

INDICADORES BIOLÓGICOS DE QUALIDADE DO SOLO

BIOLOGICAL INDICATORS OF SOIL QUALITY

Ademir Sérgio Ferreira de ARAÚJO¹; Regina Teresa Rosim MONTEIRO²

1. Professor, Universidade Federal do Piauí. asfaruaj@yahoo.com.br 2. Bióloga, Pesquisadora, Centro de Energia Nuclear na Agricultura

RESUMO: O solo é um recurso natural vivo e dinâmico que condiciona e sustenta a produção de alimentos e fibras e regula o balanço global do ecossistema. A qualidade do solo é definida como a capacidade deste em funcionar dentro do ecossistema visando sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde das plantas e animais, sendo avaliada pelo uso de indicadores físicos, químicos e biológicos. O critério para o uso de um parâmetro como indicador do solo é a sua capacidade de interferir nos processos ecológicos, integrar as propriedades físicas, químicas e biológicas, além de ser facilmente utilizável por especialistas, técnicos e agricultores. Neste sentido, os microrganismos se enquadram nesses critérios, podendo ser utilizados como sensíveis indicadores da qualidade do solo. Os principais indicadores microbiológicos são a biomassa microbiana, a respiração, a nodulação por rizóbio, o quociente respiratório e a atividade enzimática do solo. Os microrganismos do solo, por suas características tais como a abundância e atividade bioquímica e metabólica, além de proporcionar respostas mais rápidas a mudanças no ambiente, apresentam um alto potencial de uso na avaliação da qualidade do solo.

PALAVRAS-CHAVE: Microbiologia do solo. Biomassa microbiana. Respiração do solo.

INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento populacional e a crise de alimentos no mundo, o manejo intensivo do solo, a monocultura e o uso de pesticidas e fertilizantes tornaram-se práticas comuns para o aumento da produção agrícola. A utilização destas práticas tem ocasionado perda de matéria orgânica do solo, erosão e contaminação das águas subterrâneas, além de prejuízos a microbiota e seus processos bioquímicos. No século passado, aproximadamente 8,7 bilhões de hectares de terra no mundo eram utilizados para práticas agrícolas e florestais, e destes cerca de 2 bilhões de hectares se encontravam em processo de degradação (ARSHAD e MARTIN, 2002).

O solo é um recurso natural vital para o funcionamento do ecossistema terrestre, e representa um balanço entre os fatores físicos, químicos e biológicos. Os principais componentes do solo incluem minerais inorgânicos e partículas de areia, silte e argila, formas estáveis da matéria orgânica derivadas da decomposição pela biota do solo, a própria biota, composta de minhocas, insetos, bactérias, fungos, algas e nematóides e gases como O₂, CO₂, N₂, NO_x (DORAN; SARRANTONIO; LIEBIG, 1996). Segundo estes autores, o solo, como um sistema natural vivo e dinâmico, regula a produção de alimentos e fibras e o balanço global do ecossistema, além de servir como meio para o crescimento vegetal, através do suporte físico, disponibilidade de água, nutrientes e oxigênio para as raízes. Pode atuar na regulação hídrica do

ambiente, transformação e degradação de compostos poluentes.

O solo possui seis funções principais (BLUM e SANTELISES, 1994), sendo três ecológicas e três ligadas à atividade humana. As funções ecológicas incluem: a) produção de biomassa (alimentos, fibras e energia); b) filtração, tamponamento e transformação da matéria para proteger o ambiente, da poluição das águas subterrâneas e dos alimentos; c) habitat biológico e reserva genética de plantas, animais e organismos, que devem ser protegidos da extinção. As funções ligadas à atividade humana incluem: a) meio físico que serve de base para estruturas industriais e atividades sócio-econômicas, habitação, sistema de transportes e disposição de resíduos; b) fonte de material particulado (areia, argila e minerais); c) parte da herança cultural, paleontológica e arqueológica, importante para preservação da história da humanidade.

No caso das atividades relacionadas à agricultura e meio ambiente, as principais funções do solo são: a) prover um meio para o crescimento vegetal e habitat para animais e microrganismos; b) regulação do fluxo de água no ambiente; e c) servir como um “tampão ambiental” na atenuação e degradação de compostos químicos prejudiciais ao meio ambiente (LARSON e PIERCE, 1994).

A qualidade do solo

A qualidade do solo é definida como a capacidade em funcionar dentro do ecossistema para

sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde das plantas e animais (DORAN e PARKIN, 1994). Outras definições para a qualidade do solo são:

i) "capacidade de um tipo específico de solo funcionar como ecossistema natural ou manejado para sustentar a produtividade animal e vegetal, manter a qualidade da água e do ar e suportar o crescimento humano" (KARLEN et al., 1997);

ii) "condição do solo relativa aos requerimentos de uma ou mais espécies biológicas e/ou de algum propósito humano" (JOHNSON et al., 1997);

iii) "capacidade do solo de sustentar a diversidade biológica, regular o fluxo de água e solutos, degradar, imobilizar e detoxificar compostos orgânicos e inorgânicos e atuar na ciclagem de nutrientes e outros elementos" (SEYBOLD et al., 1998).

De forma geral, as definições acima descrevem algumas funções comuns para o solo - sustentação da produtividade e a promoção da saúde vegetal e ambiental. Desta forma, um solo equilibrado proporciona à planta um desenvolvimento vigoroso e oferece condições para expressar todo seu potencial genético de produção.

Indicadores biológicos de qualidade do solo

A qualidade do solo é mensurada através do uso de indicadores. Indicadores são atributos que medem ou refletem o status ambiental ou a condição de sustentabilidade do ecossistema. Os indicadores de qualidade do solo podem ser classificados como físicos, químicos e biológicos. Na tabela 1 estão apresentados os principais indicadores físicos, químicos e biológicos e suas relações com a qualidade do solo.

Tabela 1. Principais indicadores físicos, químicos e biológicos e suas relações com a qualidade do solo.

Indicadores	Relação com a qualidade do solo
Matéria orgânica do solo (MOS)	Fertilidade, estrutura e estabilidade do solo.
Físicos	
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
Químicos	
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.
Biológicos	
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
Fixação biológica do N ₂ (FBN)	Potencial de suprimento de N para as plantas
Atividade enzimática do solo	Atividade microbiana e catalítica no solo.

(Adaptado de DORAN e PARKIN, 1994)

Os microrganismos se enquadram nesses critérios, podendo ser utilizados como sensíveis bioindicadores da qualidade do solo. Segundo Doran e Parkin (1994), bioindicadores são propriedades ou processos biológicos dentro do solo que indicam o estado deste ecossistema, podendo ser utilizados no biomonitoramento da qualidade do solo. Biomonitoramento é a medida da resposta de organismos vivos a mudanças no seu ambiente (WITTIG, 1993).

A atividade biológica é altamente concentrada nas primeiras camadas do solo, na profundidade entre 1 a 30 cm. Nestas camadas, o componente biológico ocupa uma fração de menos que 0,5 % do volume total do solo e representa

menos que 10 % da matéria orgânica. Este componente biológico consiste principalmente de microrganismos que realizam diversas funções essenciais para o funcionamento do solo. Os microrganismos decompõem a matéria orgânica, liberam nutrientes em formas disponíveis às plantas e degradam substâncias tóxicas (KENNEDY e DORAN, 2002). Além disso, formam associações simbióticas com as raízes das plantas, atuam no controle biológico de patógenos, influenciam na solubilização de minerais e contribuem para a estruturação e agregação do solo. Segundo Powlson; Brookes; Christensen (1997) a função dos microrganismos é mediar processos no solo relacionados com o manejo. Desta forma, podem ser

sensíveis indicadores de mudanças na qualidade do solo. Os microrganismos possuem a capacidade de dar respostas rápidas a mudanças na qualidade do solo, característica que não é observada nos indicadores químicos ou físicos. Em alguns casos, alterações na população e na atividade microbiana podem preceder mudanças nas propriedades químicas e físicas, refletindo um claro sinal na melhoria ou na degradação do solo.

Critérios para seleção e utilização dos indicadores biológicos no monitoramento da qualidade do solo propostos por Brookes (1995) são descritos abaixo:

a) Os atributos microbiológicos devem ser exatos e precisamente avaliados para se obter respostas em uma ampla escala de tipos e condições de solo; b) Devido ao alto número de amostras analisadas normalmente, os atributos microbiológicos devem ser fáceis e econômicos de serem avaliados; c) Os atributos microbiológicos devem ser sensíveis a

estresses, mas suficientemente robustos para não fornecer alarmes falsos; d) Devem ter validação científica, com base na realidade e conhecimento atual; e) Dois ou mais atributos, independentes, devem ser utilizados.

Nesse caso, suas inter-relações no ambiente devem ser conhecidas. Este último critério está relacionado com a inclusão de um “minimum data set (MDS)” ou número mínimo de indicadores que deve ser selecionado. Os critérios para a seleção de indicadores relacionam-se, principalmente, com a sua utilidade em definir os processos do ecossistema. Stenberg (1999) enfatiza que nenhum indicador individualmente conseguirá descrever e quantificar todos os aspectos da qualidade do solo, existindo uma relação entre todos os atributos do solo. Na tabela 2 estão listados os indicadores microbiológicos que podem ser utilizados em programas de monitoramento da qualidade do solo.

Tabela 2. Número mínimo de indicadores (MDS) utilizados nos programas de monitoramento de qualidade do solo da comunidade européia.

Programa de monitoramento	Número mínimo de indicadores
Alemanha	Respiração do solo Biomassa microbiana Quociente respiratório
Republica Tcheca	Biomassa microbiana Respiração do solo Enzimas do solo
Reino Unido	Biomassa microbiana Respiração do solo
Áustria	<i>Rhizobium</i> Biomassa microbiana Enzimas do solo
Outros países	Nitrificação Respiração do solo Decomposição da matéria orgânica Enzimas do solo

Fonte: International Co-operative Programme on Integrated Monitoring

No Brasil, Frighetto e Valarini (2000) sugeriram, através de um manual técnico, vários indicadores biológicos e bioquímicos que podem ser utilizados para a avaliação da qualidade do solo.

Biomassa microbiana do solo

A biomassa microbiana é definida como o componente vivo da matéria orgânica do solo (JENKINSON; LADD, 1981) excluindo-se a macrofauna e as raízes das plantas. Segundo os mesmos autores, a proporção presente de células microbianas vivas contendo carbono (C-microbiano, em mg kg⁻¹ de solo) geralmente compreende de 1 a

5 % do carbono orgânico total (COT) enquanto que para o nitrogênio (N-microbiano, em mg kg⁻¹ de solo) compreende de 1 a 6 % do nitrogênio total (NT). A biomassa microbiana é um dos componentes que controlam funções chaves no solo, como a decomposição e o acúmulo de matéria orgânica, ou transformações envolvendo os nutrientes minerais. Representa, ainda, uma reserva considerável de nutrientes, os quais são continuamente assimilados durante os ciclos de crescimento dos diferentes organismos que compõem o ecossistema. Conseqüentemente, os solos que mantêm um alto conteúdo de biomassa microbiana são capazes não somente de estocar, mas

também de ciclar mais nutrientes no sistema (GREGORICH et al., 1994).

A biomassa microbiana pode ser avaliada por métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos envolvem a microscopia dos componentes da biomassa microbiana (bactérias e fungos). A microscopia é o método mais antigo e vem sendo substituído, ultimamente, por outros métodos indiretos. Os métodos indiretos para determinação da biomassa microbiana são a fumigação-extração, fumigação-incubação e a respiração induzida pelo substrato (ANDERSON; DOMSCH, 1978). A técnica da fumigação-extração (VANCE; BROOKES; JENKINSON, 1987) envolve a eliminação dos microrganismos pelo clorofórmio. O carbono liberado pela morte dos microrganismos é determinado por extração química ou digestão. A fumigação-incubação (JENKINSON; POWLSON, 1976) é o método mais antigo na quantificação da biomassa microbiana do solo e consiste na fumigação de uma amostra de solo (semelhante ao método da fumigação-extração) e na quantificação do fluxo de CO₂ liberado pelo solo durante um período de incubação entre 7 a 10 dias. Além destes, há os métodos da irradiação-incubação e irradiação-extração, utilizando, nestes casos, a radiação de microondas para eliminação dos microrganismos (FERREIRA; CAMARGO; VIDOR, 1999).

Recentemente tem se utilizado a quantidade de ácidos graxos ligados a ésteres de fosfolipídios (PFLAs) em solo como um método alternativo de determinação da biomassa microbiana (BLOEM e BREURE, 2002). PFLAs são encontrados em membranas de bactérias e fungos e, após extração de amostras de solo, podem ser quantificados por

cromatografia gasosa (ZELLES, 1999). A técnica de PFLAs pode, ainda, fornecer informações sobre a biodiversidade e a razão entre a biomassa fúngica e bacteriana. Além disso, a diversidade da população microbiana pode ser determinada pelos ácidos nucleicos (mRNA e rRNA) dentro das células. Outros métodos que podem ser utilizados para a determinação da biodiversidade, utilizando o gene 16S do rRNA, são a Eletroforese do Gradiente de Denaturação em Reação em Cadeia da Polimerase (PCR-DGGE) (MUYZER; DEWAAL; UITTERLINDEN, 1993) e o Polimorfismo do Fragmento de Restrição (T-RFLP) (LIU et al., 1997).

Isoladamente, a biomassa microbiana pouco reflete as alterações na qualidade do solo, apesar de ser um indicador precoce de intervenções antrópicas (BROOKES, 1995). Entretanto, a biomassa microbiana associada ao conteúdo de matéria orgânica pode ser utilizada como índices para comparar a qualidade do solo sob diferentes manejos. Embora, a resposta da biomassa microbiana seja mais rápida, se comparado com o conteúdo de matéria orgânica (JENKINSON; LADD, 1981). Estes autores sugerem que as mudanças no conteúdo de biomassa microbiana predizem em longo tempo o conteúdo de matéria orgânica do solo. Dessa forma, segundo Larson e Pierce (1994) as taxas de mudanças da biomassa podem indicar, em longo tempo, a qualidade e a saúde do solo. Vários trabalhos mostraram a influencia de diferentes sistemas de manejo no conteúdo de biomassa microbiana e matéria orgânica do solo (Tabela 3).

Tabela 3. Comparação entre o conteúdo de biomassa (C_{mic}) e matéria orgânica (C_{org}) em diferentes sistemas de manejo do solo (camada de 0-10 cm).

Solo e local	Sistema de manejo	C _{mic} (µg g ⁻¹)	C _{org} (g kg ⁻¹)	Referencia
1. Franco argiloso (Nova Zelândia)	Pastagem	1557	50,24	SPARLING; SHEPHERD; BREDJA, 1992
	Milho	540	30,59	
2. Franco siltoso (Nova Zelândia)	Floresta nativa	1295	90,9	YEATES et al., 1991
	Pastagem	1905	80,7	
3. Argiloso (Brasil)	Cerrado nativo	1310	18,0	D'ANDREA et al., 2002
	Plantio direto	550	19,0	
	Convencional	213,4	14,0	
4. Franco argiloso (EUA)	Orgânico	354	14,9	GLOVER; REGANOLD; ANDREWS, 2000
	Integrado	390	15,6	
	Convencional	302	13,0	
5. Franco arenoso (EUA)	Orgânico	311	11,2	TU; RISTAINO; RU, 2006
	Convencional	215	8,5	
6. Franco siltoso (Espanha)	Orgânico	416	20,0	MELERO et al., 2006
	Convencional	205	8,4	

Respiração do solo

A respiração do solo, que é a oxidação biológica da matéria orgânica a CO_2 pelos microrganismos aeróbios, ocupa uma posição chave no ciclo do carbono nos ecossistemas terrestres. A avaliação da respiração do solo é a técnica mais freqüente para quantificar a atividade microbiana, sendo positivamente relacionada com o conteúdo de matéria orgânica e com a biomassa microbiana (ALEF, 1995).

A medida da respiração do solo é bastante variável e dependente, principalmente, da disponibilidade do substrato, umidade e temperatura (BROOKES, 1995). Os microrganismos respondem rapidamente a mudanças nas condições do solo após longos períodos de baixa atividade. Por exemplo, poucos minutos em seguida ao reumedecimento do solo ocorre aumento na respiração e mineralização do C e do N da matéria orgânica do solo. Existe grande variabilidade nas medidas da respiração e desta forma, torna difícil a interpretação dos resultados quando somente é utilizado este indicador (BROOKES, 1995).

A respiração do solo pode ser determinada pela produção de CO_2 ou o consumo de O_2 . A medida da produção de CO_2 é mais sensível, pois a concentração do CO_2 na atmosfera é mais baixa (0,033%) do que do O_2 (20%). A avaliação da respiração do solo pode ser realizada em laboratório ou em campo e, geralmente, são simples, baratas, fáceis de serem feitas.

Uma vez que a respiração microbiana é influenciada pela temperatura, umidade e disponibilidade de nutrientes do solo, o pré-tratamento e a padronização das amostras devem ser realizados antes da avaliação da respiração. A respiração microbiana diminui com a profundidade do solo e correlaciona-se significativamente com o conteúdo de matéria orgânica e os outros indicadores biológicos. Existe variação na respiração microbiana nos diferentes sistemas de manejo do solo, sendo, este indicador altamente sensível aos efeitos de pesticidas e metais pesados (ARAÚJO; MONTEIRO; ABARKELI, 2003; ARAÚJO; MONTEIRO, 2006).

A combinação das medidas da biomassa microbiana e respiração do solo fornecem a quantidade de CO_2 evoluída por unidade de biomassa, denominada quociente metabólico ou respiratório ($q\text{CO}_2$). O $q\text{CO}_2$ indica a eficiência da biomassa microbiana em utilizar o carbono disponível para biossíntese, sendo sensível indicador para estimar a atividade biológica e a qualidade do substrato (SAVIOZZI et al., 2002). O uso do $q\text{CO}_2$

como uma medida de indicador de mudanças na qualidade do solo está baseado na teoria sobre a respiração da comunidade descrita por ODUM (1985). Esta teoria descreve que o aumento na respiração da comunidade pode ser o primeiro sinal de estresse, uma vez que a reparação dos danos causados por distúrbios no solo requer desvio de energia do crescimento e reprodução para a manutenção celular. Portanto, durante um estresse na biomassa microbiana, haverá direcionamento de mais energia para a manutenção celular, em lugar do crescimento, de forma que uma proporção de carbono da biomassa será perdida como CO_2 .

Fixação biológica do N_2

A fixação biológica do nitrogênio (FBN) é um processo de quebra da tripla ligação do N_2 através de um complexo enzimático, denominado nitrogenase. O processo ocorre no interior de estruturas específicas, denominadas de nódulos, onde bactérias do gênero *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* e *Azorhizobium* convertem o N_2 atmosférico em NH_3 , que é incorporada em diversas formas de N orgânico para a utilização por plantas da família das leguminosas. A simbiose *Rhizobium*-leguminosas é caracterizada pela alta especificidade hospedeira e a nodulação pelo *Rhizobium* e a FBN tem sido proposta como um indicador de qualidade do solo (VISER; PARKINSON, 1992).

As avaliações da freqüência e diversidade do *Rhizobium* podem ser realizadas através de um simples teste usando vasos com solo, onde diversas leguminosas são plantadas e o número e a massa dos nódulos formados podem ser determinados após um intervalo de tempo. Alternativamente existem métodos de isolamento da bactéria em meio de cultura específico (TONG e SADOWSKY, 1994) com caracterização morfológica e fisiológica (HUNGRIA et al., 2001), além de métodos moleculares como PCR (TESFAYE e HOLL, 1998) e RAPD (BAYMIEV; CHEMERIS; VAKHITOV, 1999). A combinação de métodos quantitativos e de diversidade permitirá uma análise mais acurada do potencial da simbiose *Rhizobium*-leguminosas no uso para avaliação da qualidade do solo.

Enzimas do solo

As enzimas são mediadoras do catabolismo biológico dos componentes orgânico e mineral do solo. A atividade enzimática do solo possui as características de: a) ser relacionada com a matéria orgânica, com as propriedades físicas e com a atividade e biomassa microbiana; b) ser um claro

indicador de mudanças na qualidade do solo; c) envolver metodologias simplificadas (DICK, 1997). Além disso, a atividade enzimática pode ser utilizada como medida de atividade microbiana, produtividade e efeito de poluentes no solo. Taylor et al. (2002) sugerem duas razões para avaliar as enzimas do solo. A primeira, como informativo do potencial bioquímico e de manipulação do solo, e a segunda, como indicador de qualidade devido a

sensibilidade para prover informações sobre mudanças nas funções-chave do solo. As principais enzimas utilizadas para a avaliação da qualidade do solo estão sumarizadas na Tabela 4. As enzimas estão presentes no solo tanto associadas às células microbianas (enzimas intracelulares), quanto não associadas (enzimas extracelulares). Existem correlações entre a atividade enzimática e os outros indicadores biológicos do solo.

Tabela 4. Principais enzimas indicadoras da qualidade do solo.

Enzimas do solo	Reação enzimática	Atividade indicadora
Desidrogenase	Sistema de transporte de elétrons	Atividade microbiana
B-glucosidase	Hidrólise da celobiose	Ciclagem de carbono
Celulase	Hidrólise de celulose	Ciclagem de carbono
Uréase	Hidrólise da uréia	Ciclagem de nitrogênio
Amidase	Mineralização do N	Ciclagem do N
Fosfatase	Liberção de PO_4^-	Ciclagem do P
Arisulfatase	Liberção de SO_4^-	Ciclagem de S
FDA	Hidrólise	Atividade enzimática

Balota et al. (2004) investigaram a atividade de algumas enzimas do solo (amilase, celulase, arisulfatase e fosfatase) sob sistemas de manejo convencional, plantio direto e rotação de culturas e observaram significantes correlações entre a atividade enzimática e o C e N microbiano do solo. Anteriormente, Frakenberg e Dick (1983) observaram uma relação significativa entre as enzimas, tais como fosfatase, amidase e catalase, e a respiração e biomassa microbiana do solo.

As práticas agrícolas e os indicadores biológicos

As mudanças no uso do solo associadas ao sistema de manejo, à utilização excessiva de pesticidas e fertilizantes e, recentemente, a aplicação de resíduos urbanos e industriais, tem proporcionado alterações nas propriedades biológicas do solo. Neste sentido, vários trabalhos utilizando indicadores biológicos já foram realizados para verificar o efeito dessas práticas agrícolas sobre a qualidade do solo (CARDOSO e FORTES NETO, 2000; ARAÚJO; MONTEIRO; ABARKELI, 2003; D'ANDREA et al., 2002; MOREIRA e MALAVOLTA, 2004; SANTOS; CASTILHOS; CASTILHOS, 2004; ARAÚJO; MONTEIRO, 2006; TEIXEIRA et al., 2006; ARAÚJO et al., 2006; TU; RISTAINO; RU, 2006; MELERO et al., 2006; ARAÚJO et al., 2007).

As alterações em alguns indicadores biológicos do solo pela adoção de diferentes sistemas de manejo foram verificadas por D'Andrea et al (2002) na região do cerrado do estado de Goiás, e por Santos; Castilhos; Castilhos (2004) no

Rio Grande do Sul. D'Andrea et al. (2002) observaram redução nos teores de carbono microbiano com a adoção de pastagem e plantio convencional, comparado com o sistema plantio direto e a mata nativa (Tabela 3). O mesmo comportamento foi observado por Santos; Castilhos; Castilhos (2004) que verificaram que o sistema plantio direto, comparado ao plantio convencional, proporcionou aumentos na atividade e biomassa microbiana do solo. Recentemente, Melero et al. (2006) avaliaram a resposta dos microrganismos do solo a adoção do sistema convencional e orgânico e observaram que o sistema orgânico aumentou o conteúdo de matéria orgânica, a biomassa e a atividade microbiana, melhorando a qualidade e produtividade do solo.

Em relação ao efeito da aplicação de pesticidas e resíduos urbanos e industriais sobre a microbiota do solo, Araújo; Monteiro; Abarkeli (2003) estudaram o comportamento do herbicida glifosato sobre alguns indicadores biológicos e observaram aumento na respiração e atividade enzimática do solo com a aplicação do herbicida. Araújo e Monteiro (2006) estudaram o efeito do uso de lodo têxtil compostado e não compostado sobre os microrganismos e observaram que o não compostado causou efeitos negativos na biomassa microbiana do solo. Já o lodo compostado teve efeitos positivos na biomassa, atividade microbiana e no número de bactérias, melhorando a capacidade de reciclagem do carbono do solo. Recentemente, Araújo et al. (2007) avaliaram o lodo têxtil compostado sobre a nodulação e a fixação biológica do N_2 em soja e feijão-caupi e observaram que, em

baixa dosagem, o resíduo não apresentou efeitos negativos sobre a simbiose *Bradyrhizobium*-leguminosas.

Cardoso e Fortes Neto (2000) avaliaram a efeito da aplicação de doses crescentes de lodo de esgoto (0, 10, 20, 40, 80 e 160 t ha⁻¹) sobre a microbiota do solo e observaram que houve aumentos na respiração basal (liberação de CO₂) e no quociente metabólico do solo enquanto que a biomassa microbiana não aumentou com a adição do biossólido. Os autores sugerem que a aplicação do biossólido ocasionou mudanças importantes no ambiente, na comunidade microbiana e na atividade dos microrganismos do solo.

Recentemente, Araújo et al. (2006) e Teixeira et al. (2006) avaliaram o efeito do lodo

de curtume sobre a nodulação por *Rhizobium* em leguminosas arbóreas (leucena e algaroba) e granífera (feijão-caupi) e observaram que a aplicação do resíduo, em baixas doses, não provocou efeitos deletérios sobre a nodulação, além de melhorar a fertilidade do solo.

CONCLUSÃO

Os estudos sobre bioindicadores mostram que os microrganismos do solo, por suas características tais como a abundância e atividade bioquímica e metabólica, além de proporcionar respostas mais rápidas a mudanças no ambiente, apresentam um alto potencial de uso na avaliação da qualidade do solo.

ABSTRACT: Soil is a dynamic and living resource whose condition is vital to both the production of food and fibre and to global balance and ecosystem function. Soil quality is the capacity of soil to function as a vital living system, within ecosystem and land use boundaries, to sustain biological productivity, promote the quality of air and water environments, and maintain plant, animal and human health, being evaluated by physical, chemical and biological indicators. The criteria to use of parameter as soil indicators is the capacity of to correlate with ecosystem processes, integrate soil physical, chemical and biological properties, be relatively easy to use under field conditions, be sensitive to variations in management and climate. The microorganisms are within these criteria, can be used as sensitive indicators of soil quality. The soil microorganisms, due the characteristics as abundance and biochemical and metabolic activity, associated to rapid responses a changes in the environment, has an high potential of use in evaluation of soil quality.

KEYWORDS: Soil microbiology. Microbial biomass. Soil respiration.

REFERENCIAS

- ALEF, K.; NANNIPIERI, P. **Methods in applied soil microbiology and biochemistry**. Londres: Academic Press, 1995. 576p.
- AMATO, M.; LADD, J. N. Application of the ninhydrin-reactive N assay for microbial biomass in acid soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 26, p. 1109-1115, 1994.
- ANDERSON, J. P. E; DOMSCH, K. H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 10, p. 215-221, 1978
- ARAÚJO, A. S. F.; CARVALHO, A. J. S.; SANTOS, F. J. S.; CARVALHO, E. M. S.; SANTOS, V. B. Growth and nodulation of *Leucaena* and *Prosopis* seedlings in soil plus tannery sludge. **Caatinga**, Mossoró, v. 19, p. 20-24, 2006.
- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R. Microbial biomass and activity in a Brazilian soil plus untreated and composted textile sludge. **Chemosphere**, Oxford, v. 64, p. 1043-1046, 2006.
- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R.; ABARKELI, R. B. Effect of glyphosate on the microbial activity of two Brazilian soils. **Chemosphere**, Oxford, v. 52, p. 799-804, 2003.
- ARAÚJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R.; CARVALHO, E. M. S. Effect of composted textile sludge on growth, nodulation and nitrogen fixation of soybean and cowpea. **Bioresource Technology**, Londres, v. 97, p. 1028-1032, 2007.

ARSHAD, M. A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 88, p. 153-160, 2002.

BALOTA E. L.; KANASHIRO, M.; COLOZZI FILHO, A.; ANDRADE, D. S.; DICK, R. P. Soil enzyme activities under long-term tillage and crop rotation systems in subtropical agro-ecosystems. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 35, p. 300-306, 2004.

BAYMIEV, A. K.; CHEMERIS, A. V.; VAKHITOV, V. A. Informative value of some modern methods for DNA polymorphism identification in microorganisms as exemplified by symbiotic root-nodule bacteria *Rhizobium galegae*. **Russian Journal of Genetics**, Moscou, v. 35, p. 1387-1393, 1999.

BIEDERBECK, V.O.; CAMPBELL, C.A.; ZENTHER, R.P. Effect of crop rotation and fertilization on some biological properties of a loam in southwestern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, Montreal, v. 64, p. 355-367, 1984.

BLOEM, J.; BREURE, A. M. Microbial indicators. In: BREURE, A. M.; MARKET, B.; ZECHMEISTER, H. G. (Org.) **Bioindicators/Biomonitoring. Principles, Assessment, Concept**. Amsterdam: Elsevier, 2002. p. 43-61.

BLUM, W. E. H.; SANTELISES, A. A. A concept of sustainability and resilience based in soil functions. In: GREENLAND, D. J.; SZABOLCS, I. (Org.) **Soil resilience and sustainable land use**. Wallingford: CAB, 1994. p. 535-542.

BROOKES, D. C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy metals. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 19, p. 269-279, 1995.

CARDOSO, E. J. B. N.; FORTES NETO, P. Aplicabilidade do biossólido em plantações florestais: alterações microbianas no solo. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. (Org.) **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. p. 197-202.

D'ANDREA, A. F. D.; 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. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 913-923, 2002.

DICK, R. P. Soil enzymes activities as integrative indicator of soil health. In: PANKHURST C.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R. (Org.) **Biological indicators of soil health**. New York: CAB, 1997. p. 121-155.

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.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J.W.; JONES, A. J. (Org.) **Methods for assessing soil quality**. Madison: SSSA, 1996. p. 25-37.

DORAN, J. W.; SARRANTONIO, M.; LIEBIG, M. Soil health and sustainability. In: SPARKS, D.L. (Org.) **Advances in Agronomy**. San Diego: Academic Press, 1996. p. 1-54.

FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 991-996, 1999.

FRIGHETTO, R. T. S.; VALARINI, P. J. **Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo**. Jaguariúna: Embrapa, 2000. 198p.

GLOVER, J. D.; REGANOLD, J. P.; ANDREWS, P. K. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. **Agriculture, Ecosystem & Environment**, Amsterdam, v. 80, p. 29-45, 2000.

- GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R.; ANGERS, D. A.; MONREAL, C. M.; ELLERT, B. H. Towards a minimum data set to assess soil organic-matter quality in agricultural soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Montreal, v. 74, p. 367-385, 1994.
- HUNGRIA, M.; CHUEIRE, L. M. D.; COCA, R. G.; MEGIAS, M. Preliminary characterization of fast growing rhizobial strain isolated from soyabean nodules in Brazil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 33, p. 1349-1361, 2001.
- JENKINSON, D. S.; LADD, J. N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover. In: PAUL, E. A.; LADD, J. N. (Org.) **Soil biochemistry**. New York: Marcel Dekker, 1981. p. 415-471.
- JENKINSON, D. S.; POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil: A method for measuring biomass. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 8, p. 209-213, 1976
- JOHNSON, D. L.; AMBROSE, S. H.; BASSET, J. J.; BOWEN, M. L. CRUMMEY, D. E.; ISAACSON, J. S.; JOHNSON, D. N.; LAMB, P.; SAUL, M.; WINTER-NELSON, A. E. Meanings of environmental terms. **Journal of Environmental Quality**, New York, v. 26, p. 581-589, 1997.
- KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G. E. Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 61, p. 4-10, 1997.
- KENNEDY, A.; DORAN, J. Sustainable agriculture: role of microorganisms. In: BITTON, G. (Org.) **Encyclopedia of Environmental Microbiology**. New York: John Wiley & Sons, 2002. p. 3116-3126.
- LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. 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. 37-51.
- LIU, W. T.; MARSH, T. L.; CHENG, H.; FORNEY, L. J. Characterization of microbial diversity by determining terminal restriction fragment length polymorphism of genes encoding 16S rRNA. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 63, p. 4516-4522, 1997.
- MELERO, S.; PORRAS, J. C. R.; HERENCIA, J. F.; MADEJON, E. 2005. Chemical and biochemical properties in a silty loam soil under conventional and organic management. **Soil and Tillage Research**, Londres, v. 90, p. 162-170, 2005.
- MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E. Dinâmica da matéria orgânica e da biomassa microbiana em solo submetido a diferentes sistemas de manejo na Amazônia Ocidental. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 1103-1110, 2004.
- MUYZER, G.; DEWAAL, E. C.; UITTERLINDEN, A. G. Profiling of complex microbial population by denaturing gradient gel-electrophoresis analysis of polymerase chain reaction-amplified genes coding for 16S ribosomal-RNA. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 59, p. 695-700, 1993.
- ODUM, E. P. Trends expected in stressed ecosystems. **BioScience**, Londres, v. 35, p. 419-422, 1985.
- POWLSON, D. S.; BROOKES, P. C.; CHRISTENSEN, B. T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 19, p. 159-164, 1997.
- SANTOS, V. B.; CASTILHOS, D. D.; CASTILHOS, R. M. V. et al. Biomassa, atividade microbiana e teores de carbono e nitrogênio totais de um planossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 10, p. 333-338, 2004.

- SAVIOZZI, A.; BUFALINO, P.; LEVI-MINZI, R.; RIFFALD, R. Biochemical activities in a degraded soil restored by two amendments: a laboratory study. **Biology & Fertility of Soils**, Berlin, v. 35, p. 96-101, 2002.
- SCHNURER, J.; ROSSWALL, T. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 43, p. 1256-1261, 1982.
- SEYBOLD, C. A.; HERRICK, J. E.; BREDJA, J. J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, Madison, v.164, p. 224-233, 1998.
- SPARLING, G. P.; SHEPHERD, T. G.; KETTLES, H. A. Changes in soil organic C, microbial C and aggregate stability under continuous maize and cereal cropping, and after restoration to pasture in soil from the Manawatu region. **New Zealand Soil and Tillage**, Wellington, v. 24, p. 225-241, 1992.
- STENBERG, B. Monitoring soil quality of arable land: microbiological indicators. *Acta Agriculturae Scandinavica*, Estocolmo, v. 49, p. 1-24, 1999.
- STOCKDALE, E. A.; RESS, R. M. Relationship between biomass nitrogen and nitrogen extracted by other nitrogen availability methods. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 26, p. 1213-1220, 1994.
- TAYLOR, J. P.; WILSON, M.; MILLS, S.; BURNS, R. G. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 34, p. 387-401, 2002.
- TEIXEIRA, K. R. G.; GONÇALVES FILHO, L. A. R.; CARVALHO, E. M. S.; ARAÚJO, A. S. F.; SANTOS, V. B. Efeito da adição de lodo de curtume na fertilidade do solo, nodulação e rendimento de matéria seca do caupi. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, p. 1071-1076, 2006.
- TESFAYE, M.; HOLL, F. B. Group-specific differentiation of *Rhizobium* from clover species by PCR amplification of 23S rDNA sequences. **Canadian Journal of Microbiology**, Ottawa, v. 44, p. 1102-1105, 1998.
- TONG, Z.; SADOWSKY, M. J. A selective medium for the isolation and quantification of *Bradyrhizobium japonicum* and *Bradyrhizobium elkanii* strains for soil and inoculants. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, v. 60, p. 581-586, 1994.
- TU, C.; RISTAINO, J. B.; HU, S. Soil microbial biomass and activity in organic tomato farming systems: Effects of organic inputs and straw mulching. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v.38, p.247-255, 2006.
- VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 19, p. 703-707, 1987.
- VISER, S.; PARKINSON, D. Soil biological criteria as indicator of soil quality: Soil microorganisms. **American Journal of Agriculture Alternative**, Washington, v. 7, p. 33-37, 1992.
- WILLIAMS, B. L.; SPARLING, G. P. Microbial biomass C and readily mineralized nitrogen in peat and forest humus. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 20, p. 579-581, 1988.
- WITTIG, R. General aspects of biomonitoring heavy metals by plants. In: MARKERT, B. (Org.) **Plant as biomonitors. Indicators for heavy metals in the terrestrial environment**. Weinheim: VCH, 1993. p. 3-27.
- YEATES, G. W.; BAMFORTH, S. S.; ROSS, D. J.; TATE, K. R.; SPARLING, G. P. Recolonization of methyl bromide sterilized soils under four different field conditions. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 11, p. 181-189, 1991.
- ZELLES, L. Fatty acid patterns of phospholipids and lipopolysaccharides in the characterization of microbial communities in soil: a review. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 29, p. 111-129, 1999.