

# BIOINDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO

VILMA MARIA DOS SANTOS<sup>1</sup>

LEONOR COSTA MAIA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco.

Autor para correspondência: vilmasanttos@yahoo.com.br.

---

Resumo: A qualidade do solo pode ser estimada a partir de indicadores de qualidade. Esses indicadores são características mensuráveis que permitem acompanhar e avaliar as alterações ocorridas num dado ecossistema. Devido à capacidade de responder rapidamente às mudanças no solo e o fato da atividade microbiana do solo refletir a influência conjunta dos fatores responsáveis pela degradação da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes, os microrganismos e processos microbiológicos tem sido utilizados como indicadores sensíveis da qualidade do solo. Os bioindicadores mais adequados para uso na avaliação da qualidade são a biomassa microbiana, a respiração, os quocientes microbiano e metabólico e a atividade enzimática do solo.

Termos para indexação: atividade microbiana, microrganismos, propriedades do solo, sustentabilidade.

## BIOINDICATORS OF SOIL QUALITY

Abstract: In Brazil, the production of almond cashew (*Anacardium occidentale* L.) is traditionally intended for the international market, moving billions of dollars annually. However, this production may be limited due to the occurrence of diseases caused by plant pathogenic bacteria of the *Xanthomonas* genus. In this review, we cover the taxonomical aspects of the causal agent of angular leaf spot and Xanthomonas spot, as well as the symptomatology, etiology, epidemiology and control of these phytobacteriosis in Anacardiaceae, with emphasis on cashew.

Index terms: microbial activity, microorganisms, soil properties, sustainability.

## I. INTRODUÇÃO

O solo é o componente fundamental dos ecossistemas terrestres (WELC et al., 2012) abrigando processos e reações biológicas desempenhando diversas funções-chave (CHAER; MYROLD; BOTTOMLEY, 2009). O equilíbrio

ecológico do solo tem sido constantemente perturbado por ações antrópicas inadequadas, as quais ocasionam a degradação e a redução da qualidade natural (CLAASSENS et al., 2008; IZQUIERDO et al., 2005; KASCHUK; ALBERTON; HUNGRIA, 2010).

Levantamentos constataram que a degradação do solo induzida pelo homem correspondia, em 1994 a quase 40% de todas as terras cultivadas no mundo (OLDEMAN, 1994). O aumento das áreas degradadas tornou-se uma questão de interesse global, sendo considerada uma das quatro maiores preocupações ecológicas, rivalizando apenas com a mudança global do clima, a diminuição da camada de ozônio e com o declínio da biodiversidade (DORAN; SARRANTONIO; LIEBIG, 1996). Nesse contexto, a manutenção da qualidade do solo, ou mesmo a sua melhoria, é fundamental para a sustentabilidade, visando à produção agrícola e à conservação ambiental.

A qualidade edáfica pode ser inferida a partir de mudanças nas características do solo. Para isso devem ser selecionados indicadores, os quais são substitutos mensuráveis dos atributos do solo (ANDREWS; KARLEN; CAMBARDELLA, 2004; ARAÚJO; MONTEIRO, 2007; PRAGANA et al., 2012) que permitem caracterizar, acompanhar e avaliar as alterações ocorridas num dado ecossistema (ARAÚJO et al., 2013). Entre os indicadores de qualidade de solo, os biológicos ou bioindicadores merecem especial atenção, pois os microrganismos são responsáveis por inúmeros processos e funções, como a decomposição de resíduos, ciclagem de nutrientes, síntese de substâncias húmicas, e agregação de partículas do solo (BURNS et al., 2013; HUNGRIA et al., 2009; NUNES et al., 2012).

## 2. QUALIDADE DO SOLO

A conscientização de que o solo é um recurso fundamental para o funcionamento dos ecossistemas e a constatação de que os processos de degradação têm afetado uma porção considerável dos solos atualmente em uso estimulou o interesse pelo conhecimento da qualidade do solo para avaliação da sustentabilidade ambiental (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007; DORAN; PARKIN, 1994; SCHLOTTER; DILLY; MUNCH, 2003).

Contrariamente a outros conceitos como a qualidade da água e do ar, a qualidade do solo não possui padrões e, portanto, existem múltiplas definições, o que sugere que seu conceito continuará evoluindo. Atualmente

a qualidade do solo é conceituada como “a capacidade de um solo funcionar, dentro dos limites do ecossistema, como sustentador da produtividade biológica, mantendo a qualidade ambiental e promovendo a saúde vegetal e animal” (DORAN; SARRANTONI; LIEBIG, 1996). Esta abordagem leva em consideração não apenas a função do solo na produção de alimentos, mas destaca a importância desse recurso para o funcionamento dos ecossistemas (TÓTOLA; CHAER, 2002).

A qualidade do solo, sendo um estado funcional complexo resultante da interação entre os atributos químicos, físicos e biológicos, não pode ser mensurada diretamente e para avaliá-la é necessário definir as funções do solo relacionadas a cada atributo (DORAN; SARRANTONI; LIEBIG, 1996; JIN et al., 2009; TÓTOLA; CHAER, 2002). Dessa forma, a qualidade edáfica pode ser inferida a partir de mudanças nos atributos do solo e para isso devem ser selecionados indicadores, os quais são substitutos mensuráveis dos atributos (ANDREWS; KARLEN; CAMBARDELLA, 2004; ARAÚJO; MONTEIRO, 2007) que permitem caracterizar, acompanhar e avaliar as alterações ocorridas num dado ecossistema. Indicadores são necessários não somente como substitutos, refletindo a funcionalidade dos solos, mas também para orientar a recuperação de áreas degradadas (HINOJOSA et al., 2004; NUNES et al., 2012). Nesse contexto, o indicador pode ser uma variável mensurável, um processo, ou um índice composto de diversas medidas do solo (MELLONI, 2007; TÓTOLA; CHAER, 2002). No entanto, é óbvio que nenhum indicador, individualmente, poderá descrever e quantificar todos os aspectos relacionados à qualidade do solo (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007; SCHLOTER; DILLY; MUNCH, 2003; STENBERG, 1999).

Os indicadores de qualidade podem ser classificados em físicos, químicos e biológicos (Tabela 1). Até pouco tempo, os estudos de qualidade do solo eram baseados principalmente em investigações dos indicadores químicos e físicos, subestimando-se o papel da biota no funcionamento do solo (MELLONI et al., 2008; SCHLOTER; DILLY; MUNCH, 2003).

Os indicadores da qualidade do solo devem ser identificados e analisados quanto à sensibilidade às mudanças e distúrbios ocorridos no ambiente edáfico (GIL-SOTRES et al., 2005). Uma vez que tenham sido definidos, esses indicadores podem ser monitorados de forma a avaliar o impacto do manejo adotado sobre a qualidade do solo (CARNEIRO et al., 2008; CHAER;

**Tabela 1.** — Indicadores físicos, químicos e biológicos e suas relações com a qualidade do solo.

<b>Indicadores</b>	<b>Relação com a qualidade do solo</b>
Matéria orgânica do solo	Fertilidade, estrutura e estabilidade do solo
<b>Físicos</b>	
Estrutura do Solo	Retenção e transporte de água e nutrientes
Infiltração e densidade do solo	Movimento de água e porosidade do solo.
Capacidade de retenção de umidade	Armazenamento e disponibilidade de água
<b>Químicos</b>	
pH	Atividade biológica e disponibilidade de nutrientes
Condutividade elétrica	Crescimento vegetal e atividade microbiana
Conteúdo de N, P e K	Disponibilidade de nutrientes para as plantas.
<b>Biológicos</b>	
Biomassa microbiana	Atividade microbiana e reposição de nutrientes.
Mineralização de nutrientes (N, P e S)	Produtividade do solo e potencial de suprimento de nutrientes.
Respiração do solo	Atividade microbiana
Atividade enzimática	Atividade microbiana e catalítica no solo.

Fonte: Araújo e Monteiro (2007) (Adaptado de DORAN; PARKIN, 1994).

TÓTOLA, 2007).

Para nortear a escolha de indicadores de qualidade/degradação do solo, Doran e Zeiss (2000) sugerem alguns critérios: os indicadores devem ser sensíveis às variações de manejo e clima, de fácil mensuração, econômicos e úteis para explicar os processos do ecossistema. Entretanto, a seleção de indicadores vai depender da finalidade a que se propõe a utilização do solo.

Para e Weil (2000b) os indicadores podem ser divididos em três grandes grupos: (a) os efêmeros, cujas alterações ocorrem em curto espaço de tempo ou são modificados pelas práticas de cultivo, tais como: umidade do solo, densidade, pH, disponibilidade de nutrientes; (b) os permanentes, que são inerentes ao solo, tais como: profundidade, camadas restritivas, textura, mineralogia; (c) os intermediários, que demonstram crítica influência da capacidade do solo em desempenhar suas funções, como: agregação, biomassa microbiana, quociente respiratório e carbono orgânico total. Para esses

autores, os indicadores intermediários são os mais indicados para integrarem um índice de qualidade do solo.

De todo modo um dos desafios atuais da pesquisa é como avaliar a qualidade de um solo de maneira fácil e simples, uma vez que não há método prático e confiável para essa estimativa.

### 3. BIOINDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO

A crescente degradação ambiental tem impulsionado a busca por indicadores sensíveis de qualidade do solo, tanto para avaliação pontual de um ecossistema, como para predizer quais práticas podem favorecer a recuperação do solo (ANDREWS; CARROL, 2001; ARAÚJO et al., 2013; HERRICK et al., 2002; HUNGRIA et al., 2009; PORTÔ et al., 2009; SARDANS; PENUELAS, 2005).

A avaliação das propriedades biológicas do solo se adequa à maioria dos critérios de um indicador de qualidade de solo (DORAN; ZEISS, 2000) apesar desse componente ter sido ignorado em muitos estudos. A capacidade de responder rapidamente às mudanças no solo e o fato da atividade microbiana do solo refletir a influência conjunta dos fatores responsáveis pela degradação da matéria orgânica e ciclagem de nutrientes (BEHERA; SAHANI, 2003; ZHANG et al., 2011), justifica o uso de microrganismos e processos microbiológicos para estudar a qualidade do solo.

A microbiota do solo apresenta grande potencial de utilização em estudos da qualidade edáfica, pois os microrganismos constituem fonte e depósito de nutrientes em todos os ecossistemas; além disso, participam ativamente em processos benéficos como a estruturação do solo, a formação do húmus, a solubilização de nutrientes para as plantas e a degradação de compostos persistentes aplicados ao solo (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008; GREEN et al., 2007; KASCHUK; ALBERTON; HUNGRIA, 2010). As propriedades microbiológicas têm sido amplamente discutidas na literatura como indicadores de qualidade (HINOJOSA et al., 2004; KIZILKAYA; BAYRAKLI, 2005; LISBOA et al., 2013; PARADELO; MOLDES; BARRAL, 2009; STURSOVÁ; BALDRIAN, 2011; ZHANG et al., 2011) dado o relacionamento entre atividade e diversidade microbiana, vegetação e sustentabilidade dos ecossistemas (DORAN; SARRANTONIO; LIEBIG, 1996).

O funcionamento microbiológico e bioquímico do solo tem sido frequentemente proposto como indicador sensível de estresse ecológico ou dos processos de restauração dos solos tanto em ambientes naturais como em agroecossistemas (BADIANE et al., 2001; SCHROTH et al., 2002). A análise desses indicadores pode fornecer informações importantes sobre o desempenho de funções-chave do solo (CHAER; MYROLD; BOTTOMLEY, 2009). Diferentemente do que ocorre com os indicadores químicos, cujos níveis já estão relativamente bem definidos para cada nutriente e tipo de solo, a base de informações disponível sobre os dados biológicos ainda é muito pequena. Dessa forma, as dificuldades na interpretação dos bioindicadores de qualidade constituem grandes obstáculos a serem transpostos para o uso dessas variáveis nas avaliações de qualidade do solo (TÓTOLA; CHAER, 2002; PAZ-FERREIRO et al., 2010).

Entre os indicadores comumente utilizados para a avaliação do funcionamento microbiológico do solo destacam-se o carbono da biomassa microbiana (DE-POLLI; GUERRA, 1997), a evolução de CO<sub>2</sub> (GRISI, 1978), a atividade de enzimas do solo (BURNS, 1982), a relação carbono da biomassa microbiana/carbono orgânico, denominada quociente microbiano, e a relação respiração/biomassa (ANDERSON; DOMSCH, 1985). Os indicadores básicos e o número de medidas a serem estimadas ainda estão em discussão; no entanto, programas nacionais e internacionais para o monitoramento da qualidade do solo incluem avaliações da biomassa e atividade respiratória (SCHLOTTER; DILLY; MUNCH, 2003). Os critérios para a escolha de indicadores devem estar relacionados, principalmente, com sua utilidade em definir processos do ecossistema.

#### **4. CARBONO DA BIOMASSA MICROBIANA (CBM)**

Diversas metodologias podem ser utilizadas para estimar a biomassa microbiana, sendo mais frequentes a fumigação-incubação (JENKINSON; POWLSON, 1976), a fumigação-extração (VANCE; BROOKES; JENKINSON, 1987) e a irradiação-extração (ISLAM; WEIL, 1998); vários estudos têm comparado a eficiência desses métodos na determinação da biomassa microbiana (BRANDÃO-JÚNIOR et al., 2008; WARDLE; GHANI, 1995). A fumigação-extração tem sido usada com mais frequência devido à rápida avaliação em comparação com o método de fumigação-incubação, e

à independência em relação ao estado fisiológico da população microbiana do solo (VANCE; BROOKES; JENKINSON, 1987). Além disso, o método tem sido recomendado para mensuração de CBM em solos do Brasil pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (ROSCOE et al., 2006).

O teor de carbono da biomassa microbiana pode ser indicativo do potencial da disponibilidade de nutrientes para os vegetais, podendo estar relacionado à qualidade do solo e, conseqüentemente, à produtividade ecológica (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). O C contido na biomassa microbiana consiste em energia armazenada para futuros processos microbianos (BLAGODATSKAYA; KUZYAKOV, 2008).

Diversos estudos foram realizados para avaliar a biomassa em solos degradados (CARNEIRO et al., 2008), sob diferentes coberturas vegetais (GAMA-RODRIGUES et al., 2008) em sistemas agrícolas (SILVA, A. P. et al., 2010), comparando sistemas naturais e agrícolas (JAKELAITIS et al., 2008) e em sistemas agroflorestais (NOGUEIRA et al., 2006).

Böhme e Böhme (2006) observaram que espécies vegetais influenciam diferentemente o conteúdo de carbono microbiano em decorrência da rizodeposição. Em áreas de reabilitação após mineração com bauxita, o aumento na biomassa microbiana foi atribuído à entrada de C pela rizodeposição e decomposição da fitomassa (CARNEIRO et al., 2008). Esses autores relataram que o benefício é decorrente das características dos vegetais que apresentavam sistema radicular extenso e de crescimento rápido, além de produzir grande quantidade de fitomassa, promovendo condições para o crescimento microbiano.

Numa compilação de dados sobre os principais estudos abordando a estimativa da biomassa microbiana do solo em agroecossistemas brasileiros nos últimos 30 anos, Kaschuk, Alberton e Hungria, (2010) observaram que o teor de CBM varia de acordo com o ambiente e geralmente solos cultivados apresentam menores teores do que áreas com vegetação nativa. Para melhor entendimento das mudanças no CBM é necessário compreender a dinâmica da ciclagem de nutrientes e da atividade microbiológica, sobretudo em ecossistemas sob condições de degradação.

A determinação do CBM não fornece indicações sobre a atividade dos microrganismos do solo, sendo necessário avaliar simultaneamente atributos que possam medir o estado metabólico da comunidade microbiana do solo

(MENDES et al., 2012), como por exemplo respiração basal e a atividade de enzimas do solo. Importantes variáveis podem ser derivados do CBM como o quociente microbiano e o quociente metabólico (KASCHUK; ALBERTON; HUNGRIA, 2010; NUNES et al., 2012), os quais servem para indicar a vulnerabilidade dos ecossistemas em termos de resistência e resiliência.

## 5. RESPIRAÇÃO BASAL

A respiração basal do solo consiste na medida das funções metabólicas nas quais ocorre produção de  $\text{CO}_2$  (ADACHI et al., 2006; GAMA-RODRIGUES et al., 2008; PRAGANA et al., 2012). A liberação de  $\text{CO}_2$  é proveniente da atividade de bactérias, fungos, algas e protozoários do solo e também das raízes de plantas (EPRON et al., 2006; GAMA-RODRIGUES et al., 2008). A contribuição de raízes para a respiração do solo varia de 10% a 90% dependendo da estação do ano e da vegetação; estudos de longa duração indicam as contribuições médias de 45% e 60% em áreas florestadas e abertas, respectivamente (HANSON et al., 2000). Em plantações de eucalipto a respiração radicular contribui com cerca de 60% para a respiração total do solo (EPRON et al., 2006).

De modo geral, a quantidade do  $\text{CO}_2$  emitido está relacionada à capacidade de degradação da matéria orgânica pela microbiota heterotrófica, o que constitui uma fase fundamental no ciclo do carbono (EPRON et al., 2006; HERNÁNDEZ; GARCÍA, 2003). Desse modo, a disponibilidade de C no solo tem sido descrita como um dos fatores que pode contribuir para o aumento da respiração basal do solo (PRAGANA et al., 2012).

Alta taxa respiratória pode ser uma característica desejável, considerando-se que pode indicar uma alta atividade da biomassa microbiana e rápida transformação da matéria orgânica em nutrientes para as plantas. Atividade respiratória elevada pode ser resultado tanto de um grande “pool” de substratos de C lábeis, onde a decomposição da matéria orgânica é intensa, como da rápida oxidação de um pequeno “pool” decorrente, por exemplo, da quebra de agregados do solo promovida pela aração, a qual expõe material orgânico que se encontrava protegido da ação microbiana (TÓTOLA; CHAER, 2002). Assim, elevada emissão de  $\text{CO}_2$  pode indicar tanto um distúrbio ecológico como alta produtividade do ecossistema (ISLAM; WEIL, 2000a), devendo ser analisada em cada contexto.

A quantificação de CO<sub>2</sub> liberado pela respiração dos microrganismos constitui um dos métodos mais utilizados para avaliação da atividade metabólica por ser rápido, barato e de fácil determinação (BARRETO et al., 2008; CHAER; TÓTOLA, 2007; FANIN et al., 2011; GRISI, 1978; PAZ-FERREIRO et al., 2010; SANTRUCKOVÁ; STRASKRABA, 1991; SICARDI; GARCIA-PRÉCHAC; FRIONI, 2004; WALDROP; BALSER; FIRESTONE, 2000; WARDLE, 1994). Medidas de respiração microbiana refletem diretamente a atividade de microrganismos e informam quanto à bioatividade do solo (PAUL; CLARK, 1989). A respiração microbiana, assim como outras atividades metabólicas, dependem do estado fisiológico das células, sendo influenciadas por diversos fatores ambientais como umidade do solo, temperatura, disponibilidade de nutrientes, quantidade de C orgânico, pluviosidade e qualidade da matéria orgânica (ADACHI et al., 2006; SNAJDR et al., 2008; SILVA, R. R. et al., 2010; HELINGEROVÁ; FROU; SANTRUKOVÁ, 2010).

Respostas diferenciadas desse parâmetro ao manejo do solo e práticas agrícolas dependem de variações espaciais, como a profundidade da coleta das amostras ou do tipo de solo cultivado (ANDRÉA; PETTINELLI, 2000; SNAJDR et al., 2008; CHAER; MYROLD; BOTTOMLEY, 2009). O tipo de vegetação e idade das plantas também são fatores relevantes. Helingerová, Frou e Santruková (2010) constataram diminuição da respiração com o incremento da idade sucessional em área de mineração de carvão. Outros estudos relatam uma tendência de aumento da biomassa microbiana durante a fase inicial da sucessão; após esse período os teores de nutrientes geralmente diminuem e a biomassa microbiana pode declinar ou permanecer constante (BALDRIAN et al., 2008). Em povoamentos de eucalipto no estado do Espírito Santo, a idade das plantas não influenciou a taxa de evolução de CO<sub>2</sub> (BARRETO et al., 2008). Segundo Behera e Sahani (2003), baixa taxa de respiração em solos sob plantios de eucalipto reflete pouca atividade microbiana.

Em muitos casos, a interpretação dos resultados da avaliação da respiração microbiana torna-se difícil, devendo por isso ser realizada com cautela. A associação de outras medidas da atividade microbiológica do solo mostra-se necessária para obtenção de resultados mais completos sobre a real condição do sistema em estudo. Assim, uma variável de interpretação aparentemente mais adequada é a taxa de respiração por unidade de biomassa.

## 6. QUOCIENTE METABÓLICO

O quociente metabólico ( $qCO_2$ ) é relação entre o  $CO_2$  produzido pela respiração microbiana e o CBM e tem sido utilizado para avaliar efeitos ambientais e antropogênicos sobre a biomassa microbiana do solo (GRAHAM; HAYNES, 2004; WARDLE; GHANI, 1995; ZHANG et al., 2011). Esse quociente baseia-se na teoria bioenergética de Odum, segundo a qual comunidades microbianas sob condições de estresse (limitações de nutrientes, baixo pH, etc.) ou expostas a qualquer tipo de perturbação serão menos eficientes em converter o C assimilado em biomassa, pois a maior parte do C deverá ser utilizado para fornecer energia para processos metabólicos necessários à manutenção celular (ODUM, 1969). O quociente metabólico tem sido usado como índice ecofisiológico dos microrganismos do solo e reflete o status bioenergético da biomassa microbiana (ZHANG et al., 2011).

O declínio do quociente metabólico é interpretado como aumento da eficiência da utilização de C pela biomassa (BANNING et al., 2008; KASCHUK; ALBERTON; HUNGRIA, 2010). Baixos valores de  $qCO_2$  supostamente refletem um ambiente estável ou próximo ao estado de equilíbrio. Por outro lado, valores elevados são indicativos de ecossistemas jovens, submetidos a alguma condição de estresse (BEHERA; SAHANI, 2003; BÖHME; BÖHME, 2006; DINESH et al., 2003; MALUCHE-BARETTA.; AMARANTE; KLAUBERG-FILHO, 2006). Nessas condições, ocorre maior gasto de energia para manutenção da comunidade microbiana e os microrganismos tendem a consumir mais substrato para sobreviver (AGNELLI et al., 2001; CARNEIRO et al., 2008). Assim, parte do carbono microbiano será perdido na forma de  $CO_2$  pela alta catabolização da matéria orgânica (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007; CARNEIRO et al., 2008). Frequentemente, solos com alto  $qCO_2$  são dominados por organismos colonizadores de rápido crescimento (TÓTOLA; CHAER, 2002). Mudanças na composição da comunidade microbiana podem contribuir para aumento dos valores de  $qCO_2$  (WARDLE; GHANI, 1995). Mas nem sempre o  $qCO_2$  tem sido uma avaliação consistente da condição de distúrbio ou sustentabilidade dos ecossistemas porque há situações nas quais ocorre menor sensibilidade desse índice em relação a outros indicadores de qualidade do solo (WARDLE;

GHANI, 1995). Desse modo, para interpretação dos resultados do  $q\text{CO}_2$  requer cautela e um amplo conhecimento do sistema em estudo.

## 7. QUOCIENTE MICROBIANO

O quociente microbiano ( $q_{\text{mic}}$ ) representa a relação entre o carbono microbiano e o carbono orgânico total. Essa relação fornece informações sobre a qualidade da matéria orgânica e a quantidade de carbono imobilizado na biomassa microbiana (BANNING et al., 2008).

Mudanças no  $q_{\text{mic}}$  refletem o padrão de entrada da matéria orgânica no solo e indicam se o carbono está em equilíbrio, ou se está sendo acumulado ou reduzido (ANDERSON; DOMSCH, 1990). Em circunstâncias de desequilíbrio ambiental ou em situações em que a biomassa microbiana encontra-se sob algum fator de estresse (deficiência de nutrientes, acidez, deficiência hídrica, etc.), a capacidade de utilização de C é menor, conduzindo ao decréscimo do  $q_{\text{mic}}$  (WARDLE, 1994). Reduções nos valores do  $q_{\text{mic}}$  podem ocorrer devido à baixa qualidade nutricional da matéria orgânica, fazendo com que a biomassa microbiana torne-se pouco eficiente em utilizar totalmente o C orgânico (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008).

Por outro lado, em locais sob condições favoráveis, há tendência de aumento da biomassa microbiana, e em consequência, o  $q_{\text{mic}}$  tende a aumentar (WARDLE, 1994; KASCHUK; ALBERTON; HUNGRIA, 2010). Com adição de matéria orgânica, ou com a mudança do fator limitante para uma condição favorável a biomassa pode aumentar rapidamente, mesmo se os teores de carbono orgânico permanecem inalterados (CHAER ; TÓTOLA, 2007).

Diversos ecossistemas sucessionais têm apresentado incremento no  $q_{\text{mic}}$  logo após o distúrbio e subsequente declínio com o tempo de sucessão (BANNING et al., 2008). Esse padrão tem sido interpretado como indicativo da diminuição da disponibilidade de C da matéria orgânica do solo durante o período, mudanças na estrutura da comunidade microbiana também podem ser um fator importante (GRAHAM ; HAYNES, 2004; SCHIPPER et al., 2001).

## 8. ENZIMAS DO SOLO

As transformações mediadas pela biomassa microbiana são catalisadas por enzimas envolvidas nos processos de ciclagem de nutrientes e degradação de substratos complexos (DICK; TABATABAI, 1999; KANDELER et al., 2006; SNAJRD et al., 2013; STURSOVÁ; BALDRIAN, 2011). Nos solos, as enzimas são produzidas principalmente por fungos e bactérias (AON; COLANERI, 2001; BALDRIAN et al., 2008; CRIQUET et al., 2004; GEISSELER; HORWATH; SCOW, 2011; SARDANS; PENUELAS, 2005), sendo também sintetizadas por animais e plantas.

A produção de enzimas depende de fatores ambientais como pH, temperatura e umidade e da presença de inibidores e ativadores no solo (ALLISON et al., 2007; BLAGODATSKAYA; KUZYAKOV, 2008; CRIQUET et al., 2004; TABATABAI, 1994), e algumas enzimas são formadas somente na presença de substratos apropriados (UDAWATTA et al., 2009). A atividade enzimática do solo pode fornecer informações sobre o metabolismo microbiano e disponibilidade de recursos no ambiente (KIZILKAYA; BAYRAKLI, 2005; SINSABAUGH et al., 2012), fornecendo em curto espaço de tempo informações relevantes a respeito da funcionalidade da microbiota edáfica (ISLAM; WEIL, 2000a; GARAU et al., 2011). Além disso, reflete o efeito de numerosos fatores, incluindo clima, tipo de alteração ocorrida nos ambientes e técnicas de manejo (ARAÚJO et al., 2013; BURNS et al., 2013; CHAER; TÓTOLA, 2007; DEGENS et al., 2000; GIANFREDA et al., 2005; TRASAR-CEPEDA; LEIRÓS; GIL-SOTRES, 2008; WALDROP; BALSER; FIRESTONE, 2000).

A atividade enzimática do solo integra informações importantes sobre o status microbiológico e condições físico-químicas do solo (AON et al., 2001), tornando-se um parâmetro adequado para avaliar o papel dos microrganismos nos processos do solo (DODOR; TABATABAI, 2003). A composição da comunidade microbiana determina o potencial da comunidade para sintetizar enzimas, e qualquer modificação na comunidade pode ser refletida no nível de enzimas do solo. As alterações na atividade das enzimas podem refletir modificações no funcionamento metabólico do solo e na ciclagem de nutrientes, as quais são explicadas por mudanças na composição da comunidade microbiana (ACOSTA-MARTÍNEZ et al., 2011; FERNANDES et al., 2011).

Vários trabalhos têm enfatizado a importância da atividade enzimática como indicador sensível para detectar diferenças entre solos e mudanças que variam em função da influência das ações antrópicas (BANDICK; DICK, 1999; BAUDOIN; BENIZRI; GUCKERT, 2003; CLAASSENS et al., 2008; PAZ-FERREIRO et al., 2010). O componente microbiano e a atividade das enzimas do solo são atrativos como indicadores para monitorar a perturbação ou a poluição dos solos devido ao seu papel crucial no funcionamento desse ambiente (HINOJOSA et al., 2004; PASCUAL et al., 2000).

A atividade enzimática do solo resulta da ação de enzimas abiônticas (extracelulares) e biônticas (intracelulares). As primeiras são secretadas no ambiente por organismos vivos durante o metabolismo e a divisão celular, ou podem ser liberadas por células lisadas, ligadas à parede celular ou retidas no espaço periplasmático (BADIANE et al., 2001). Enzimas extracelulares são o principal meio pelo qual a microbiota do solo degrada compostos orgânicos complexos em moléculas pequenas que podem ser assimiladas (ALLISON; VITOUSEK, 2005) e podem estar associadas com componentes microbianos como células dormentes, mortas ou restos celulares.

As enzimas mais estudadas são as hidrolases, devido à relação com a mineralização de nutrientes essenciais aos ecossistemas terrestres (AON; COLANERI, 2001). As hidrolases são responsáveis por catalisar reações de clivagem de ligações com posterior liberação de uma molécula de água e não requerem co-fatores, sendo mais resistentes às inativações do que as demais enzimas do solo (DICK; TABATABAI, 1999). Nesta categoria encontram-se as polissacaridasas (amilase, celulase, xilanase), a protease, a invertase ou sacarase, a urease, a arilsulfatase e as fosfatases. Além das hidrolases, as oxirredutases que catalisam a transferência de elétrons de uma molécula para outra também são bastante estudadas. Neste grupo estão a desidrogenase, a lacase, a peroxidase, entre outras.

As glicosidasas estão envolvidas na degradação de componentes de C, hidrolisam celulose e outros polímeros de carboidratos (BÖHME; BÖHME, 2006; XIAO-CHANG; QIN, 2006; CUNHA-QUEDA et al., 2007). Essas enzimas são amplamente distribuídas na natureza, possuem função crítica na liberação de açúcares de baixo peso molecular, importante fonte de energia para os microrganismos do solo (BANDICK; DICK, 1999; WALDROP; BALSER; FIRESTONE, 2000). A  $\beta$ -glicosidase é uma das principais

glicosidases do solo (SARDANS; PENUELAS; ESTIARTE, 2008) e sua ação é fundamental na liberação de nutrientes da matéria orgânica. Atua nas primeiras fases de degradação de compostos orgânicos reduzindo o tamanho molecular e produzindo estruturas orgânicas menores. A atividade da  $\beta$ -glicosidase tem sido utilizada para avaliar a qualidade do solo sob diferentes práticas de manejo (DONI et al., 2012).

Claassens et al. (2005) relataram uma correlação positiva significativa entre a atividade da  $\beta$ -glicosidase e o C total do solo. Pérez de Mora et al. (2005) observaram que alta concentração de Zn tem pouco efeito sobre a atividade da  $\beta$ -glicosidase no solo, devido ao fato dos microrganismos necessitarem de mais C para sua manutenção quando estão sob condição de estresse, desse modo produzem mais enzima.

As arilsulfatases são enzimas extracelulares que catalisam a hidrólise dos ésteres de sulfato orgânico os quais correspondem a 40-70% do enxofre total do solo (TABATABAI, 1994; MELO et al., 2010; BAKER; WHITE; PIERZYNSKI, 2011). A avaliação da atividade das arilsulfatases pode fornecer informações sobre a mineralização e a transformação dos compostos de S no solo, essenciais para a nutrição da planta (ACOSTA-MARTÍNEZ et al., 2011; KNAUFF; SCHULZ; SCHERER, 2003). Essa enzima pode ser um indicador indireto de biomassa fúngica, pois apenas os fungos possuem ésteres de sulfato, substrato para arilsulfatase (BANDICK; DICK, 1999).

As ureases participam do ciclo do nitrogênio, contribuindo para liberação de N inorgânico e catalisam a hidrólise da uréia para  $\text{CO}_2$  e amônia, os quais são assimilados por microrganismos e plantas (KIZILKAYA; BAYRAKLI, 2005). As ureases participam da hidrólise dos compostos de aminoácidos que são fornecidos ao solo a partir de plantas e, em menor extensão, pelos microrganismos e animais (SARDANS; PENUELAS; ESTIARTE, 2008). As ureases do solo são altamente resistentes à degradação ambiental. Alguns autores admitem que isso ocorra por ficarem protegidas da ação de outras proteases por permanecer no interior dos solos, onde o substrato consegue penetrar (MELO et al., 2010).

As fosfatases hidrolisam compostos de P orgânico transformando-os em diferentes formas de P inorgânico, os quais são assimilados pelas plantas (AMADOR et al., 1997; BAKER; WHITE; PIERZYNSKI, 2011). Essas enzimas podem ter origem a partir de microrganismos, como bactérias, fungos

ou protozoários, assim como animais e raízes de plantas (CRIQUET; BRAUD, 2008). As fosfatases do solo são derivadas principalmente da população microbiana e têm sido sugeridas como um índice da atividade microbiana (DODOR; TABATABAI, 2003). De acordo com o tipo de ligação que hidrolisam as fosfatases podem ser divididas em: fosfomonoesterase, fosfodiesterase e fosfotriesterases. As fosfomonoesterases têm sido extensivamente estudadas em ecossistemas terrestres (TURNER; HAYGARTH, 2005; CRIQUET; BRAUD, 2008) e são consideradas as fosfatases predominantes em muitos tipos de solo e serapilheira (TURNER; MCKELVIE; HAYGARTH, 2002; CRIQUET et al., 2004), provavelmente devido à pouca especificidade por substrato. Quanto às denominações ácidas e alcalinas, estas referem-se à faixa ótima de pH nas quais atuam essas enzimas (DODOR; TABATABAI, 2003). A fosfatase ácida tem sido reportada como predominante em solos ácidos, enquanto a fosfatase alcalina predomina em solos alcalinos. Nesse sentido, as raízes das plantas constituem uma importante fonte de fosfatase ácida nos solos, o que não aconteceu em relação à fosfatase alcalina, a qual é atribuída a bactérias e fungos do solo e está ausente da rizosfera de plantas cultivadas axenicamente (CRIQUET et al., 2004). Relação entre a fosfatase e o C total do solo tem sido relatada em estudos em áreas de mineração (CLAASSENS et al., 2005).

As desidrogenases catalisam a oxidação de substratos orgânicos e têm importante função no estado inicial de oxidação da matéria orgânica (CAMINA et al., 1998). A atividade dessas enzimas é usada como uma medida da atividade microbiana no solo e tem sido considerada indicador sensível da qualidade do solo em ambientes degradados (GARCÍA et al., 1997); no entanto, alguns autores criticam essa abordagem (NANNIPIERI; GRECO; CECCANTI, 1990) uma vez que muitos fatores (tipo de solo, pH) podem afetar a sua atividade (PASCUAL et al., 2000). Por outro lado, vários autores consideram a desidrogenase um dos melhores indicadores da atividade microbiana por ser ativa apenas nas membranas das células vivas (MELO et al., 2010; SINHA et al., 2009).

Outra avaliação indireta da atividade heterotrófica do solo é a hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA). Este substrato é hidrolisado por diversas enzimas, como as proteases, as lipases e as esterases, liberadas em grande quantidade pelos decompositores primários, como as bactérias e fungos

(TAYLOR et al., 2002), servindo como indicador da atividade da biomassa do solo.

Como a extração de enzimas do solo é extremamente difícil, a sua presença costuma ser caracterizada pela avaliação da atividade sob um conjunto de condições previamente estipuladas (pH, temperatura, concentração do substrato). Dessa forma, as atividades enzimáticas do solo costumam medir a atividade potencial e não sua atividade *in situ*.

Os procedimentos para determinação da atividade das enzimas em geral prescrevem o emprego de solução tamponada contendo o substrato da enzima para ser misturada ao solo, sendo a mistura incubada sob condições padronizadas por determinado período e o produto formado quantificado por método colorimétrico (TÓTOLA; CHAER, 2002). Quanto maior a intensidade da coloração, maior a quantidade de produto formado e conseqüentemente maior a atividade enzimática. Entre os fatores importantes na determinação da atividade de enzimas do solo estão o preparo das soluções, o armazenamento das amostras, o tempo de incubação e a concentração do substrato (MATSUOKA, 2006).

A escolha das enzimas a serem analisadas é baseada na sensibilidade ao manejo do solo, na sua importância na ciclagem de nutrientes e na incorporação da matéria orgânica e na simplicidade da análise (TÓTOLA; CHAER, 2002). Devido à importância do C, N, P e S para a nutrição das plantas e o metabolismo microbiano, as enzimas envolvidas na assimilação desses elementos são frequentemente estudadas (JIN et al., 2009; STURSOVÁ; BALDRIAN, 2011) (Tabela 2). Em geral, as atividades enzimáticas do solo são fortemente relacionadas com o conteúdo de matéria orgânica e C da biomassa microbiana (MANDAL et al., 2007). Alguns estudos tem demonstrado que a atividade enzimática é regulada pelo teor de umidade do solo (BALDRIAN et al., 2008; CRIQUET et al., 2002).

A atividade enzimática tem sido considerada bom indicador da qualidade do solo (BANDICK; DICK, 1999; BASTIDA et al., 2008; CARREIRA et al., 2008; GIANFREDA et al., 2005) refletindo o grau de qualidade alcançado por um solo em processo de reabilitação (CARAVACA et al., 2003). As enzimas têm sido usadas com sucesso no monitoramento do processo de recuperação do solo em áreas pós-mineração incluindo práticas de revegetação (ALLISON et al., 2007; GARCIA et al., 2000).

**Tabela 2.** — Principais enzimas envolvidas na ciclagem do carbono, do nitrogênio, do enxofre e do fósforo no solo e algumas características dos métodos utilizados em suas determinações.

Enzimas	Substrato usado na determinação	Deteção	Referência
$\beta$ -Glicosidase	<i>p</i> -nitrofenil- $\beta$ -glicopiranosídeo	Determinação do <i>p</i> -nitrofenol liberado por colorimetria ( $\text{mmol kg}^{-1}$ <i>p</i> -nitrofenol)	Eivazi e Tabatabai (1988)
Invertase	Sacarose	Quantificação dos açúcares redutores liberados por colorimetria ( $\text{mg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ )	Schinner e Von Mersi (1990)
Celulase	Carboximetil celulose	Idem invertase	Schinner e Von Mersi (1990)
Urease	Uréia	Quantificação do amônio liberado por colorimetria ( $\text{mmol kg}^{-1} \text{h}^{-1} \text{NH}_4^+$ )	Kandeler e Gerber (1988)
Arilsulfatase	<i>p</i> -nitrofenil sulfato	Idem $\beta$ -Glicosidase	Tabatabai e Bremner (1970)
Fosfatases	<i>p</i> -nitrofenil fosfato	Idem $\beta$ -Glicosidase	Tabatabai e Bremner (1969)
Desidrogenase	Cloreto de 2,3,5-trifeniltetrazólio (TTC)	Determinação colorimétrica do 2,3,5-trifenil formazan (TTF) produzido pela redução do TTC ( $\mu\text{mol kg}^{-1} \text{h}^{-1}$ TTF)	Casida et al. (1964)

Fonte: Tótola e Chaer (2002) (Adaptado)

## 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Trabalhos sobre indicadores biológicos demonstram que os microrganismos do solo são determinantes na ciclagem de nutrientes e nas transformações da matéria orgânica e respondem rapidamente as mudanças

impostas ao solo, naturais ou antrópicas, constituindo importante ferramenta indicadora de qualidade do solo.

## 10. REFERÊNCIAS

ACOSTA-MARTÍNEZ, V.; LASCANO, R.; CALDERÓN, F.; BOOKER, J. D.; ZOBECK, T. M.; UPCHURCH, D. R. Dryland cropping systems influence the microbial biomass and enzyme activities in a semiarid sandy soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 47, p. 655-667, 2011.

ADACHI, M.; BEKKU, Y. S.; RASHIDAH, W.; OKUDA, T.; KOIZUMI, H. Differences in soil respiration between different tropical ecosystems. **Applied Soil Ecology**, v. 34, p. 258-265, 2006.

AGNELLI, A.; UGOLINI, F. C.; CORTI, G.; PIETRAMELLARA, G. Microbial biomass C and basal respiration of fine earth and highly altered rock fragments of two forest soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 33, p. 613-620, 2001.

ALLISON, S. D.; VITOUSEK, P. M. Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, p. 937-944, 2005.

ALLISON, V. J.; CONDRON, L. M.; PELTZER, D. A.; RICHARDSON, S. J.; TURNER, B. L. Changes in enzyme activities and soil microbial community composition along carbon and nutrient gradients at the Franz Josef chronosequence, New Zealand. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, p. 1779-1781, 2007.

AMADOR, J. A.; GLUCKSMAN, A. M.; LYONS, J. B.; GORRES, J. H. Spatial distribution of soil phosphatase activity within a riparian forest. **Soil Science**, v. 162, p. 808-825, 1997.

ANDERSON, T. H., DOMSCH, K. H. Application of eco-physiological quotients ( $q\text{CO}_2$  and  $q\text{D}$ ) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 22, p. 251-255, 1990.

ANDERSON, T. H., DOMSCH, K. H. Determination of ecophysiological maintenance carbon requirements of soil microorganisms in a dormant state. **Biology and Fertility of Soils**, v. 1, p. 81-89, 1985.

ANDRÉA, M. M., PETTINELLI JR., A. Efeito de aplicações de pesticidas sobre a biomassa e a respiração de microrganismos de solos. **Arquivos do Instituto de Biologia**, v. 67, p. 223-228, 2000.

ANDREWS, S. S., CARROL, R. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystems. **Agronomy Journal**, v. 11, p. 1573-1585, 2001.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 1945-1962, 2004.

AON, M. A.; CABELLO, M. N.; SARENA, D. E.; COLANERI, A. C.; FRANCO, M. G.; BURGOS, J. L.; CORTASSA, S. I. Spatio-temporal patterns of soil microbial and enzymatic activities in an agricultural soil. **Applied Soil Ecology**, v. 18, p. 239-254, 2001.

AON, M. A., COLANERI, A. C. II. Temporal and spatial evolution of enzymatic activities and physico-chemical properties in an agricultural soil. **Applied Soil Ecology**, v. 18, p. 255-270, 2001.

ARAÚJO, A. S. F.; CESARZ, S.; LEITE, L. F. C.; BORGES, C. D.; TSAI, S. M.; EISENHAEUER, N. Soil microbial properties and temporal stability in degraded and restored lands of Northeast Brazil. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 66, p. 175-181, 2013.

ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, v. 23, p. 66-75, 2007.

BADIANE, N. N. Y.; CHOTTE, J. L.; PATE, E.; MASSE, D.; ROULAND, C. Use of soil enzymes to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions. **Applied Soil Ecology**, v. 18, p. 229-238, 2001.

BAKER, L. R.; WHITE, P. M.; PIERZYNSKI, G. M. Changes in microbial properties after manure, lime, and bentonite application to a heavy metal-contaminated mine waste. **Applied Soil Ecology**, v. 48, p. 1-10, 2011.

BALDRIAN, P.; TROGL, J.; FROUZ, J.; ŠNAJDR, J.; VALÁŠKOVÁ, V.; MERHAUTOVÁ, V.; CAJTHAML, T.; HERINKOVÁ, J. Enzyme activities and microbial biomass in topsoil layer during spontaneous succession in spoil heaps after brown coal mining. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, p. 2107-2115, 2008.

BANDICK, A. K., DICK, R. P. Field management effects on soil enzyme activities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, p. 1471-1479, 1999.

BANNING, N. C.; GRANT, C. D.; JONES, D. L.; MURPHY, D. V. Recovery of soil organic matter, organic matter turnover and nitrogen cycling in a post-mining forest rehabilitation chronosequence. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, p. 2021-2031, 2008.

BARRETO, P. A. B.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F.; FONSECA, S. Atividade microbiana, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana em plantações de eucalipto, em seqüência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 611-619, 2008.

BASTIDA, F.; KANDELER, E.; MORENO, J.L.; ROS, M.; GARCÍA, C.; HERNÁNDEZ, T. Application of fresh and composted organic wastes modifies structure, size and activity of soil microbial community under semiarid climate. **Applied Soil Ecology**, v. 40, p. 318-329, 2008.

BAUDOIN, E.; BENIZRI, E.; GUCKERT, A. Impact of artificial root exudates on the bacterial community structure in bulk soil and maize rhizosphere. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, p. 1183-1192, 2003.

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

BLAGODATSKAYA, E.; KUZYAKOV, Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review. **Biology Fertility of Soils**, v. 45, p. 115-131, 2008.

BÖHME, L., BÖHME, F. Soil microbiological and biochemical properties affected by plant growth and different long-term fertilization. **European Journal of Soil Biology**, v. 42, p. 1-12, 2006.

BRANDÃO-JUNIOR, O.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; ESPINDOLA, C.R. Comparação entre os métodos de fumigação-extração e fumigação-incubação para determinação do carbono da biomassa microbiana em um latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1911-1919, 2008.

BURNS, R.G. Enzyme activity in soil: location and possible role in microbial ecology. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 14, p. 423-427, 1982.

BURNS, R. G.; DE FOREST, J. L.; MARXSEN, J.; SINSABAUGH, R. L.; STROMBERGER, M. E.; WALLENSTEIN, M. D.; WEINTRAUB, M. N.; ZOPPINI, A. Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 58, p. 216-234, 2013.

CAMINA, F.; TRASAR-CEPEDA, C.; GIL-SOTRES, F.; LEIRÓS, C. Measurement of dehydrogenase activity in acid soils rich in organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 30, p. 1005-1011, 1998.

CARAVACA, F.; ALGUACIL, M. M.; FIGUEIROA, D.; BAREA, J. M.; ROLDÁN, A. Reestablishment of *Retama sphaerocarpa* as a target species for reclamation of soil physical and biological properties in a semiarid Mediterranean land. **Forest Ecology Management**, v. 182, p. 49-58, 2003.

CARNEIRO, M. A. C.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; SOARES, A. L. L. Carbono orgânico, nitrogênio total, biomassa microbiana e atividade microbiana do solo em duas cronosseqüências de reabilitação após mineração de bauxita. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 621-632, 2008.

CARREIRA, J. A.; VINEGLA, B.; GARCÍA-RUIZ, R.; OCHOA, V.; HINOJOSA, M. B. Recovery of biochemical functionality in polluted flood-plain soils: the role of microhabitat differentiation through revegetation and rehabilitation of the river dynamics. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, p. 2088-2097, 2008.

CHAER, G. M.; MYROLD, D. D.; BOTTOMLEY, P. J. A soil quality index based on the equilibrium between soil organic matter and biochemical properties of undisturbed coniferous forest soils of the Pacific Northwest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, p. 822-830, 2009.

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

CLAASSENS, S.; RIEDEL, K. J.; VAN RENSBURG, T. L.; MORGENTHAL, P. J.; VAN RENSBURG, J. Soil microbial properties in coal mine tailings under rehabilitation. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 4, p. 75-83, 2005.

CLAASSENS, S.; VAN RENSBURG, J.; MABOETA, M. S.; VAN RENSBURG, L. Soil microbial community function and structure in a post-mining chronosequence. **Water Air Soil Pollution**, v. 194, p. 315-329, 2008.

CRQUET, S.; BRAUD, A. Effects of organic and mineral amendments on available P and phosphatase activities in a degraded Mediterranean soil under short-term incubation experiment. **Soil and Tillage Research**, v. 98, p. 164-174, 2008.

CRQUET, S.; FERRE, E.; FARNET, A. M.; LE PETIT, J. Annual dynamics of phosphatase activities in an evergreen oak litter: influence of biotic and abiotic factors. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, p. 1111-1118, 2004.

CRQUET, S.; TAGGER, S.; VOGT, G.; LE PETIT, J. Endoglucanase and  $\beta$ -glycosidase activities in an evergreen oak litter: annual variation and regulating factors. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 34, p. 1111-1120, 2002.

CUNHA-QUEDA, A. C.; RIBEIRO, H. M.; RAMOS, A.; CABRAL, F. Study of biochemical and microbiological parameters during composting of pine and eucalyptus bark. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 3213-3220, 2007.

DE-POLLI, H.; GUERRA, J. G. M. Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo: método da fumigação-extração. **Seropédica: Embrapa-CNPAB**, 1997.

DEGENS, B. P., SCHIPPERA, L. A., SPARLINGA, G. P., VOJVODIC-VUKOVIC, M. Decreases in organic C reserves in soils can reduce the catabolic diversity of soil microbial communities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, p. 189-196, 2000.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Significance and potential uses of soil enzymes. In: METTING JR., F. B. (Ed.). **Soil microbial ecology**. New York: Marcel Dekker. 1999. p. 95-127.

DINESH, R.; CHAUDHURI, S. G.; GANESHAMURTHY, A. N.; DEY, C. Changes in soil microbial indices and their relationships following deforestation and cultivation in wet tropical forests. **Applied Soil Ecology**, v. 24, p. 17-2, 2003.

DODOR, D.; TABATABAI, A. Effect of cropping systems of phosphatases in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 166, p. 7-13, 2003.

DONI, S.; MACCI, C.; CHEN, H.; MASCIANDARO, G.; CECCANTI, B. Isoelectric focusing of  $\beta$ -glucosidase humic-bound activity in semi-arid Mediterranean soils under management practices. **Biology and Fertility of Soils**, v. 48, p. 183-190, 2012.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. IN: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Org.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA. 1994. p. 3-21.

DORAN, J. W.; SARRANTONIO, M.; LIEBIG, M. A. Soil health and sustainability. **Advances in Agronomy** v. 56, p. 2-54, 1996.

DORAN, J. W.; ZEISS, M. R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, v. 15, p. 3-11, 2000.

EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; DELEPORTE, P.; IFO, S.; KAZOTTI, G.; THONGO M'BOU, A.; MOUVONDY, W.; SAINT-ANDRÉ, L.; ROUPSARD, O.; JOURDAN, C.; HAMEL, O. Soil carbon balance in a clonal *Eucalyptus* plantation in Congo: effects of logging on carbon inputs and soil CO<sub>2</sub> efflux. **Global Change Biology**, v. 12, p. 1021-1031, 2006.

FANIN, N.; HÄTTENSCHWILER, S.; BARANTAL, S.; SCHIMANN, H.; FROMIN, N. Does variability in litter quality determine soil microbial respiration in an Amazonian rainforest? **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, p. 1014-1022, 2011.

FERNANDES, M. F.; BARRETO, A. C.; MENDES, I. C.; DICK, R. P. Short-term response of physical and chemical aspects of soil quality of a kaolinitic Kandudalfs to agricultural practices and its association with microbiological variables. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 142, p. 419-427, 2011.

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

GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.) **Fundamentos da matéria orgânica no solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metropole. 2008. p. 159-168.

GARAU, G.; SILVETTI, M.; DEIANA, S.; DEIANA, P.; CASTALDI, P. Long-term influence of red mud on As mobility and soil physico-chemical and microbial parameters in a polluted sub-acidic soil. **Journal of Hazardous Materials**, v. 185, p. 1241-1248, 2011.

GARCIA, C.; HERNANDES, T.; ROLDAN, A.; ALBALADEJO, J.; CASTILLO, V. Organic amendment and mycorrhizal inoculation as a practice in a forestation of soils with *Pinus halepensis* Miller effect on their microbial activity. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, p. 1173-1181, 2000.

GEISSELER, D.; HORWATH, W. R.; SCOW, K. M. Soil moisture and plant residue addition interact in their effect on extracellular enzyme activity. **Pedobiologia**, v. 54, p. 71-78, 2011.

GIANFREDA, L.; RAO, M. A.; PIOTROWSKA, A.; PALUMBO, G.; COLOMBO, C. Soil enzyme activities as affected by anthropogenic alterations: intensive agricultural practices and organic pollution. **Science of Total Environment**, v. 341, p. 265-279, 2005.

GIL-SOTRES, F.; TRASAR-CEPEDA, C.; LEIRÓS, M.C.; SEOANE, S. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, p. 877-887, 2005.

GRAHAM, M. H.; HAYNES, R. J. Organic matter status and the size, activity and metabolic diversity of the soil microflora as indicators of the success of rehabilitation of mined sand dunes. **Biology and Fertility of Soils**, v. 39, p. 429-437, 2004.

GREEN, V. S.; STOTT, D. E.; CRUZ, J. C.; CURI, N. Tillage impacts on soil biological activity and aggregation in a Brazilian Cerrado Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 92, p. 114-121, 2007.

GRISI, B. M. Método químico de medição da respiração edáfica: alguns aspectos técnicos. **Ciência e Cultura**, v. 30, p. 82-88, 1978.

HANSON, P. J.; EDWARDS, N. T.; GARDEN, C. T.; ANDREWS, J. A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. **Biogeochemistry**, v. 48, p. 115-146, 2000.

HELINGEROVÁ, M.; FROU, J.; SANTRUKOVÁ, H. Microbial activity in reclaimed and unreclaimed post-mining sites near Sokolov (Czech Republic). **Ecological Engineering**, v. 36, p. 768-776, 2010.

HERNÁNDEZ, T.; GARCÍA, C. Estimación de la respiración microbiana del suelo. In: IZQUIERDO, C.G.; GIL-SOTRES, F.; FERNÁNDEZ, T.H.; CEPEDA, C.T. (Ed.) **Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos**: medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana. Madrid: Mundi-Prensa. 2003. p. 313-346.

HERRICK, J. E.; BROWN, J. R.; TUGEL, A. J.; SHAVER, P. L.; HAVSTAD, K. M. Applications of soil quality to monitoring and management: paradigmas from rangeland ecology. **Agronomy Journal**, v. 94, p. 3-11, 2002.

HINOJOSA, M. B.; CARREIRA, J. A.; GARCÍA-RUIZ, R.; DICK, R. P. Soil moisture pre-treatment effects on enzyme activities as indicators of heavy metal contaminated and reclaimed soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 36, p. 1559-1568, 2004.

HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BRANDÃO-JUNIOR, O.; KASCHUK, G.; SOUZA, R. A. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. **Applied Soil Ecology**, v. 42, p. 288-296, 2009.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 79, p. 9-16, 2000a.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. A rapid microwave digestion method for colorimetric measurement of soil organic carbon. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 29, p. 2269-2284, 1998.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Soil quality indicator properties in mid-atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 55, p. 69-78, 2000b.

IZQUIERDO, I.; CARAVACA, F.; ALGUACIL, M. M.; HERNÁNDEZ, G.; ROLDÁN, A. Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining area under subtropical conditions. **Applied Soil Ecology**, v. 30, p. 3-10, 2005.

JAKELAITIS, A.; SILVA, A. A.; SANTOS, J. B.; VIVIAN, R. Qualidade da camada superficial de solo sob mata, pastagens e áreas cultivadas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 38, p. 118-127, 2008.

JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil - I. Fumigation with chloroform. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 8, p. 167-177, 1976.

JIN, K.; SLEUTEL, S.; BUCHAN, D.; DE NEVE, S.; CAI, D. X.; GABRIELS, D.; JIN, J. Y. Changes of soil enzyme activities under different tillage practices in the Chinese Loess Plateau. **Soil and Tillage Research**, v. 104, p. 115-129, 2009.

KANDELER, E.; MOSIER, A. R.; MORGAN, J. A.; MILCHUNAS, D. G.; KING, J. Y.; RUDOLPH, S.; TSCHERKO, D. Response of soil microbial biomass and enzyme activities to the transient elevation of carbon dioxide in a semi-arid grassland. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 38, p. 2448-2460, 2006.

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, p. 1-13, 2010.

KIZILKAYA, R.; BAYRAKLI, B. Effects of N-enriched sewage sludge on soil enzyme activities. **Applied Soil Ecology**, v. 30, p. 192-202, 2005.

KNAUFF, U.; SCHULZ, M.; SCHERER, H.W. Arylsufatase activity in the rhizosphere and roots of different crop species. **European Journal of Agronomy**, v. 19, p. 215-223, 2003.

LISBOA, F. J. G.; CHAER, G. M.; JESUS, E. C.; FARIA, S. M.; GONÇALVES, F. S.; SANTOS, F. M.; CASTILHO, A. F.; BERBARA, R. L. L. The influence of litter quality on the relationship between vegetation and below-ground compartments: a Procrustean approach. **Plant and Soil**, v. 367, p. 551-562, 2013.

MALUCHE-BARETTA, C. R. D.; AMARANTE, C. V. T.; KLAUBERG-FILHO, O. Análise multivariada de atributos do solo em sistemas convencional e orgânico de produção de maçãs. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 1531-1539, 2006.

MANDAL, A.; PATRA, A. K.; SINGH, D.; SWARUP, A.; MASTO, R. E. Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 3585-3592, 2007.

MATSUOKA, M. **Atributos biológicos de solos cultivados com videira na região da serra gaúcha**. 2006. 173 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2006.

MELLONI, R. Quantificação microbiana da qualidade do solo.. In: SILVEIRA, A. P. D.; FREITAS, S. S. (Ed.) **Microbiologia do solo e qualidade ambiental**. Campinas: Instituto Agronômico, 2007. p. 193-218.

MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P.; ALVARENGA, M. I. N.; VIEIRA, F. B. M. Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no Sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2461-2470, 2008.

MELO, W. J.; MELO, G. P.; ARAÚJO, A. S. F.; MELO, V. P. Avaliação da atividade enzimática em amostras de solo. In: FIGUEIREDO, M. B. V.; BURITY, H. A.; OLIVEIRA, J. P.; SANTOS, C. E. R. S.; STANFORD, N. P. (Ed.) **Biotecnologia aplicada à agricultura: textos de apoio e protocolos experimentais**. Brasília: Embrapa, 2010. v. 1, p. 153-187.

MENDES, I. C.; FERNANDES, M. F.; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. Biological functioning of brazilian cerrado soils under different vegetation types. **Plant and Soil**, v. 359, p. 183-195, 2012.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2002.

NANNIPIERI, P.; GRECO, S.; CECCANTI, B. Ecological significance of the biological activity in soil. In: BOLLAG, J. M.; STOTZKY, G. (Ed.) **Soil biochemistry**. New York: Marcel Dekker, 1990. v. 6, p. 293-355.

NOGUEIRA, M. A.; ALBINO, U. B.; BRANDÃO-JÚNIOR, O.; BRAUN, G.; CRUZ, M. F.; DIAS, B. A.; DUARTE, R. T. D.; GIOPPO, N. M. R.; MENNA, O.; ORLANDI, J. M.; RAIMAM, M. P.; RAMPAZO, L. G. L.; SANTOS, M. A.; SILVA, M. E. Z.; VIEIRA, F. P.; TOREZAN, J. M. D.; HUNGRIA, M.; ANDRADE, G. Promising indicators for assessment of agroecosystems alteration among natural reforested and agricultural land use in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 115, p. 237-247, 2006.

NUNES, L. A. P. L.; LIMA, L. M.; CARNEIRO, R. F. V.; TSAI, S. M.; SALVIANO, A.A.C. Land degradation on soil microbial biomass and activity in Northeast Brazil. **Pedosphere**, v. 22, p. 88 – 95, 2012.

ODUM, E. P. The strategy of ecosystems development. **Science**, v. 164, p. 262-270, 1969.

OLDEMAN, L. R. The global extent of soil degradation. In: GREENLAND, D. J.; SZABOLCS, I. (Ed.). **Soil resilience and sustainable land use**. Wallingford: CAB International, 1994. p. 99-118.

PARADELO, R.; MOLDES, A. B.; BARRAL, M. T. Properties of slate mining wastes incubated with grape marc compost under laboratory conditions. **Waste Management**, v. 29, p. 579-584, 2009.

PASCUAL, J. A.; GARCIA, C.; HERNANDEZ, T.; MORENO, J. L.; ROS, M. Soil microbial activity as a biomarker of degradation and remediation processes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, p. 1877-1883, 2000.

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. **Soil microbiology and biochemistry**. San Diego: Academic Press. 1989.

PAZ-FERREIRO, J.; TRASAR-CEPEDA, C.; LEIRÓS, M. C.; SEOANE, S.; GIL-SOTRES, F. Effect of management and climate on biochemical properties of grassland soils from Galicia (NW Spain). **European Journal of Soil Biology**, v. 46, p. 136-143, 2010.

PÉREZ DE MORA, A.; ORTEGA-CALVO, J. J.; CABRERA, F.; MADEJÓN, E. Changes in enzyme activities and microbial biomass after “in situ” remediation of heavy metal contaminated soil. **Applied Soil Ecology**, v. 28, p. 125-137, 2005.

PÔRTO, M. L.; ALVES, J. C.; DINIZ, A. A.; SOUZA, A. P.; SANTOS, D. Indicadores biológicos de qualidade do solo em diferentes sistemas de uso no brejo paraibano. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, p. 1011-1017, 2009.

PRAGANA, R. B.; NOBREGA, R. S. A.; RIBEIRO, M. R.; LUSTOSA FILHO, J. F. Atributos biológicos e dinâmica da matéria orgânica em latossolos amarelos na região do cerrado piauiense sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 851-858, 2012.

ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; MENDES, I. C.; REIS-JÚNIOR, F. B.; FRANCHINI, J. C.; HUNGRIA, M. Biomassa microbiana do solo: fração mais ativa da matéria orgânica do solo. In: ROSCOE, R.; MERCANTE, F. M.; SALTON, J. C. (Ed.) **Dinâmica da matéria orgânica sistemas conservacionistas: modelagem matemática e métodos auxiliares**. Dourados, MS: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. p. 163-198.

SANTRUCKOVÁ, H.; STRASKRABA, M. On the relations between specific respiration activity and microbial biomass in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 23, p. 525-532, 1991.

SARDANS, J.; PENUELAS, J. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L. forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, p. 455-461, 2005.

SARDANS, J.; PENUELAS, J.; ESTIARTE, M. Changes in soil enzymes related to C and N cycle and in soil C and N content under prolonged warming and drought in a Mediterranean shrubland. **Applied Soil Ecology**, v. 39, p. 223-235, 2008.

SCHIPPER, L. A.; DEGENS, B. P.; SPARLING, G. P.; DUNCAN, L. C. Changes in microbial heterotrophic diversity along five plant successional sequences. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 37, p. 2093-2103, 2001.

SCHLOTTER, M.; DILLY, O.; MUNCH, J. C. Indicators for evaluating soil quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 98, p. 255-262, 2003.

SCHROTH, G.; D'ANGELO, S.A.; TEIXEIRA, W.G.; HAAG, D.; LIEBEREI, R. Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass, litter and soil carbon stocks after 7 years. **Forest Ecology and Management**, v. 163, p. 131-150, 2002.

SICARDI, M.; GARCIA-PRÉCHAC, F.; FRIONI, L. Soil microbial indicators sensitive to land use conversion from pastures to commercial *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) plantations in Uruguay. **Applied Soil Ecology**, v. 27, p. 125-133, 2004.

SILVA, A. P.; BABUJIA, L. C.; FRANCHINIA, J. C.; SOUZA, R. A.; HUNGRIA, M. Microbial biomass under various soil- and crop-management systems in short and long-term experiments in Brazil. **Field Crops Research**, v. 119, p. 20-26, 2010.

SILVA, R. R.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; MOREIRA, F. M. S.; CURTI, N.; ALOVISI, A. M. T. Biomassa e atividade microbiana em solo sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica Campos das Vertentes-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1585-1592, 2010.

SINHA, S.; MASTO, R. E.; RAM, L. C.; SELVI, V.A.; SRIVASTAVA, N.; K.; TRIPATHI, R. C.; GEORGE, J. Rhizosphere soil microbial index of tree species in a coal mining ecosystem. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, p. 1824-1832, 2009.

SINSABAUGH, R. L.; SHAH, J. J. F.; HILL, B. H.; ELONEN, C. M. Ecoenzymatic stoichiometry of stream sediments with comparison to terrestrial soils. **Biogeochemistry**, v. 111, p. 455-467, 2012.

SNAJDR, J.; VALASKOVÁ, V.; MERHAUTOVÁ, V.; HENRIKOVÁ, J.; CAJTHAML, T.; BALDRIAN, P. Spatial variability of enzyme activities and microbial biomass in the upper layers of *Quercus petraea* forest soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, p. 2068-2075, 2008.

STENBERG, B. Monitoring soil quality of arable land: microbiological indicators. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B. **Soil and Plant Science**, v. 49, p. 1-24, 1999.

ŠTURSOVÁ, M.; BALDRIAN, P. Effects of soil properties and management on the activity of soil organic matter transforming enzymes and the quantification of soil-bound and free activity. **Plant and Soil**, v. 338, p. 99-110, 2011.

TABATABAI, M. A. Enzymes. In: WEAVER, R. W.; AUGLE, S.; BOTTOMLY, P. J.; BERDICEK, Q.; SMITH, S.; TABATABAI, M. A.; WOLLUM, A. (Ed.) **Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 775-833.

TAYLOR, J. P.; WILSON, B.; MILLS, M. S.; BURNS, R. G. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 34, p. 387-401, 2002.

TÓTOLA, M. R.; CHAER, G. M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade do solo In: ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. (Ed.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. p. 195-276.

TRASAR-CEPEDA, C.; LEIRÓS, M. C.; GIL-SOTRES, F. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils. Some implications for their use as indicators of soil quality. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, p. 2146-2155, 2008.

TURNER, B. L.; HAYGARTH, P. M. Phosphatase activity in temperate pasture soils: Potential regulation of labile organic phosphorus turnover by phosphodiesterase activity. **Science of the Total Environment**, v. 344, p. 27-36, 2005.

TURNER, B. L.; MCKELVIE, I. D.; HAYGARTH, P. M. Characterisation of water-extractable soil organic phosphorus by phosphatase hydrolysis. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 34, p. 27-35, 2002.

UDAWATTA, R. P.; KREMER, R. J.; GARRETT, H. E.; ANDERSON, S. H. Soil enzyme activities and physical properties in a watershed managed under agroforestry and row-crop systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 131, p. 98-104, 2009.

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

WALDROP, M. P.; BALSER, T. C.; FIRESTONE, M. K. Linking microbial community composition to function in a tropical soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, p. 1837-1846, 2000.

WARDLE, D. A. Metodologia para quantificação da biomassa microbiana do solo. In: HUNGRIA, M.; ARAÚJO, R. S. (Ed.). **Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola**. Brasília: Embrapa, 1994. p.419-436.

WARDLE, D. A.; GHANI, A. A critique of the microbial metabolic ( $qCO_2$ ) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 27, p. 1601-1610, 1995.

WELC, M.; BÜNEMANN, E. K.; FLIEßBACH, A.; FROSSARD, E.; JANSA, J. Soil bacterial and fungal communities along a soil chronosequence assessed by fatty acid profiling. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 49, p. 184-192, 2012.

XIAO-CHANG, W.; QIN, L. Beta-Glucosidase activity in Paddy soils of the Taihu Lake region, China. **Pedosphere**, v. 16, p. 118-124, 2006.

ZHANG, C.; LIU, G.; XUE, S.; SONG, Z. Rhizosphere soil microbial activity under different vegetation types on the Loess Plateau, China. **Geoderma**, v. 161, p. 115-125, 2011.

