⁻¹)	64,7 a	32,4 b	200	64,45 [*]
Celulase (µg glicose g ⁻¹ solo 24 h ⁻¹)	276,1 a	149,4 b	185	75,83 [*]
Protease (µg tirosina g ⁻¹ solo h ⁻¹)	63,1 a	39,0 b	162	97,51 [*]
Carbono orgânico total (mg C g ⁻¹ solo)	15,9 a	13,1 b	121	80,44 [*]
Carboidratos totais (µg C g ⁻¹ solo)	1.550,6 a	1.419,0 a	109	2,46 ^{ns}
Proteínas totais (mg proteína g ⁻¹ solo)	2,9 a	2,4 b	121	24,10 [*]
Média			145	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %. SR: solo rizosférico, SNR: solo não rizosférico.

da matéria orgânica dos resíduos vegetais em função das altas temperaturas e umidade, corroborando os resultados encontrados no solo sob as culturas de inverno deste estudo. Já o resultado superior no teor de COT observado para a sequência de verão milho/milho em relação às demais pode estar relacionado com a menor taxa de decomposição dos resíduos de milho, comparado aos de soja (Marcelo et al., 2009). Culturas com sistema radicular abundante e agressivo, que alocam uma fração maior do C fotossintetizado para as raízes, podem ser mais eficientes em aumentar os estoques do COT no solo e, conseqüentemente, no C residual (Carneiro et al., 2009).

CONCLUSÕES

1. A atividade enzimática (amilase, urease, celulase e protease) e os atributos químicos (carbono orgânico total e proteínas totais) foram aumentados no solo rizosférico em relação ao não rizosférico.

2. O milho, entre as culturas de inverno, foi o que mais estimulou as atividades das enzimas amilase, celulase, urease e protease no solo rizosférico, bem como a atividade das enzimas amilase, urease e protease no solo não rizosférico.

3. Das sequências de verão, milho/milho promoveu os maiores teores de carbono orgânico total.

4. Os atributos bioquímicos e químicos estudados podem ser utilizados como indicadores das alterações no solo promovidas pelas culturas de inverno e pelas sequências de verão.

LITERATURA CITADA

ABDALLA, M.A. & LANGER, U. Soil enzymes activities in irrigated and Rain- Fed Vertisols of the Semi- Arid tropics of Sudan. *Intern. J. Soil Sci.*, 4:67-79, 2009.

ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; ACOSTA-MERCADO, D.; SOTOMAYOR-RAMÍREZ, D. & CRUZ-RODRÍGUEZ, L. Microbial communities and enzymatic activities under different management in semiarid soils. *Appl. Soil Ecol.*, 38:249-260, 2008.

ANGERS, D.A. & MEHUYS, G.R. Effects of cropping on carbohydrate content and water-stable aggregation of a clay soil. *Can. J. Soil Sci.*, 69:373-380, 1989.

ARAÚJO, S.F. & MONTEIRO, R.T.R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. *Biosci. J.*, 23:66-75, 2007.

BALOTA, E.L.; KANASHIRO, M.; COLOZZI-FILHO, A.; ANDRADE, D.S. & DICK, R.P. Soil enzyme activities under long-term tillage an crop rotation systems in subtropical agro-ecosystems. *Braz. J. Microbiol.*, 35:300-306, 2004.

BAREA, J.M.; POZO, M.J.; AZCÓN, R. & AZCÓN-AGUILAR, C. Microbial co-operation in the rhizosphere. *J. Exp. Bot.*, 56:1761-1778, 2005.

CARAVACA, F.; LAX, A. & ALBALADEJO, J. Aggregate stability and carbon characteristics of particle-size fractions in cultivated and forested soils of semiarid Spain. *Soil Tillage Res.*, 78:83-90, 2004.

CARNEIRO, M.C.; ASSIS, P.C.R.; MELO, L.B.C.; PEREIRA, H.S.; PAULINO, H.B. & SILVEIRA NETO, A.N. Atributos bioquímicos em dois solos de cerrado sob diferentes sistemas de manejo e uso. *Pesq. Agropec. Trop.*, 38:276-283, 2008.

CARNEIRO, C.E.A.; JÚNIOR, N.J.M.; AZEVEDO, M.C.B.; ANDRADE, E.A.; KOGUISHI, M.C.; DIEHL, R.C.; RICCE, W.; PASSARIN, A.L.; VAZ, R.H.M.; STELMACHUK, T.L.L.; GUIMARÃES, M.F. & RALISCH, R. Efeitos dos sistemas de manejo sobre o carbono orgânico total e carbono residual de um Latossolo Vermelho eutroférico. *Semina*, 30:5-10, 2009.

CARDOSO, E.J.B.N. & NOGUEIRA, M.A. A rizosfera e seus efeitos na comunidade microbiana e na nutrição de plantas. In: SILVEIRA, A.P.D. & FREITAS, S.S., eds. *Microbiota do solo e qualidade ambiental*. Campinas, Instituto Agrônomo, 2007. p.79-96.

- CLAASSENS, S.; van RENSBURG, P.J.J.; MABOETA, M.S. & van RENSBURG, L. Soil microbial community function and structure in a post-mining chronosequence. *Water Air Soil Poll.*, 194:315-329, 2008.
- COLE, M.A. Lead inhibition of enzyme synthesis in soil. *Appl. Environ. Microbiol.*, 33:262-268, 1977.
- D'ANDRÉA, A.F.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; SIQUEIRA, J.O. & CARNEIRO, M.A.C. Atributos biológicos indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região do cerrado no sul do estado de Goiás. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:913-923, 2002.
- DAANE, L.L.; HARJONO, I.; ZYLSTRA, G.J. & HAGGBLOM, M.M. Isolation and characterization of polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacteria associated with the rhizosphere of salt marsh plants. *Appl. Environ. Microbiol.*, 67:2683-2691, 2001.
- DORAN, J.W.; ELLIOTT, E.T. & PAUSTIAN, K. Soil microbial, nitrogen cycling, and long-term changes in organic carbon pools as related to fallow tillage management. *Soil Tillage Res.*, 49:18, 1998.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. Sistema brasileiro de classificação do solo. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- FARIA, G.E.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; SILVA, I.R. & NEVES, J.C.L. Carbono orgânico total e frações da matéria orgânica do solo em diferentes distâncias do tronco de eucalipto. *Sci. For.*, 36:265-277, 2008.
- FERREIRA, D.F. SISVAR: Um programa para análises e ensino de estatística. *R. Symposium* 6:36-41, 2008.
- GRAYSTON, S.J.; WANG, S.; CAMPBELL, C.D. & EDWARDS, A.C. Selective influence of plant species on microbial diversity in the rhizosphere. *Soil Biol. Biochem.*, 30:369-378, 1998.
- GUERRA, J.G.M.; SANTOS, G.A.; SILVA, L.S. & CAMARGO, F.A.O. Macromoléculas e substâncias húmicas. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P. & CAMARGO, F.A.O., eds. *Fundamentos da matéria orgânica do solo. Ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre, Metrópole, 2008. p.19-25.
- HARTREE, E.F. Determination of protein a modification of the Lowry Method that gives a linear photometric response. *Anal. Biochem.*, 48:422-427, 1972.
- HERMAN, D.J.; JOHNSON, K.K.; JAEGER, C.H.; SCHWARTZ, E. & FIRESTONE, M.K. Root influence on nitrogen mineralization and nitrification in *Avena barbata* rhizosphere soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70:1504-1511, 2006.
- KANAZAWA, S. & MIYASHITA, K.A. Modified method for determination of cellulase activity in forest soil. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 32:71-79, 1986.
- KLUEPFEL, D.A. The behavior and tracking of bacteria in the rhizosphere. *Ann. Rev. Phytopathol.*, 31:441-472, 1993.
- KORANDA, M.; SCHNECKER, J.; KAISER, C.; FUCHSLUEGER, L.; KITZLER, B.; STANGE, C.F.; SESSITSCH, A.; ZECHMEISTER-BOLTENSTERN, S. & RICHTER, A. Microbial processes and community composition in the rhizosphere of European beech e the influence of plant C exudates. *Soil Biol. Biochem.*, 43:51-558, 2011.
- McGARITY, J.W. & MYERS, M.G. A survey of urease activity in soils of Northern South Wales. *Plant Soil*, 27:217-238, 1967.
- MARCELO, A.V.; CORÁ, J.E.; FERNANDES, C.; MARTINS, M.R. & JORGE, R.F. Crop sequences in no-tillage system: Effects on soil fertility and soybean, maize and rice yield. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:417-428, 2009.
- MENDES, I.C. & REIS JÚNIOR, F.B. Uso de parâmetros biológicos e bioquímicos para avaliar a qualidade do solo e a sustentabilidade de agroecossistemas. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2004. 34p. (Documentos, 112)
- MONDINI, C.; CAYUELA, M.L.; SANCHEZ-MONEDERO, M.A.; ROIG, A. & BROOKES, P.C. Soil microbial biomass activation by trace amounts of readily available substrate. *Biol. Fert. Soils*, 42:542-549, 2006.
- NANNIPIERI, P.; PEDRAZZINI, F.; ARCARA, P.G. & PIOVANELLI, C. Changes in amino acids, enzyme activities, and biomasses during soil microbial growth. *Soil Sci.*, 127:26-34, 1979.
- NANNIPIERI, P.; ACHER, J.; CECCHERINI, M.T.; LAND, L.; PIETRAMELLARA, G.; RENELLA, G. & VALORI, F. Microbial diversity and microbial activity in the rhizosphere. *Ci. Suelo*, 25:89-97, 2007.
- OLIVEIRA, C.A.; MARRIEL, I.E.; GOMES, E.A.; LANA, U.G.P.; SCOTTI, M.R. & CARVALHO, V.M. Diversidade bacteriana da rizosfera de genótipos de milho contrastantes na eficiência de uso de fósforo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 44:1473-1482, 2009.
- PANDEY, A. & PALNI, L.M. The rhizosphere effect in trees of the Indian Central Himalaya with special reference to altitude. *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 5:93-102, 2007.
- RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C., eds. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo e Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).
- SHAN, Q.; YU, Y.; YU, J. & ZHANG, J. Soil enzymes activities and their indication for fertility of urban forest soil. *Front. Environ. Sci. Eng.*, 2:218-223, 2008.
- SIMS, J.R. & HABY, V.A. Simplified colorimetric determination of soil organic matter. *Soil Sci.*, 112:137-141, 1971.
- SOMOGY, M. Notes on sugar determination. *J. Biol. Chem.*, 195:19-23, 1952.

- STEINER, F.; PIVETTA, L.A.; CASTOLDI, G.; COSTA, M.S.S.M. & COSTA, L.A.M. Carbono orgânico e carbono residual do solo em sistema de plantio direto, submetido a diferentes manejos. R. Bras. Ci. Agrár., 6:401-408, 2011
- TEIXEIRA, C.F.A.; PAULETTO, E.A. & SILVA, J.B. Resistência mecânica à penetração de um argissolo amarelo distrófico típico sob diferentes sistemas de produção em plantio direto. Ci. Rural, 33:1165-1167, 2003.
- WRIGHT, A.L.; HONS, F.M.; LEMON, R.G.; McFARLAND, M.L. & NICHOLS, R.L. Microbial activity and soil C sequestration for reduced and conventional tillage cotton. Appl. Soil Ecol., 38:168-173, 2008.
- YANG, L.; LI, T.; LI, F.; LEMCOFF, J.H. & COHEN, S. Fertilization regulates soil enzymatic activity and fertility dynamics in a cucumber field. Sci. Hortic., 116:21-26, 2008.